



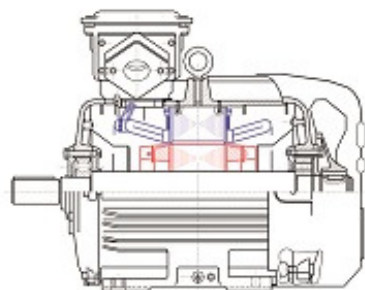
**Забудский
Евгений Иванович**

**профессор,
доктор технических наук**

Специализируется в области
электрических машин
и компьютерных технологий.

Результаты научной работы
и учебно-методической работы
представлены на личном

Web-сайте <http://zabudsky.ru>



ISBN 5-703-009031-0-5
9 785703 009031

Е. И. Забудский

Электрические машины

Часть 2

Е. И. Забудский

Электрические машины

Часть 2. Асинхронные машины



УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Москва
2017

Е. И. Забудский

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

Часть вторая

АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Учебное пособие

*Рекомендовано
Научно-методическим советом по технологиям,
средствам механизации и энергетическому оборудованию
в сельском хозяйстве Федерального УМО
по сельскому, лесному и рыбному хозяйству*

Москва
ООО «Мегаполис»
2017

УДК 621.314
ББК 31.261.8
3 12

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Электрические машины и электропривод» Кубанского государственного аграрного университета **С. В. Оськин**

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные и электротехнические системы и технологии» Российского государственного аграрного заочного университета **Л. П. Шичков**

Забудский Е. И.

3 12 Электрические машины. Асинхронные машины: учебное пособие для вузов / Е. И. Забудский. – М.: ООО «Мегаполис», 2017. – Ч. 2. – 304 с.

ISBN 978-5-9909691-6-2

Книга является второй частью учебного пособия по курсу «Электрические машины». В соответствии с утвержденной программой, в ней рассматриваются принципы устройства и основные вопросы теории асинхронных машин; режимы работы, характеристики и эксплуатационные свойства асинхронных машин. Приведено описание экспериментальных работ.

Предназначено для студентов электроэнергетических и электромеханических специальностей вузов. Будет полезной для аспирантов соответствующих специальностей.

Рекомендовано Научно-методическим советом по технологиям, средствам механизации и энергетическому оборудованию в сельском хозяйстве Федерального УМО по сельскому, лесному и рыбному хозяйству: «Учебное пособие содержит сведения, необходимые для формирования профессиональных компетенций при подготовке бакалавров по направлению «Агроинженерия» и рекомендуется для использования в учебном процессе».

УДК 621.314
ББК 31.261.8

ISBN 978-5-9909691-6-2

© Забудский Е. И., 2017
© ООО «Мегаполис», 2017

Содержание

Введение	6
1. Термины и определения	13
2. Буквенные обозначения элементов в электрических схемах	17
3. Обозначение выводов обмоток электрических машин переменного тока	18
4. Единые серии асинхронных двигателей. Обозначение типа двигателей	20
5. Механизмы сельскохозяйственного назначения с электродвигателями к ним	26
6. Условные графические обозначения асинхронной машины в схемах	27
7. Конструктивные исполнения электрических машин	28
7.1. Степени защиты от внешних воздействий (IP)	28
7.2. Способы охлаждения (IC)	30
7.3. Способы монтажа электрических машин (IM)	33
7.4. Климатическое исполнение двигателей	34
8. Общие вопросы теории асинхронных машин	36
8.1. Устройство асинхронных двигателей	36
8.2. Развернутая схема трехфазной обмотки	44
8.2.1. Построение схемы однослойной обмотки	44
8.2.2. Построение схемы двухслойной обмотки	49
8.3. МДС пространственно-распределенной обмотки	53
8.3.1. МДС однофазной обмотки	53
8.3.2. МДС трехфазной обмотки	58
8.3.3. Высшие гармоники МДС трехфазной обмотки	61
8.4. Создание вращающегося магнитного поля трехфазной пространственно-распределенной обмоткой	64
8.5. ЭДС пространственно-распределенной обмотки	71
8.5.1. Обмоточный коэффициент обмотки двигателя	79
8.5.1.1. Коэффициент укорочения шага обмотки	80
8.5.1.2. Коэффициент распределения обмотки	82
8.5.1.3. Коэффициент скоса	83
8.6. Параметры обмоток асинхронной машины	84

8.6.1. Главное поле и поле рассеяния	84
8.6.2. Активные и индуктивные сопротивления обмоток	85
9. Номинальные данные исследуемых двигателей	91
9.1. Агрегат «Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором – генератор постоянного тока» (работа №1)	92
9.2. Агрегат «Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором –электромашинный динамометр» (работа №2)	93
9.3. Агрегат «Трехфазный асинхронный двигатель в однофазном режиме – генератор постоянного тока» (работа №3)	94
9.4. Агрегат «Трехфазный асинхронный генератор – двигатель постоянного тока» (работа №4)	94
9.5. Трехфазная асинхронная машина с неподвижным ротором (работа №5)	95
10. Работа №1. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором (с беличьей клеткой) ...	96
11. Работа №2. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором	182
12. Работа №3. Трехфазный асинхронный двигатель в однофазном режиме	227
13. Работа №4. Трехфазный асинхронный генератор	264
14. Работа №5. Трехфазная асинхронная машина с неподвижным ротором	282
Литература	303
Рис. В.1. Приборная панель стенда «Однофазный асинхронный двигатель» и «Асинхронный генератор»	12
Рис. 7.1. Аксиальная (а) и радиальная (б) системы вентиляции	31
Рис. 8.1. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором	36
Рис. 8.2. Структурная схема трехфазной обмотки статора и ее соединение на клеммной панели в «звезду» (Y), в «треугольник» (Δ)	37
Рис. 8.3. Короткозамкнутый ротор с обмоткой типа беличья клетка – (а); обмотка ротора типа беличья клетка с вентиляционными лопатками –(б)	37
Рис. 8.4. Асинхронный двигатель фазным ротором – (а); фазный ротор мощного двигателя – (б)	38
Рис. 8.5. Щеточный узел мощного асинхронного двигателя с фазным ротором	39
Рис. 8.6. Короткозамкнутый асинхронный двигатель с беличьей клеткой на роторе	40

Рис. 8.7. Короткозамкнутый асинхронный двигатель с беличьей клеткой на роторе: выполнен в закрытом обдуваемом исполнении со степенью защиты IP54 (55)	40
Рис. 8.8. Электромашинный агрегат	41
Рис. 8.9. Элементы штампа для изготовления пластин статора и ротора	41
Рис. 8.10. Станина и статор с обмоткой, уложенной в пазы	42
Рис. 8.11. Пластины ротора асинхронного двигателя	43
Рис. 8.12. Расположение в пазовом слое фазы U однослойной обмотки, $y = \tau$ (а); расположение в пазовом слое фазы U двухслойной обмотки, $y < \tau$ (б) .	45
Рис. 8.13. Звезда векторов пазовых ЭДС однослойной трехфазной обмотки	46
Рис. 8.14. Развернутая схема однослойной трехфазной обмотки	48
Рис. 8.15. Развернутая схема двухслойной трехфазной обмотки	52
Рис. 8.16. МДС и магнитное поле: одной катушки – (б) и (в); фазы U – (а); трехфазной обмотки – (г) и (д)	55
Рис. 8.17. К иллюстрации вращения двух волн МДС – составляющих пульсирующую МДС одной фазы	57
Рис. 8.18. Разложение неподвижной в пространстве пульсирующей МДС катушки на вращающиеся составляющие и их изменение во времени ..	59
Рис. 8.19. МДС и магнитное поле простейшей трехфазной обмотки	63
Рис. 8.20. Развернутая схема простейшей трехфазной обмотки – (а) кривые трехфазного тока – (б)	64
Рис. 8.21. Положение силовых линий магнитного поля трехфазной распределенной <i>двух</i> полюсной обмотки	67
Рис. 8.22. Положение силовых линий магнитного поля – (а, б, в) трехфазной распределенной <i>четырёх</i> полюсной обмотки – (г)	68
Рис. 8.23. Развернутые схемы активной части асинхронного двигателя	70
Рис. 8.24. Процесс наведения ЭДС в витке при его движении в магнитном поле	73
Рис. 8.25. Сложение ЭДС в катушечной группе	75
Рис. 8.26. Первая гармоническая ЭДС проводника при скосе пазов – (а); определение ЭДС проводника при скосе пазов – (б)	76
Рис. 8.27. Иллюстрация исключения ν -й гармонической ЭДС проводника при скосе пазов на двойное полюсное деление $2\tau_\nu$	78
Рис. 8.28. Разложение в гармонический ряд кривой магнитного поля в воздушном зазоре машины	81
Рис. 8.29. Силовые линии составляющих магнитных полей рассеяния статора и ротора	86

Введение

Асинхронные машины являются машинами переменного тока. Принцип их действия, как и трансформаторов [7], основан на индуктивной связи между обмотками посредством переменного магнитного поля. В связи с этим в теории трансформатора и асинхронной машины есть схожие разделы. При анализе асинхронной машины, в определенной части, используется теория трансформатора. В учебном пособии проводится сопоставление устройства и физических процессов трансформатора и асинхронной машины [*термин 1*, см. разд. 1, с.13].

В типическом трансформаторе активная часть состоит из единого трехстержневого шихтованного неподвижного магнитопровода на стержнях которого расположены две *сосредоточенные* трехфазные обмотки. Обмотка является сосредоточенной, если все катушки (витки) ее расположены на одной оси. Фазы обмоток U , V и W соединяются по схеме «звезда» (Y), «треугольник» (Δ) или «зигзаг» (Z). Силовые линии основного магнитного поля, замыкаются в магнитопроводе трансформатора по пути с минимальным магнитным сопротивлением, так как отсутствуют явно выраженные воздушные зазоры.

В типической асинхронной машине, *в отличие от трансформатора*, магнитопровод состоит из двух частей: неподвижного цилиндрического статора и *вращающегося* цилиндрического ротора, который находится во внутренней полости (в расточке) статора. Радиальный зазор между статором и вращающимся ротором выполняется минимальным для лучшей магнитной связи между обмотками. В пазах статора расположена трехфазная *пространственно-распределенная* обмотка, фазы U , V и W которой соединяются по схеме «звезда» (Y) или «треугольник» (Δ). Обмотка является распределенной, так как оси катушек не совпадают, то есть, смещены в пространстве.

В пазах шихтованного сердечника ротора может быть размещена обмотка одного из двух типов. Обмотка *первого типа* – это такая же, как и на статоре, трехфазная *пространственно-распределенная* обмотка, соединяемая по схеме «звезда» (Y), начала ее фаз K , L и M подсоединены к трем *контактным кольцам*, неподвижно закрепленным на валу, и вращающимся вместе с ротором. Кольца электрически изолированы друг от друга и от вала. На кольца накладываются неподвижные металлографитные щетки.

К ним подсоединяют на период пуска асинхронного двигателя токоограничивающее пусковое активное сопротивление. Такой *ротор называется фазным*, а машина с ним называется *машиной с фазным ротором*.

Обмотка *другого типа*, располагаемая в пазах ротора, называется *белчьей клеткой*. Для ее изготовления в пазы ротора заливается расплавленный алюминий и после охлаждения в пазах образуются алюминиевые стержни. Одновременно со стержнями отливаются алюминиевые кольца, которые замыкают стержни с торцов. Это и есть *обмотка типа белчья клетка* (рис. 8.3). Такая технология реализуется при изготовлении машин мощностью примерно не более 100 кВт. При больших мощностях клетка изготавливается из медных стержней, вставляемых в пазы сердечника ротора, к которым с торцов привариваются короткозамыкающие кольца. Ротор с белчьей клеткой является *короткозамкнутым*, а машина с ним называется *машиной с короткозамкнутым ротором*. Наиболее распространены асинхронные *машины с короткозамкнутым ротором* (с белчьей клеткой на роторе).

Число пар полюсов p обмоток статора и ротора *всегда должно быть одинаковым*, так как при других соотношениях чисел пар полюсов обмоток может отсутствовать взаимоиндуктивная связь между обмотками статора и ротора (например, при $p = 1$ на статоре и $p = 2$ на роторе) или быть не полной.

Устройство асинхронных машин – наиболее простое по сравнению с синхронными машинами и машинами постоянного тока. Асинхронные машины самые дешевые, а в эксплуатации обслуживание их минимально.

В трансформаторах магнитное поле создается магнитодвижущими силами *сосредоточенных* трехфазных обмоток, расположенных на едином неподвижном магнитопроводе. Основная (первая) гармоника поля *изменяется по периодическому закону во времени* с частотой f_1 тока обмоток, *оставаясь неподвижной в пространстве*. Поле в трансформаторе называется *пульсирующим*.

В асинхронных машинах магнитное поле создается магнитодвижущими силами трехфазных *пространственно-распределенных* обмоток, расположенных на двух разных частях магнитопровода (неподвижный сердечник статора и вращающийся сердечник ротора). Поле в асинхронных машинах, в отличие от трансформаторов, *изменяется по периодическому закону не только во времени, но и в пространстве. Оно является вращающимся*.

Если основная (первая) гармоника магнитного поля асинхронной машины имеет только один период $p = 1$ (то есть только два полюса **N** и **S**), то поле вращается с частотой n_1 , определяемой частотой f_1 тока обмотки статора, $n_1 = f_1$, об/с. Если вращающееся поле имеет больше периодов (например, $p = 2, 3, 4, 5$ или 6), то частота вращения поля будет в p раз меньше, $n_1 = f_1/p$, об/с (или $n_1 = 60f_1/p$, об/мин)*.

При неизменной частоте ($f_1 = 50$ Гц) электросети питающей обмотку статора частота вращения поля постоянна, $n_1 = \text{const}$, и она называется *синхронной частотой вращения*. Ротор вращается с переменной частотой $n = \text{var}$, которая в асинхронном двигателе всегда несколько меньше синхронной частоты вращения n_1 поля, так как только при этих условиях в обмотке ротора индуцируется ЭДС, протекают токи, и создается электромагнитный момент. Значения частоты вращения n_1 магнитного поля двигателей общего назначения при $f_1 = 50$ Гц и различных p приведены в табл. В.1.

Таблица В.1. – Частота вращения магнитного поля двигателей

p	1	2	3	4	5	6	...
n_1 , об/с	50	25	16,6	12,5	10	8,3	...
n_1 , об/мин	3000	1500	1000	750	600	500	...

При частоте 50 Гц скорость вращения ротора асинхронных двигателей обычно лежит в пределах от 500 до 3000 об/мин и зависит от механической нагрузки на валу.

В теории асинхронной машины наряду с понятием абсолютной частоты вращения ротора n , широко используется понятие его относительной частоты вращения, $(n_1 - n)$. Относительную частоту вращения ротора выражают в долях n_1 и называют *скольжением*, $s = (n_1 - n)/n_1$. Из записанного по определению выражения для скольжения s , легко получить формулу для скорости ротора, $n = n_1(1 - s)$. Из нее следует, что частота вращения ротора n и его скольжение s находятся во взаимнообратной связи: при увеличении n скольжение s уменьшается; при уменьшении n скольжение s увеличивается.

В зависимости от частоты вращения n ротора и направления его вращения по отношению к полю (а, следовательно, и от величины и знака скольжения s) различают четыре режима работы асинхронной машины:

1) **двигательный режим** – $0 < n < n_1$ и $1 > s > 0$. Асинхронная машина

преобразует электрическую энергию, поступающую из электросети, в полезную механическую на валу, прилагаемую к рабочему (приводимому) механизму;

2) **генераторный режим** – $n_1 < n < +\infty$ и $0 > s > -\infty$. Асинхронная машина преобразует механическую энергию, подводимую к валу от приводного двигателя, в электрическую энергию, питающую нагрузку;

3) **тормозной режим** – $-\infty < n < 0$ и $+\infty > s > 1$. Используется для быстрого останова двигателя;

4) **трансформаторный режим** – $n = 0$ и $s = 1$. Используется для регулирования амплитуды и фазы напряжения обмотки фазного ротора.

Асинхронные машины используются главным образом в режиме двигателя. Это основной двигатель, применяемый в промышленности, сельском хозяйстве и в быту. Асинхронные двигатели являются приводными двигателями для большинства электроприводов. *Промышленное производство приводится в движение, главным образом, асинхронными двигателями.* Асинхронные двигатели потребляют около половины электроэнергии, вырабатываемой в стране. При этом наибольшее количество электроэнергии потребляют двигатели мощностью до 10 кВт. Предельная мощность асинхронных двигателей – несколько десятков мегаватт. Номинальные напряжения в асинхронных двигателях большой мощности достигают до 10 кВ. В индикаторных системах применяются асинхронные двигатели мощностью от долей ватта до сотен ватт. Асинхронные двигатели выпускаются *единицами сериями* в огромных количествах в большом диапазоне мощностей.

Ярославский электромашиностроительный завод (URL-адрес <http://www.eldin.ru>) освоил выпуск серий RA, АИР и др. (см. разд. 4, с. 20, сл.), охватывающих 3-фазные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором мощностью в диапазоне примерно от 0,55 до 500 кВт, соответствующие международным и российским нормам.

Основная продукция Владимирского электромоторного завода (URL-адрес <http://www.vemp.ru>) – трехфазные асинхронные электродвигатели мощностью от 0,75 до 315 кВт, в диапазоне скоростей от 500 до 3000 об/мин.

На изготовление асинхронных двигателей идет наибольшее количество электротехнической стали и обмоточных проводов. Оптимальное

проектирование асинхронных двигателей, их технико-экономические показатели и рациональная эксплуатация, имеют важное значение для экономики страны. В связи с этим разработаны САПР асинхронных двигателей.

В генераторном режиме асинхронные машины применяются редко. Для создания магнитного поля в асинхронной машине (как и в трансформаторе) необходима реактивная мощность, которая потребляется из сети (ее вырабатывают синхронные машины [8]) или от других источников реактивной мощности (например, батареи конденсаторов). Это одна из особенностей асинхронных машин, которая ограничивает их применение в генераторном режиме.

В трансформаторном режиме фазный ротор асинхронной машины заторможен, но может поворачиваться посредством червячной передачи «вручную» (рис. 14.8) или с помощью вспомогательного двигателя. Если машина с фазным ротором в трансформаторном режиме используется для регулирования величины напряжения, то она называется *индукционным регулятором*. А если она используется для регулирования фазы напряжения, то – *фазорегулятором*. Кроме того, асинхронную машину с заторможенным фазным ротором можно использовать в качестве *регулируемого индуктивного сопротивления*.

Асинхронную машину с фазным ротором можно рассматривать как обобщенный трансформатор, так как в ней может преобразовываться не только вид энергии, но и частота, число фаз, величина напряжения, фаза напряжения.

В *первом – седьмом разделах* учебного пособия приведены выдержки из стандартов, касающиеся терминологии, буквенных обозначений асинхронных машин и их элементов в электрических схемах, обозначений выводов обмоток. Также дана характеристика единых серий асинхронных двигателей и рассмотрены конструктивные исполнения электрических машин.

В *девятом разделе* приведены номинальные данные асинхронных машин, исследуемых в лабораторном цикле.

В *восьмом, десятом – четырнадцатом разделах* приведены основы теории и устройства асинхронных машин; описана последовательность выполнения экспериментальных исследований процессов и явлений, а также обработки результатов: трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (*разд. 10*); трехфазного асинхронного двигателя

с фазным ротором (*разд. 11*); трехфазного асинхронного двигателя в однофазном режиме (*разд. 12*); трехфазного асинхронного генератора (*разд. 13*); трехфазной асинхронной машины с неподвижным ротором (*разд. 14*).

В *списке литературы*, наряду с традиционными источниками, приведены URL-адреса предприятий, производящих электрические машины. Использование интернет-технологий позволит студентам непосредственно ознакомиться с номенклатурой и описанием выпускаемой электротехнической продукции.

Автором учебного пособия разработаны и изготовлены стенды для экспериментального исследования асинхронных машин (рис. В.1). Реализован фронтальный метод проведения работ. Фотографии и описание стендов, разделы настоящего учебного пособия и мультимедиа-материалы, а также учебно-методический комплекс дисциплины «Электрические машины» размещены на web-сайте автора <http://zabudsky.ru>.

***Примечание**

Реально в асинхронной машине существует результирующее магнитное поле, созданное совместным действием МДС обмоток статора и ротора. Величина поля устанавливается в соответствии с магнитным состоянием (насыщением) магнитопровода. Для удобства анализа в Пособии рассматриваются отдельно поле статора и поле ротора (такое представление возможно, если магнитная система линейна).

В магнитном поле асинхронной машины наряду с основной (первой) гармонической составляющей (гармоникой), имеющей наибольшую роль в процессе преобразования энергии, содержатся также высшие гармонические. В Пособии рассматривается основная (первая) гармоническая поля. Анализ проявления высших гармонических оговаривается особо.

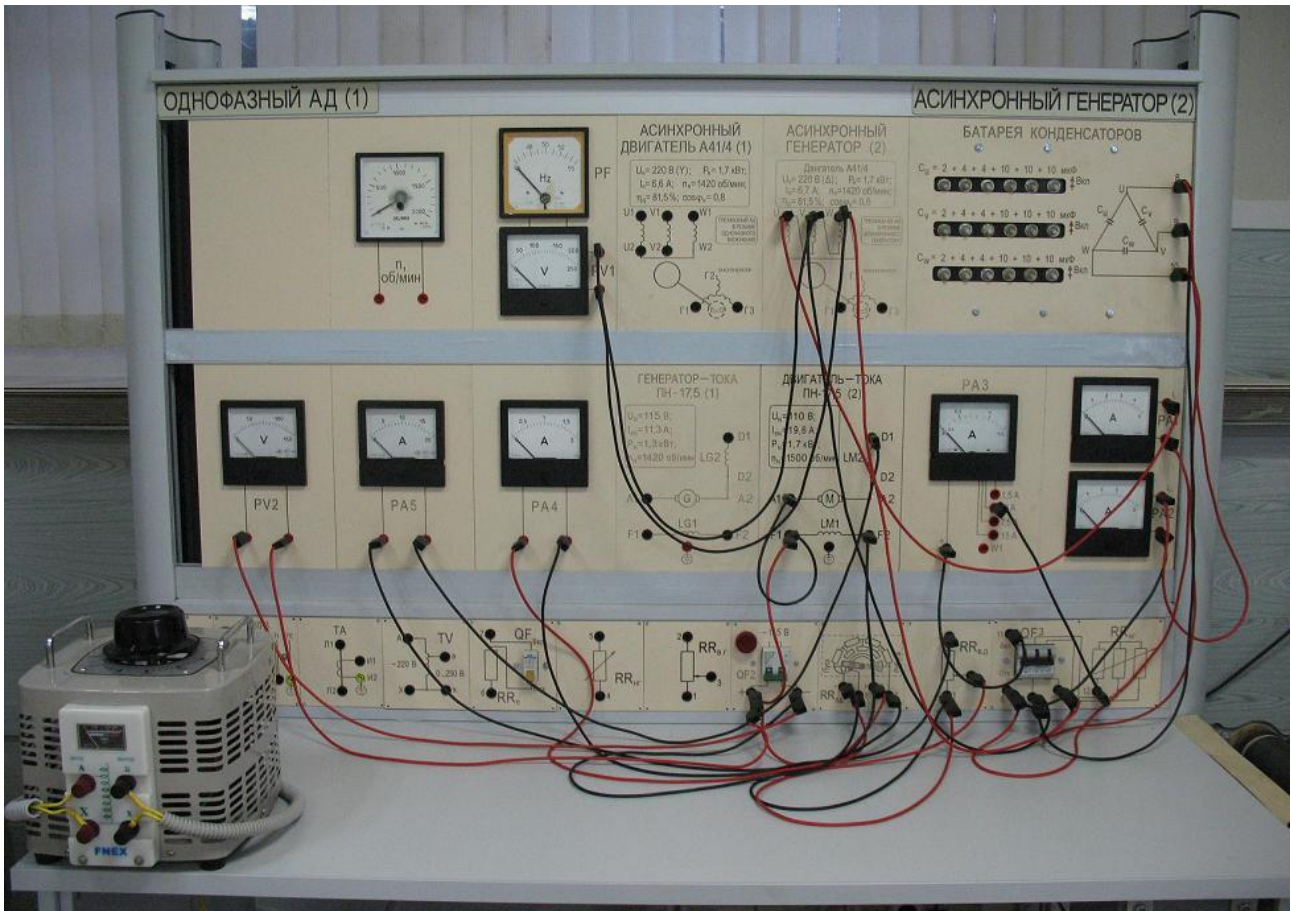


Рисунок В.1. – Приборная панель стенда «Однофазный асинхронный двигатель» и «Асинхронный генератор»

1. Термины и определения

(выдержки из ГОСТ 27471–87 Машины электрические вращающиеся.

Термины и определения)

Термин	Определение
1. Асинхронная машина (60)	Бесколлекторная машина переменного тока, у которой отношение частоты вращения ротора к частоте тока в цепи, подключенной к машине, зависит от нагрузок
2. Асинхронная машина с фазным ротором (61)	Асинхронная машина, у которой обмотка ротора присоединена к контактным кольцам
3. Асинхронная машина с короткозамкнутым ротором (63)	Асинхронная машина, у которой ротор с короткозамкнутой обмоткой в виде беличьей клетки
4. Конденсаторный асинхронный двигатель (71)	Двигатель с расщепленной фазой, у которого в цепь вспомогательной обмотки постоянно включен конденсатор
5. Асинхронный преобразователь частоты (79)	Асинхронная машина с фазным ротором, приводимая во вращение двигателем, предназначенная для преобразования частоты
6. Индукционный регулятор (84)	Индукционным регулятором называется асинхронная машина с фазным ротором, предназначенная для плавного регулирования напряжения переменного тока за счет поворота ротора
7. Асинхронный тахогенератор (91)	Двухфазная асинхронная машина с полым ротором, возбуждаемая однофазным напряжением, амплитуда выходного напряжения которой пропорциональна частоте вращения ротора
8. Статор вращающейся электрической машины (369)	Часть электрической машины, которая включает неподвижный магнитопровод с обмоткой
9. Ротор электрической машины (370)	Вращающаяся часть электрической машины
10. Основной воздушный зазор вращающейся электрической машины (374)	Минимальное расстояние в радиальном направлении между неподвижной и движущейся частями магнитопровода вращающейся электрической машины

Термин	Определение
11. Паз вращающейся электрической машины (377)	Углубление или полость вблизи поверхности магнитопровода статора или ротора вращающейся электрической машины, обращенные к основному воздушному зазору, предназначенные для размещения проводов обмотки
12. Зубец вращающейся электрической машины (378)	Часть магнитопровода между соседними пазами вращающейся электрической машины
13. Контактное кольцо вращающейся электрической машины (379)	Токопроводящее кольцо с расположенными на нем щетками, обеспечивающее протекание тока во вращающейся электрической машине из одной части цепи в другую при помощи скользящего контакта
14. Номинальные данные вращающейся электрической машины (163)	Совокупность числовых значений электрических и механических параметров, обусловленных изготовителем и указанных на табличке, которым удовлетворяет вращающаяся электрическая машина в заданных условиях
15. Магнитная индукция в рабочем зазоре электрической машины (165)	<i>Амплитуда основной гармонической</i> в кривой распределения магнитной индукции в рабочем зазоре в режиме холостого хода при номинальном напряжении вращающейся электрической машины
16. Электрический угол вращающейся машины переменного тока (168)	Произведение значения геометрического угла, образованного двумя полуплоскостями, проходящими через ось вращения вращающейся машины переменного тока, на число пар полюсов
17. Синхронная частота вращения вращающейся машины переменного тока (198)	Частота вращения ротора вращающейся машины переменного тока, равная частоте вращения магнитного поля, определяемой частотой сети и числом ее полюсов
18. Асинхронная частота вращения вращающейся машины переменного тока (199)	Частота вращения ротора вращающейся машины переменного тока, отличающаяся от частоты вращения магнитного поля, участвующего в основном процессе преобразования энергии

Термин	Определение
19. Скольжение ротора машины переменного тока (202)	Разность между синхронной частотой вращения магнитного поля и частотой вращения ротора, выраженная в относительных единицах или в процентах от синхронной частоты вращения
20. Механическая характеристика электродвигателя (146)	Зависимость вращающего момента от частоты вращения ротора вращающегося электродвигателя при неизменных напряжении, частоте тока питающей сети и внешних сопротивлениях в цепях обмоток двигателя
21. Рабочие характеристика вращающегося электродвигателя переменного тока (149)	<i>Зависимости</i> подводимой мощности, тока в обмотке якоря, частоты вращения, коэффициента полезного действия и коэффициента мощности вращающегося электродвигателя переменного тока <i>от полезной мощности на валу</i> при неизменных напряжении и частоте напряжения питающей сети и внешних сопротивлениях в цепях обмоток
22. Рабочие характеристика вращающегося электромашиного генератора переменного тока (148)	<i>Зависимости</i> генерируемой мощности, тока в обмотке якоря, напряжения на выводах обмотки якоря, коэффициента полезного действия и коэффициента мощности электромашиного генератора <i>от полезной мощности на валу</i> при неизменных частоте вращения и токе возбуждения
23. Круговая диаграмма асинхронной машины (150)	Геометрическое место концов векторов токов вращающейся машины переменного тока при ее работе в разных режимах
24. Прямой пуск вращающегося электродвигателя (299)	Пуск вращающегося электродвигателя путем непосредственного подключения его к питающей сети
25. Пуск вращающегося электродвигателя переменного тока при пониженном напряжении (300)	Пуск вращающегося электродвигателя переменного тока путем переключения со звезды на треугольник или с последовательного на параллельное включение фаз обмотки, или применения автотрансформатора, реактора, пускового реостата
26. Частотный пуск вращающегося электродвигателя (301)	Пуск вращающегося электродвигателя переменного тока с подачей питания от источника со значительно пониженной частотой, постепенно повышаемой по мере разворачивания двигателя

Термин	Определение
27. Начальный пусковой ток асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (177)	Максимальный действующий ток, потребляемый заторможенным асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором при питании от питающей сети с номинальным значением напряжения и частоты. Примечание. Эта величина является расчетной без учета переходных явлений
28. Начальный пусковой момент асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором (178)	Минимальный измеренный момент, развиваемый асинхронным двигателем с короткозамкнутым ротором в заторможенном состоянии при номинальных значениях напряжения и частоты питающей сети
29. Максимальный момент асинхронного вращающегося двигателя (184)	Наибольший вращающий момент, который может развивать асинхронный вращающийся двигатель при работе с номинальными значениями напряжения и частоты питающей сети
30. Критическое скольжение асинхронной машины (203)	Скольжение асинхронной машины, при котором она развивает максимальный вращающий момент
31. Правое направление вращения вращающейся электрической машины (313)	Направление вращения <i>по часовой стрелке</i> вращающейся электрической машины с односторонним приводом, определяемое со стороны присоединения ее к первичному двигателю или рабочему механизму
32. Статическая устойчивость асинхронной машины (306)	Способность асинхронной машины сохранять устойчивую работу при плавном нарушении ее установившегося состояния
33. Динамическая устойчивость асинхронной машины (307)	Способность асинхронной машины сохранять устойчивую работу после колебания частоты вращения, вызванного внезапным нарушением ее установившегося состояния
34. Возбуждение вращающейся электрической машины (317)	Создание магнитного потока во вращающейся электрической машине током в какой-либо из ее обмоток или постоянными магнитами

Примечание. В круглых скобках указан номер термина согласно ГОСТ 27471–87.

2. Буквенные обозначения элементов в электрических схемах

(выдержки из ГОСТ 2.710–81 Обозначения буквенные цифровые
в электрических схемах)

Код элемента	Виды элементов
M	Двигатели
G	Генераторы
LG	Обмотка возбуждения генератора
LE	Обмотка возбуждения возбудителя
LM	Обмотка возбуждения электродвигателя
GE	Возбудитель генератора
XA	Токосъемник, контакт скользящий
LR	Реактор
QF	Выключатель автоматический в силовых цепях
QS	Разъединитель
RR	Реостат
PA	Амперметр
PF	Частотомер
PV	Вольтметр
PW	Ваттметр
PS	Регистрирующий прибор
HL	Прибор световой сигнализации

3. Обозначение выводов обмоток электрических машин переменного тока, разработанных после 1.01.1987 года

(Выдержки из ГОСТ 26772–85 Машины электрические вращающиеся.

Обозначение выводов и направления вращения)

Наименование и схема соединения	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение выводов	
			Начало	Конец
Обмотка статора: открытая схема	6	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	U1 V1 W1	U2 V2 W2
соединение в звезду	3 или 4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Точка звезды	U V W N	
соединение в треугольник	3	Первый вывод Второй вывод Третий вывод	U V W	
Обмотка фазного ротора асинхронного двигателя: открытая схема	6	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	K1 L1 M1	K2 L2 M2
соединение в звезду	3 или 4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Точка звезды	K L M Q	
соединение в треугольник	3	Первый вывод Второй вывод Третий вывод	K L M	
Обмотка возбуждения синхронных машин	2	–	F1	F2

**Обозначение выводов обмоток электрических машин
переменного тока, разработанных до 1.01.1987 г.
и модернизируемых**

(Выдержки из ГОСТ 26772–85 Машины электрические вращающиеся.
Обозначение выводов и направления вращения)

Наименование и схема соединения	Число выводов	Наименование фазы или вывода	Обозначение выводов	
			Начало	Конец
Обмотка статора (якоря): открытая схема	6	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	С1 С2 С3	С 4 С 5 С 6
соединение в звезду	3 или 4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза Нулевая точка	С1 С2 С3 0	
соединение в треугольник	3	Первый вывод Второй вывод Третий вывод	С1 С2 С3	
Обмотка фазного ро- тора асинхронного двигателя	3 или 4	Первая фаза Вторая фаза Третья фаза	Р1 Р2 Р3	
Обмотка возбуждения синхронных машин	2	—	И1	И2

4. Единые серии асинхронных двигателей.

Обозначение типа двигателей

Асинхронные двигатели имеют *массовое* распространение в мировой и отечественной практике. Они потребляют около половины вырабатываемой электрической энергии.

Современные асинхронные электрические машины общепромышленного назначения производятся во всем мире в виде *серий*, объединенных общностью конструктивного исполнения и условий работы при строгой нарастающей *взаимосвязи мощностей с высотами оси вращения* и предназначенных для широкого ряда потребителей.

В России асинхронные двигатели, изготавливаемые на различных электромашиностроительных заводах, разбиты на ряд серий, охватывающих отдельные интервалы номинальных мощностей. В каждой серии проводится *типизация, стандартизация и унификация установочных размеров* асинхронных двигателей. Наиболее распространены двигатели мощностью от 0,06 до 100 кВт.

Начиная с 1950 г. в РФ асинхронные двигатели выпускаются в виде единых серий.

Первая единая серия предусматривала двигатели двух конструктивных исполнений: *защищенное* исполнение (обозначение А) и *закрытое обдуваемое* (обозначение АО) (см. разд. 7.1, с. 28, сл.). Серия включает двигатели 14 типоразмеров со шкалой мощностей: 0,4; 0,6; 1,0; 1,7; 2,8; 4,5; 7; 10; 14; 20; 28; 40; 55; 75; 100 и 125 кВт. Номинальные напряжения двигателей 127, 220, 380 и 500 В.

Первая единая серия состоит из двигателей семи габаритов от 3 до 9-го (*габарит определяется внешним диаметром сердечника статора*). Двигатели всех габаритов изготавливаются с чугунной станиной и подшипниковыми щитами. Каждый габарит соответствует при данной синхронной частоте вращения двум номинальным мощностям и имеет две длины сердечника.

Двигатели 3 и 4-го габаритов *закрытого обдуваемого* исполнения изготавливаются также со станиной и подшипниковыми щитами из алюминиевого сплава; их обозначение – АОЛ.

В станину двигателей *защищенного* исполнения охлаждающий воздух входит через отверстия в подшипниковых щитах и выходит через боковые

отверстия в станине, которые защищены от попадания внутрь машины капель воды, падающих под углом 45° к вертикали.

В *закрытых обдуваемых* двигателях станина имеет снаружи продольные ребра для увеличения внешней поверхности охлаждения.

Двигатели А и АО, помимо основного исполнения (двигатели общего применения с короткозамкнутым ротором), имеют следующие модификации:

1) двигатели короткозамкнутые с повышенным начальным пусковым моментом (АП и АОП),

2) двигатели короткозамкнутые с повышенным скольжением (АС и АОС),

3) двигатели короткозамкнутые многоскоростные на две, три и четыре синхронные скорости вращения,

4) двигатели короткозамкнутые с повышенными значениями коэффициента полезного действия и коэффициента мощности для текстильной промышленности (АОТ),

5) двигатели с фазным ротором (АК),

6) двигатели короткозамкнутые для встраивания в корпуса станков и механизмов (АВ).

Примеры обозначения типа двигателей:

1) тип двигателя А71-8. Трехфазный асинхронный двигатель *защищенного* исполнения (буква А) с короткозамкнутым ротором, седьмого габарита (цифра 7), первый порядковый номер длины сердечника (цифра 1), восемь полюсов (цифра 8). Мощность этого двигателя – 10 кВт;

2) тип двигателя АО62-6. Трехфазный асинхронный двигатель *закрытого обдуваемого* исполнения (буквы АО) с короткозамкнутым ротором, шестого габарита (цифра 6), второй порядковый номер длины сердечника (цифра 2), шесть полюсов (цифра 6). Мощность этого двигателя – 10 кВт;

3) тип двигателя АК51-4. Трехфазный асинхронный двигатель *защищенного* исполнения (буква А) с фазным ротором (буква К), пятого габарита (цифра 5), первый порядковый номер длины сердечника (цифра 1), четыре полюса (цифра 4). Мощность этого двигателя – 2,8 кВт ([этот двигатель исследуется в Л. Р. № 2](#)).

Вторая единая серия трехфазных асинхронных двигателей выпускалась с 1960 г. Она предусматривала двигатели двух конструктивных ис-

полнений: *защищенное* исполнение (обозначение А2) и *закрытое обдуваемое* (обозначение АО2)*. Число типоразмеров двигателей второй серии увеличено до 18 со шкалой мощностей: 0,4; 0,6; 0,8; 1,1; 1,5; 2,2; 3; 4; 5,5; 7,5; 10; 13; 17; 22; 30; 40; 55; 75; 100 и 125 кВт. Номинальные напряжения двигателей 220, 380 и 500 В.

Основным исполнением второй серии является *закрытое обдуваемое*, более удобное и надежное в эксплуатации.

Другими отличиями второй серии являются:

- 1) повышенные энергетические показатели (КПД и коэффициент мощности);
- 2) меньший вес на единицу мощности;
- 3) меньшие габаритные размеры;
- 4) *соответствие установочных размеров рекомендациям Международной электротехнической промышленности (МЭК)*;
- 5) большая эксплуатационная надежность вследствие применения в двигателях высокопрочных синтетических изоляционных материалов и цементирующих лаков;
- 6) большие эксплуатационные удобства в связи с возможностью размещения выводов устройства с любой боковой стороны корпуса двигателя.

Двигатели серии А2 и АО2 имели практически те же модификации, что и двигатели серии А и АО. Кроме того, вторая серия предусматривала изготовление двигателей следующих специализированных исполнений:

- 1) малошумных; 2) встраиваемых в рабочие механизмы; 3) повышенной частоты (до 400 Гц); 4) тельферных; 5) рудничных; 6) со встроенным тормозом; 7) для работы в тропических условиях; 8) влагостойких; 9) морозостойких; 10) химически стойких.

Обозначение типа двигателей второй серии отличается от обозначения типа первой серии наличием цифры 2 после буквы А или букв АО, например, двигатель типа АО2-62-8.

Единая серия 4А трехфазных асинхронных двигателей выпускалась с 1972 г. Основная серия асинхронных машин 4А включает в себя двигатели от 0,4 до 400 кВт. В этой серии 17 габаритов, число ступеней мощности составляет 33, высоты осей вращения 50 – 355 мм.

Помимо основного исполнения в серии 4А имеется целый ряд специализированных исполнений: тропическое, химическое, на частоту 60 Гц,

сельскохозяйственное, текстильное и др. Выпускают двигатели с повышенным пусковым моментом, повышенным скольжением, малошумные, многоскоростные и встраиваемые.

Выпускаются двигатели специализированные по конструкции: с встроенным электромагнитным тормозом, температурной защитой, с повышенной точностью по установочным размерам, малошумные, высокоточные и др.

В основном исполнении двигатели выполняются с короткозамкнутым ротором и предназначены для применения в условиях умеренного климата. Двигатели изготавливаются двух разновидностей по степени защиты и способу охлаждения: защищенные (обозначение IP23) и закрытые обдуваемые (обозначение IP44) (см. разд. 7.1, с. 28, сл.).

Двигатели исполнения IP44 защищены от попадания внутрь их брызг любого направления и предметов диаметром более 1 мм, имеют внешний обдув вентилятором.

Двигатели исполнения IP23 защищены от возможности соприкосновения пальцев рук и предметов диаметром более 12,5 мм с токоведущими и вращающимися частями машины. Это исполнение предусматривает защиту от попадания внутрь машины капель, падающих под углом 60° к вертикали.

Обозначение типа двигателей серии 4А расшифровывается следующим образом: 4 – порядковый номер серии, А – асинхронный, Н – исполнение по способу защиты от окружающей среды (Н – *защищенное*, отсутствие буквы – *закрытое обдуваемое*). Следующая буква – обозначение исполнения ротора (К – ротор фазный, отсутствие буквы – ротор короткозамкнутый), затем – исполнение двигателя по материалу станины и щитов (А – станина и щиты алюминиевые, отсутствие буквы – станина и щиты чугунные). Далее указывается высота центров вала, за ней установочный размер, число полюсов и климатическое исполнение и категория размещения.

Например, тип 4АА63А6У3 – асинхронный двигатель серии 4А, закрытое обдуваемое исполнение со станиной и щитами из алюминия, с высотой оси вращения 63 мм, магнитопровод первой длины шестиполюсный, для районов умеренного климата, третьей категории размещения.

Унифицированная серия АИ (асинхронная Интерэлектро) асинхронных двигателей создана в 1982 г. Двигатели серии имеют высоты оси

вращения от 50 мм до 355 мм мощностью 0,025–315 кВт на напряжение 220/380; 380/660 В частотой 50 Гц.

Увязка мощностей двигателей серии с установочными размерами принята в двух вариантах: первый вариант соответствует нормам РФ и двигатели обозначаются символами АИР, второй вариант соответствует нормам CENELEK (Европейский комитет по координации электротехнических стандартов) и двигатели обозначаются символами АИС.

По пусковым характеристикам серия электродвигателей соответствует рекомендациям МЭК (Международная электротехническая комиссия).

У двигателей серии АИ по сравнению с серией 4А выше КПД, надежность, снижена материалоемкость, уменьшены шумы и вибрация.

В агропромышленном комплексе наряду с двигателями основной модификации применяются двигатели сельскохозяйственной модификации (обозначение – С(СХ)), в том числе: сельскохозяйственные (габариты 56–200); для птицеводческих помещений (габариты 80, 90); химостойкие (габариты 71–250); влагоморозостойкие (габариты 112–355); пылезащитные (габариты 50–63; 112–250); для холодного климата (габариты 71–250). Габарит соответствует высоте оси вращения, измеренной в мм.

Пример обозначения типа двигателей серии АИ. Тип двигателя АИР 112М-4. Серия асинхронных электродвигателей, унифицированная среди стран-членов Интерэлектро (буквы АИ), увязка мощности с установочным размером по нормам РФ (буква Р), высота оси вращения – 112 мм (габарит), установочный размер по длине станины – средняя станина (буква М), число полюсов – 4.

Серия 5А асинхронных двигателей выпускается Владимирским электромоторным заводом (г. Владимир, URL-адрес – <http://www.vemp.ru>). Основная продукция ВЭМЗ – трехфазные асинхронные электродвигатели мощностью от 0,75 до 315 кВт, в диапазоне скоростей от 500 до 3000 об/мин. В двигателях серии применяются облегченные корпуса из высокопрочных алюминиевых сплавов. Для повышения КПД применяется холоднокатаная изотропная электротехническая сталь марки 2212, не требующая отжига после штамповки и имеющая меньшие удельные потери. Применение подшипников с постоянно заложеной смазкой и улучшен-

ными акустическими характеристиками повышает надежность двигателей и снижает уровень шума.

Серия RA (Российская асинхронная) охватывает двигатели от 0,55 до 500 кВт на высотах оси вращения $H = 71-355$ мм, соответствующие международным и российским нормам. Двигатели серий RA, АИР и др. выпускаются Ярославским электромашиностроительным заводом (г. Ярославль, URL-адрес – <http://www.eldin.ru>).

* В целях обеспечения сельского хозяйства двигателями, отвечающими специфическим условиям эксплуатации, с 1967 г. была начата разработка еще одной модификации серии АО2, а именно трехфазных асинхронных двигателей сельскохозяйственного назначения мощностью до 22 кВт включительно (обозначение АО2-сх). Двигатели должны быть надежными и в то же время простыми в эксплуатации, иметь химовлагоморозостойкую изоляцию, допускать надежную работу при понижении напряжения сети.

Наряду с трехфазными в сельском хозяйстве находят также применение однофазные асинхронные двигатели и двигатели ряда специальных типов: погружные водозаполненные трехфазные асинхронные двигатели для привода погружных центробежных насосов, трехфазные асинхронные двигатели для привода машинок для стрижки овец и др.

5. Механизмы сельскохозяйственного назначения с электродвигателями к ним

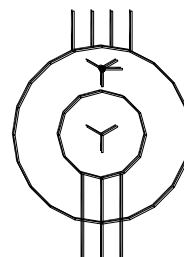
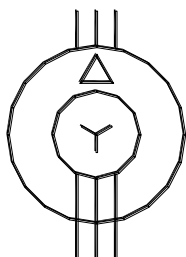
Механизм	Асинхронный электродвигатель	
	Мощность, кВт	Частота вращения, об/мин
Машина для очистки кормов от металлических частиц	0,27	1400
Вентилятор для помещений животноводческих ферм	0,6	1410
Корнеклубнемойка МП-2,2	0,6	1410
Корнерезка РКР-2	1	1410
Ковшевой транспортер ТК-О	1,7	1420
Жмыходробилка ДЖ-0,5	1	1410
Вертикальный смеситель кормов	1	930
Маслоизготовитель МИ-50 и сепаратор «Урал»	0,6	1410
Сепаратор «Звезда-М»	0,6	1410
Сепаратор «Волга»	0,6	1410
Машинка для стрижки овец	0,125	2800

Для работы в средах повышенной влажности в птицеводческих помещениях и на животноводческих фермах выпускаются электродвигатели климатического исполнения У2, которые отличаются от двигателей основного исполнения У3 влаго- и морозостойкой изоляцией и защитными покрытиями.

6. Условные графические обозначения асинхронной машины в схемах

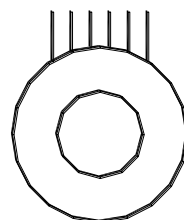
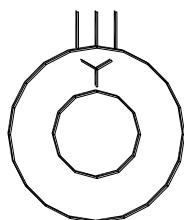
(выдержки из ГОСТ 2.722–68. Единая система конструкторской документации.
Обозначения условные графические в схемах. Машины электрические)

1. Машина асинхронная трёхфазная:



1.1. С фазным ротором, обмотка которого соединена в звезду; обмотка статора соединена в треугольник;

1.2. С фазным ротором, обмотка которого соединена в звезду; обмотка статора соединена в звезду с выведенной нейтральной точкой;



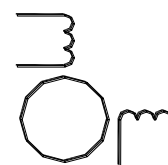
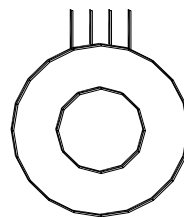
1.3. С короткозамкнутым ротором; обмотка статора соединена в звезду;

1.4. С короткозамкнутым ротором; с шестью выведенными концами фаз обмотки статора

2. Машина асинхронная двухфазная с короткозамкнутым ротором:

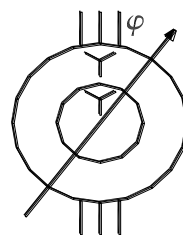
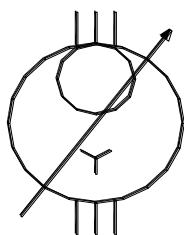
2.1. Форма I;

2.2. Форма II;



3. Индукционный регулятор

4. Фазорегулятор



7. Конструктивные исполнения электрических машин

Конструктивные исполнения электрических машин определяются: 1) степенью защиты от внешних воздействий; 2) способами охлаждения; 3) способами монтажа, а также воздействием климатических факторов окружающей среды и категорией мест размещения электрических машин при эксплуатации.

7.1. Степени защиты от внешних воздействий (IP – International Protection)

Степени защиты электрических машин для обслуживающего персонала и от попадания внутрь твердых тел и воды регламентированы ГОСТ IEC 60034–5–2011. Условное обозначение степени защиты состоит из двух букв **IP** (начальные буквы английских слов **I**nternational **P**rotection) и двух цифр. *Первая цифра* обозначает степень защиты персонала от соприкосновения с токоведущими и вращающимися частями и от попадания внутрь машины твердых тел; *вторая цифра* обозначает степень защиты от проникновения воды внутрь машины.

По степени защиты персонала от соприкосновения с токоведущими и движущимися частями, находящимися внутри машины, и попадания посторонних тел внутрь машины, а также степени защиты от проникновения воды внутрь машины имеются следующие исполнения.

1. Машина открытая электрическая (IP00).
2. Машина, защищенная от прикосновения и попадания посторонних предметов (IP10, IP20).
3. Машина, защищенная от капель воды (IP01), от прикосновения и попадания посторонних предметов (IP11, IP21, IP12, IP22, IP13, IP23, IP43).
4. Машина, защищенная от брызг, прикосновения и попадания посторонних предметов (IP44, IP54).
5. Машина, защищенная от водяных струй, прикосновения, попадания посторонних предметов и отложений пыли (IP55).
6. Машина, защищенная от захлестывания морской волной на палубе корабля, прикосновения, попадания посторонних предметов и отложений пыли (IP56).
7. Машина, защищенная от проникновения воды внутрь при кратковременном погружении в воду (IP57).

8. Машина, защищенная от проникновения воды внутрь при неограниченно длительном погружении в воду (IP58).

Опытом проектирования и эксплуатации электрических машин определена *увязка способов защиты со способами охлаждения* электрических машин (см. разд. 7.2). Например, в машинах защищенного исполнения IP22 и IP23 обычно применяют способ охлаждения IC01, а для закрытых машин IP44, IP54 и IP55 – способ охлаждения IC0141. Но как для машин защищенного, так и для закрытого исполнений возможно применение независимой (принудительной) вентиляции.

ГОСТ 18311–80 «Изделия электротехнические. Термины и определения основных понятий», определяет следующие термины применительно к видам защиты электрических машин.

Открытая электрическая машина – машина, не защищенная оболочкой от прикасания к ее частям, находящимся под напряжением, опасным движущимся частям и от попадания внутрь посторонних предметов, жидкости и пыли.

Защищенная электрическая машина – машина, снабженная оболочкой для защиты от прикасания к ее частям, находящимся под напряжением, опасным движущимся частям и от попадания внутрь посторонних предметов, жидкости и пыли.

Закрытая электрическая машина – защищенная машина, выполненная с такой оболочкой, что возможность сообщения между ее внутренним пространством и окружающей средой может иметь место только через неплотности соединения частей машины.

Пылезащищенная электрическая машина – защищенная машина, выполненная так, что исключается попадание внутрь ее оболочки пыли в количестве, вызывающем нарушение работы машины.

Герметичная электрическая машина (водонепроницаемая, газонепроницаемая) – защищенная машина, выполненная с такой оболочкой, что практически исключена возможность сообщения между ее внутренним пространством и окружающей средой.

Водозащищенная электрическая машина – защищенная машина, выполненная так, что при обливании ее водой исключается попадание воды внутрь оболочки в количестве, вызывающем нарушение работы машины.

Взрывозащищенная электрическая машина – защищенная машина специального назначения, выполненная таким образом, что устранена или затруднена возможность воспламенения окружающей ее взрывоопасной среды вследствие эксплуатации этой машины.

Погружная электрическая машина – машина специального назначения, предназначенная для эксплуатации в условиях погружения в жидкость.

7.2. Способы охлаждения (IC – International Cooling)

По способам охлаждения электрические машины разделяют на два вида: машины с естественным охлаждением и машины с искусственным охлаждением.

Естественное охлаждение электрических машин. Эти машины не имеют вентиляторов или каких-либо других устройств, способствующих охлаждению машины. Охлаждение происходит естественным путем за счет теплопроводности и конвекции.

Теплопроводность – это передача теплоты внутри твердого тела от более нагретых к менее нагретым слоям. Например, пазовые части обмотки статора, нагреваясь, передают теплоту через слои пазовой изоляции в сердечник. Через места крепления сердечника теплота передается в корпус статора.

Конвекция состоит в том, что частицы газа (воздуха), соприкасающиеся с поверхностью нагретого тела (лобовые части обмоток, сердечники, корпус), нагреваются, становятся легче и поднимаются вверх, уступая место менее нагретым частицам, и т. д. Таковую конвекцию называют *естественной*. Во вращающейся машине имеет место еще и *искусственная* конвекция, обусловленная вращением ротора, который создает принудительную циркуляцию газа (воздуха), что усиливает эффект конвекции внутри машины.

Искусственное охлаждение электрических машин. В этих машинах применяют специальное устройство, обычно вентилятор, создающий направленное движение газа, охлаждающего нагретые части машины. Значительную группу машин с искусственным охлаждением составляют машины с самовентиляцией, у которых вентилятор закреплен на собственном валу машины; в процессе работы он, вращаясь, создает аэродинамический напор.

Самовентиляция может быть *наружной* и *внутренней*. При *наружной самовентиляции воздухом* обдувается внешняя поверхность корпуса статора. Машина в этом случае имеет *закрытое исполнение с ребристой поверхностью* (для увеличения поверхности охлаждения).

При *внутренней самовентиляции* в корпусе и подшипниковых щитах машины делают специальные отверстия, через которые воздух из окружающей машину среды проникает внутрь машины, охлаждает ее, а затем выбрасывается наружу. На валу машины закреплен центробежный вентилятор. Вращаясь вместе с валом машины, он затягивает через отверстие в правом подшипниковом щите воздух, создавая внутри машины аэродинамический напор, под действием которого воздух прогоняется через внутреннюю полость машины. Воздух проходит через вентиляционные каналы, зазор и межполюсное пространство (при явнополюсной конструкции машины). При этом он «омывает» нагретые части машины и отбирает у них теплоту и нагретым выходит через специальные отверстия (жалюзи) в левом подшипниковом щите со стороны, противоположной вентилятору. Для более эффективного охлаждения в магнитопроводе некоторых электрических машин делают вентиляционные каналы, через которые проходит охлаждающий газ. Вентиляционные каналы называют *аксиальными*, если они расположены параллельно оси машины, и *радиальными*, если они расположены перпендикулярно этой оси (рис. 7.1). Вентиляцию, при которой охлаждающий газ перемещается вдоль оси машины, называют *аксиальной*, если же газ перемещается перпендикулярно оси машины по радиальным каналам, то вентиляцию называют *радиальной*.

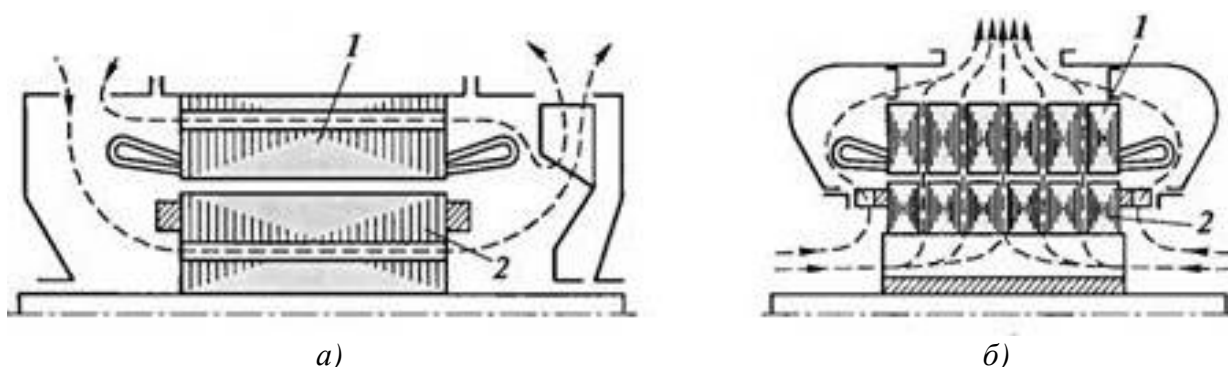


Рисунок 7.1. – Аксиальная (а) и радиальная (б) системы вентиляции:
 1 – статор; 2 – ротор

Радиальные вентиляционные каналы получаются делением общей длины сердечника на пакеты по 40–60 мм. Между пакетами оставляют промежутки по 10 мм, которые и являются радиальными каналами. Иногда в машинах применяют *радиально-аксиальную* вентиляцию.

В двигателях с регулировкой частоты вращения «вниз» от номинальной при малой частоте вращения самовентиляция становится малоэффективной, что ведет к чрезмерному перегреву машины. Поэтому в таких двигателях целесообразно применение независимой вентиляции, когда вентилятор имеет собственный привод (частота вращения последнего не зависит от режима работы машины).

Обозначение способов охлаждения. Все способы охлаждения электрических машин принято обозначать буквами **IC**, являющимися начальными буквами английских слов **I**nternational **C**ooling, остальные буквы и цифры обозначают способ охлаждения машины.

Сначала указывается буква, обозначающая вид хладагента: А – воздух, Н – водород, W – вода и т. д. Если хладагентом является только воздух, то буква опускается. Затем идет несколько цифр.

Первая цифра условно обозначает устройство цепи охлаждения для циркуляции хладагента, например, воздуха. *Вторая цифра* обозначает способ перемещения хладагента.

Если машина имеет несколько цепей охлаждения (например, внутренняя вентиляция и наружный обдув), то в обозначении может быть четыре цифры:

две – для обозначения наружной цепи охлаждения и две – для внутренней.

Примеры некоторых наиболее применяемых способов охлаждения электрических машин с разомкнутой системой охлаждения:

IC01 – защищенная машина с внутренней самовентиляцией, вентилятор расположен на валу машины;

IC31 – защищенная машина с самовентиляцией, вентилятор расположен на валу машины, воздух поступает в машину и удаляется из нее с помощью подводящей и отводящей труб;

IC37 – защищенная машина с принудительной вентиляцией, воздух поступает в машину и удаляется из нее с помощью подводящей и отводящей труб, вентилятор приводится во вращение отдельным двигателем;

IC0040 – закрытая машина с естественным охлаждением без внешнего вентилятора;

IC0141 – закрытая машина с самовентиляцией, ребристая или гладкая поверхность станины обдувается снаружи внешним вентилятором, расположенным на валу машины.

7.3. Способы монтажа электрических машин (IM – International Mounting)

Монтаж электрических машин определяет способ крепления электрической машины в месте ее установки и способ ее сочленения с рабочим механизмом. Монтаж машин в большинстве случаев осуществляется на лапах или посредством фланцев. При этом возможно горизонтальное или вертикальное расположение вала машины. Разновидности конструктивного исполнения электрических машин по способу монтажа определяются ГОСТ 2479–79. Условное обозначение исполнения машины по способу монтажа состоит из букв **IM** (начальные буквы слов **I**nternational **M**ounting) и четырех цифр.

Первая цифра обозначает группу конструктивного исполнения. Например, группа – на лапах с подшипниковыми щитами; группа – без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на станине и др.

Вторая и третья цифры обозначает способ монтажа: пространственное положение машины и направление выступающего конца вала, причем если третья цифра 8, то машина может работать при любом пространственном положении вала.

Четвертая цифра обозначает количество и форму исполнения выступающих концов вала. Например, – без выступающего конца вала; – с одним выступающим концом вала цилиндрической формы; – с двумя выступающими концами вала цилиндрической формы и др.

Примеры наиболее распространенных видов исполнения электрических машин по способу монтажа:

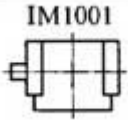
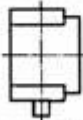
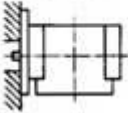
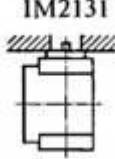
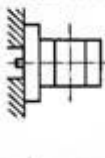
IM1001 – машина на лапах с фланцем, доступным с обратной стороны, на одном подшипниковом щите и с одним коническим концом вала.

IM2003 – машина на лапах с двумя подшипниковыми щитами и одним цилиндрическим концом вала.

IM3011 – машина с двумя подшипниковыми щитами, с фланцем, доступным с обратной стороны, опорная плоскость фланца обращена к стороне выступающего цилиндрического конца вала.

В табл. 7.1 показаны наиболее распространенные виды конструктивных исполнений электрических машин с разными способами их монтажа и крепления.

Таблица 7.1. – Виды конструктивных исполнений электрических машин

Группа исполнения	Конструктивное исполнение	Обозначение
IM1 – машины на лапах с подшипниковыми щитами	С двумя подшипниковыми щитами, на лапах, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM1001 
	То же, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным в низ	IM1011 
IM2 – машины на лапах с подшипниковыми щитами, с фланцем на подшипниковом щите (или щитах)	На лапах, с фланцем на одном подшипниковом щите, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM2001 
	На лапах, с фланцем на одном подшипниковом щите, не доступным с обратной стороны, вал вертикальный с цилиндрическим концом, направленным вверх	IM2131 
IM3 – машины без лап с подшипниковыми щитами, с фланцем на одном подшипниковом щите (или щитах)	С двумя подшипниковыми щитами, с фланцем на стороне выступающего конца вала, доступным с обратной стороны, вал горизонтальный с цилиндрическим концом	IM3001 

7.4. Климатическое исполнение двигателей

На надежность электрических машин при их эксплуатации значительное влияние оказывают климатические условия внешней среды (ГОСТ 15150–69), к которым относятся: температура и диапазон ее колебания, относительная влажность, атмосферное давление, солнечная радиация, дождь, ветер, пыль, соляной туман, иней, действие плесневых грибов, содержание в окружающей среде коррозионно-активных материалов. Кли-

матическое исполнение двигателей обозначается буквами (табл. 7.2), а категории размещения электрических машин цифрами (табл. 7.3).

Электрические машины общего назначения обычно предназначены для работы на высоте над уровнем моря до 1000 м.

Таблица 7.2. – Условные обозначения климатического исполнения электрических машин

Условное обозначение	Характеристика климатического исполнения
Электрические машины, предназначенные для эксплуатации на суше, реках, озерах в макроклиматических районах	
У	С умеренным климатом
ХЛ	С холодным климатом
УХЛ	С умеренным и холодным климатом
ТВ	С влажным тропическим климатом
ТС	С сухим тропическим климатом
Т	С сухим и влажным тропическим климатом
О	Для всех макроклиматических районов на суше (общеклиматическое исполнение)
Электрические машины, предназначенные для эксплуатации в макроклиматических районах с морским климатом	
М	С умеренно-холодным морским климатом
ТМ	С морским тропическим климатом, в том числе и на судах каботажного плавания
ОМ	На судах неограниченного района плавания
В	Для всех макроклиматических районов на суше и на море

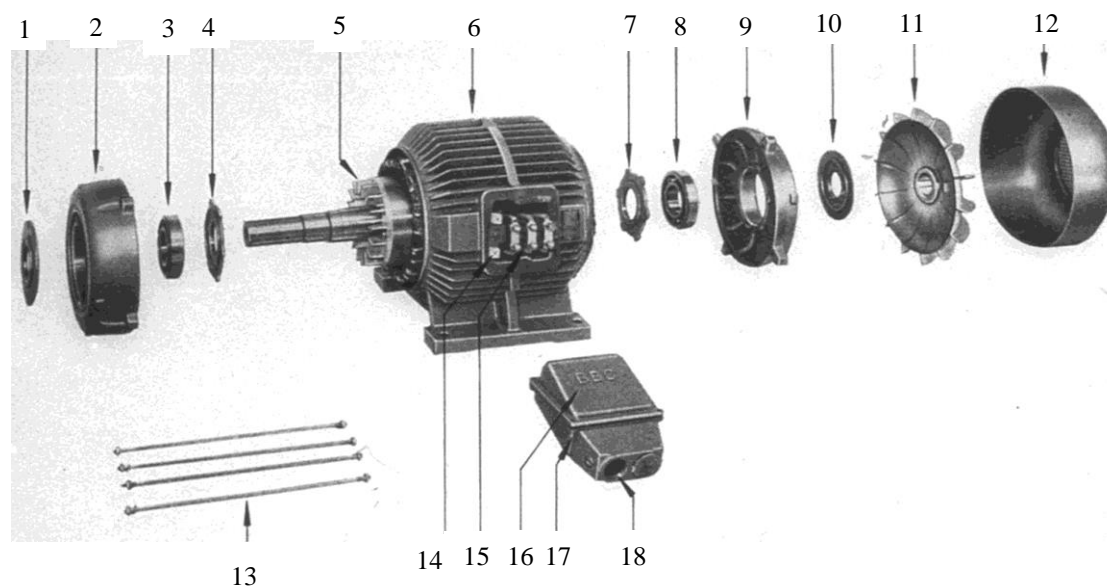
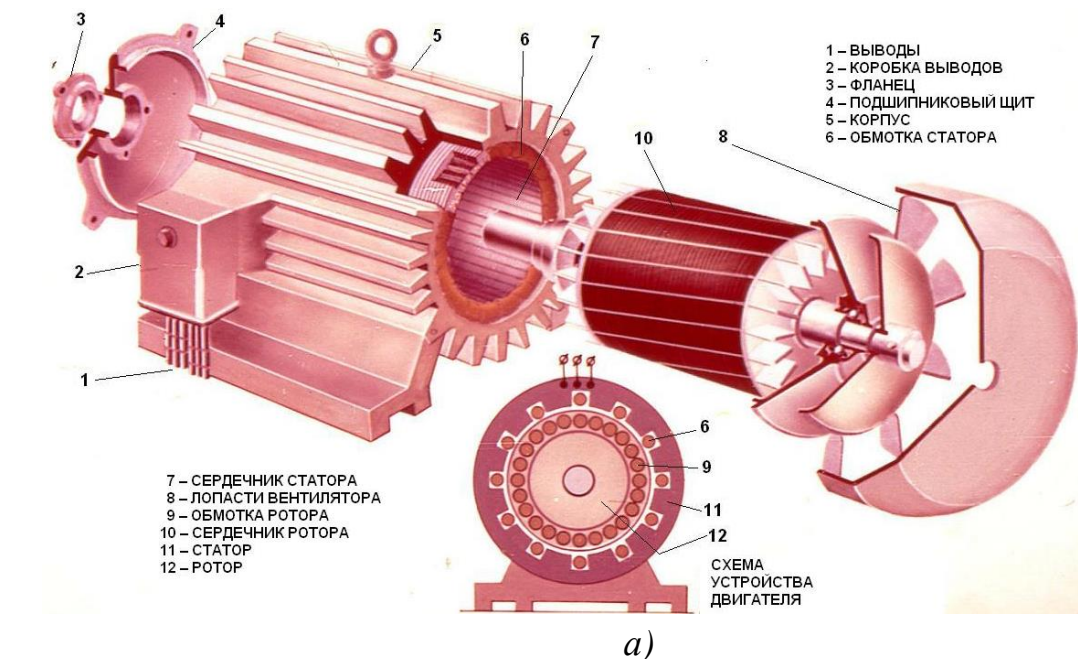
Таблица 7.3. – Категории размещения электрических машин

Условное обозначение	Характеристика категорий размещения
1	Для эксплуатации на открытом воздухе (воздействие совокупности климатических факторов, характерных для данного микроклиматического района)
2	Для эксплуатации под навесом или в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе, и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха, а также отсутствует прямое воздействие солнечного излучения и атмосферных осадков
3	Для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий, где колебания температуры, влажности воздуха и воздействие песка и пыли существенно меньше, чем на открытом воздухе
4	Для эксплуатации в помещениях с искусственно регулируемыми климатическими условиями
5	Для эксплуатации в помещениях с повышенной влажностью (например, в не отапливаемых и не вентилируемых помещениях, в том числе в шахтах)

8. Общие вопросы теории асинхронных машин

8.1. Устройство асинхронных двигателей

Асинхронные двигатели по своему устройству делятся на два основных типа: с короткозамкнутым ротором и фазным ротором. Наибольшее распространение получили *двигатели с короткозамкнутым ротором*, в его пазах расположена обмотка типа *беличья клетка* (рис. 8.1 и 8.3).



б)

Рисунок 8.1. – Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором: общий вид двигателя – (а); двигатель в разобранном виде – (б) 1, 4, 7, 10 – фланцы; 2, 9 – подшипниковые щиты; 3, 8 – подшипники; 5 – ротор с обмоткой типа беличья клетка; 6 – станина (корпус); 11 – вентилятор; 12 – кожух; 13 – шпильки; 14 – клеммная панель; 15 – клеммные болты; 16 – крышка коробки выводов; 17 – корпус коробки выводов; 18 – пробка

Подшипники, фланцы и элементы уплотнения составляют подшипниковый узел (рис. 8.1).

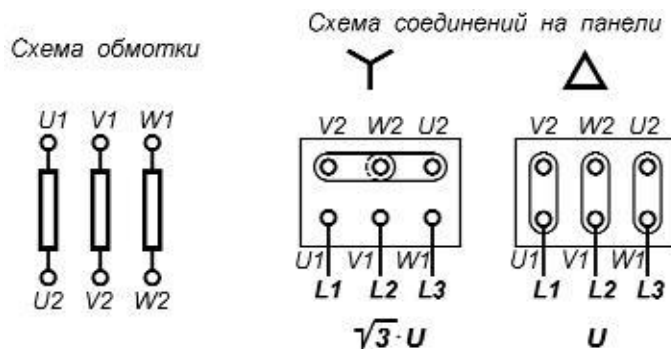


Рисунок 8.2. – Структурная схема трехфазной обмотки статора и ее соединение на клеммной панели в «звезду» (Y), в «треугольник» (Δ)

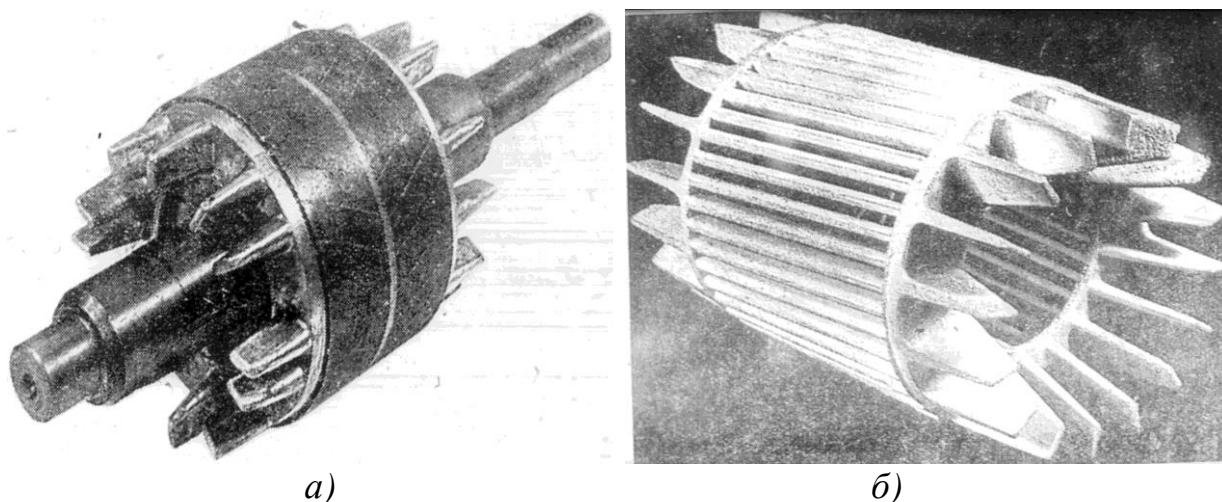
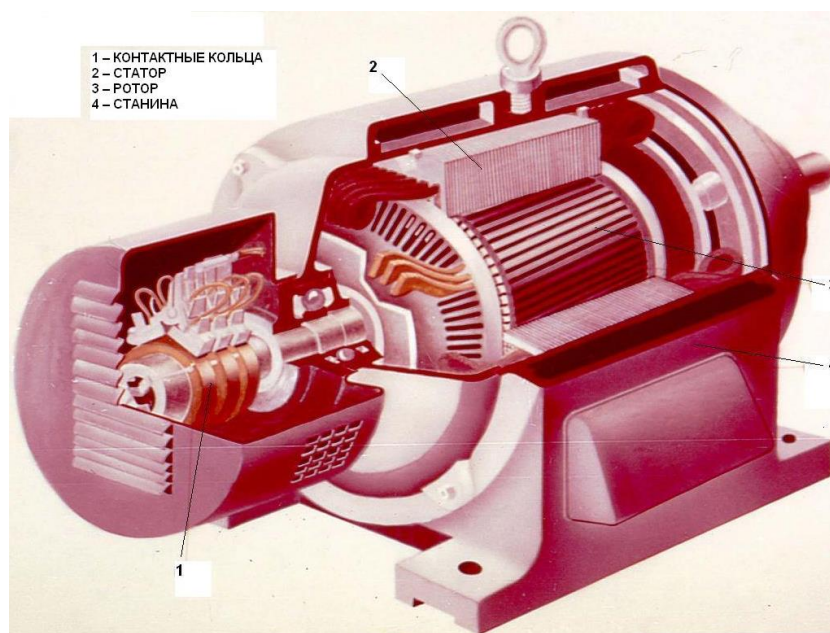


Рисунок 8.3. – Короткозамкнутый ротор с обмоткой типа беличья клетка – (а); обмотка ротора типа беличья клетка с вентиляционными лопатками – (б): (сталь сердечника вытравлена)

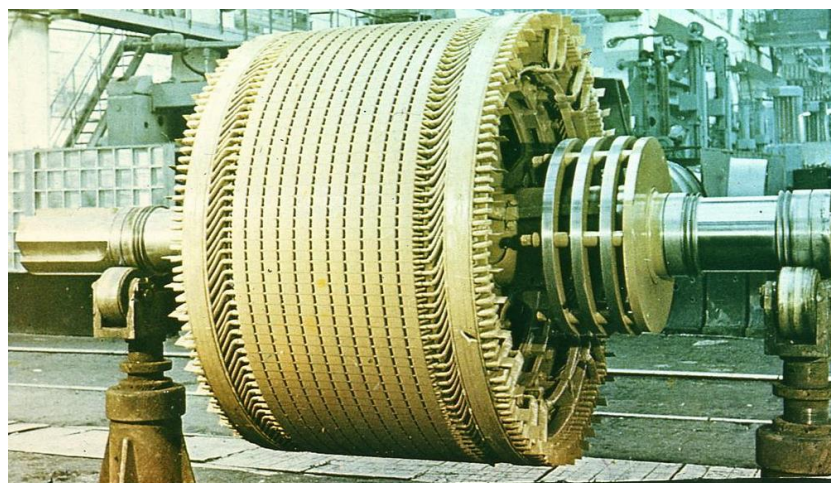
Обмотки короткозамкнутых роторов (рис. 8.3) подобны «беличьей клетке» и выполняются литыми из алюминия или его сплавов. При заливке одновременно отливаются стержни, находящиеся в пазах, и короткозамыкающие кольца с размещенными на их торцах вентиляционными лопатками и штырями для крепления балансировочных грузиков.

Короткозамкнутые обмотки роторов крупных двигателей и специальных асинхронных двигателей с улучшенными пусковыми характеристика-

ми выполняются сварными. Стержни ротора из меди или латуни привариваются к короткозамыкающим кольцам, имеющим отверстия, куда перед сваркой вставляются стержни обмотки.



а)



б)

Рисунок 8.4. – Асинхронный двигатель фазным ротором – (а); фазный ротор мощного двигателя – (б): (справа на валу расположены три контактных кольца)

Отличительная особенность *асинхронных двигателей с фазным ротором* (рис. 8.4) состоит в том, что обмотка ротора выполнена *всепной* из круглого провода или стержневой из медного провода прямоугольного сечения (в двигателях *бóльшей* мощности). Обмотка ротора изготавливается так же, как и обмотка статора.

Начала обмотки ротора выведены на контактные кольца *1*. Узел контактных колец вынесен из станины, а контактные кольца закрыты кожухом (рис. 8.4, *a*). Узел контактных колец – консольного типа. Контактные кольца, опрессованные пластмассой, насаживаются на вал двигателя, они выполняются чугунами или медными. Выводные концы обмотки ротора подходят к трем кольцам через *внутреннее отверстие в вале ротора*. Обмотка ротора соединяется в «звезду» (Y).

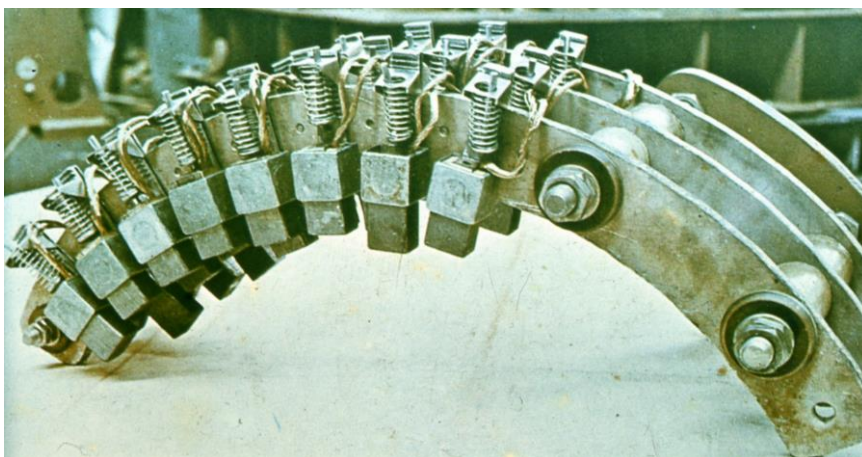


Рисунок 8.5. – Щеточный узел мощного асинхронного двигателя с фазным ротором

Токосъемный аппарат состоит из щеток и щеткодержателей (рис. 8.5). Щеткодержатели укреплены на изолированной части пальца, металлический конец которого ввинчен в прилив подшипникового щита.

На рис. 8.6 и 8.7 представлено типичное для серийных короткозамкнутых асинхронных двигателей с беличьей клеткой на роторе исполнение по способу охлаждения и защиты от воздействия внешней среды – *защищенное обдуваемое исполнение* (см. разд. 7, с. 28, сл.), в котором внутреннее пространство машины защищено от брызг воды и пыли. Внешний обдув двигателя создается наружным вентилятором, который закрыт кожухом. Кожух защищает персонал от прикосновения к вентилятору и направляет воздух к ребренной поверхности станины. Циркуляция воздуха внутри машины (на рис. 8.7 показана стрелками) усиливается при помощи вентиляционных лопаток ротора.

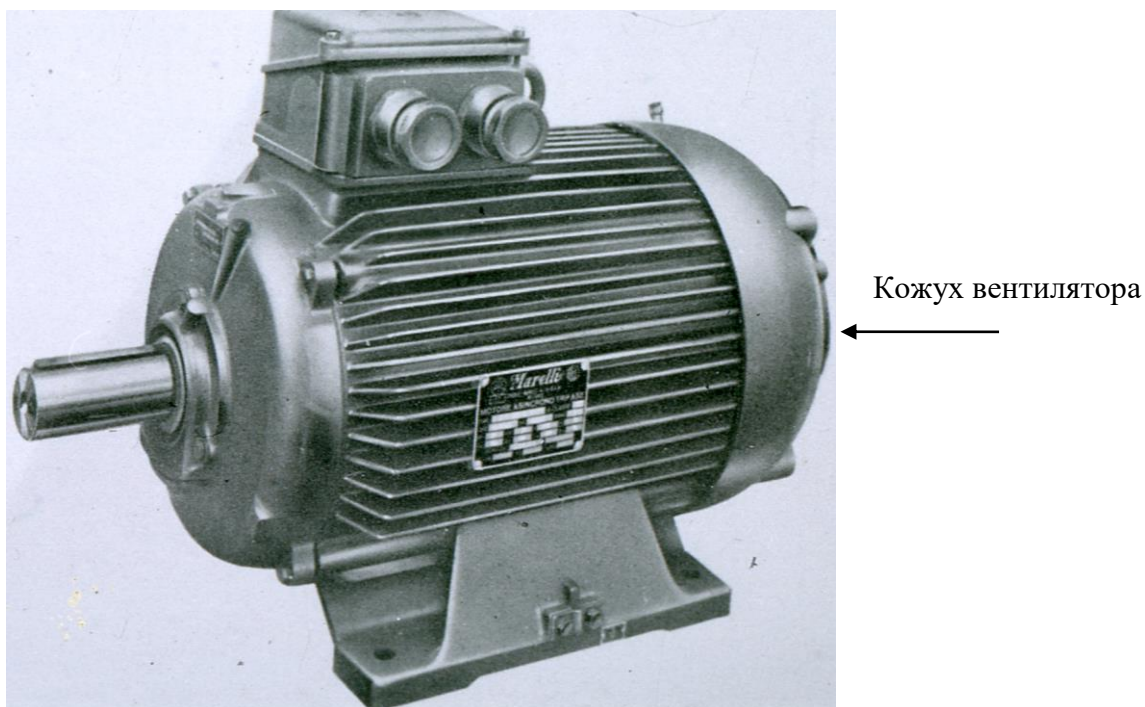


Рисунок 8.6. – Короткозамкнутый асинхронный двигатель с беличьей клеткой на роторе: (исполнение по способу защиты и охлаждения – защищенное обдуваемое)

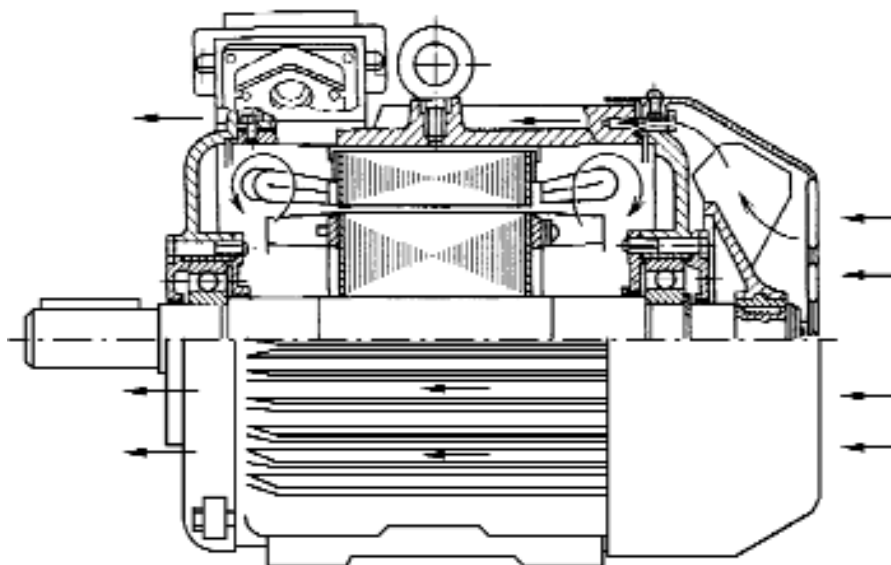


Рисунок 8.7. – Короткозамкнутый асинхронный двигатель с беличьей клеткой на роторе; выполнен в закрытом обдуваемом исполнении со степенью защиты IP54 (55): стрелками показано направление охлаждающего воздуха

На рис. 8.8 представлен агрегат «Асинхронный двигатель – генератор постоянного тока». Двигатель короткозамкнутый с беличьей клеткой на роторе имеет исполнение по способу охлаждения и защиты от воздействия внешней среды – *защищенное продуваемое с самовентиляцией*. В таком двигателе внутри машины воздух продувается посредством вентиляционных лопаток, составляющих единое целое с беличьей клеткой (см. рис. 8.3).

Воздух попадает в машину через отверстия в подшипниковых щитах, омывает нагретые поверхности магнитопровода и обмоток, а затем выходит через отверстия в станине.

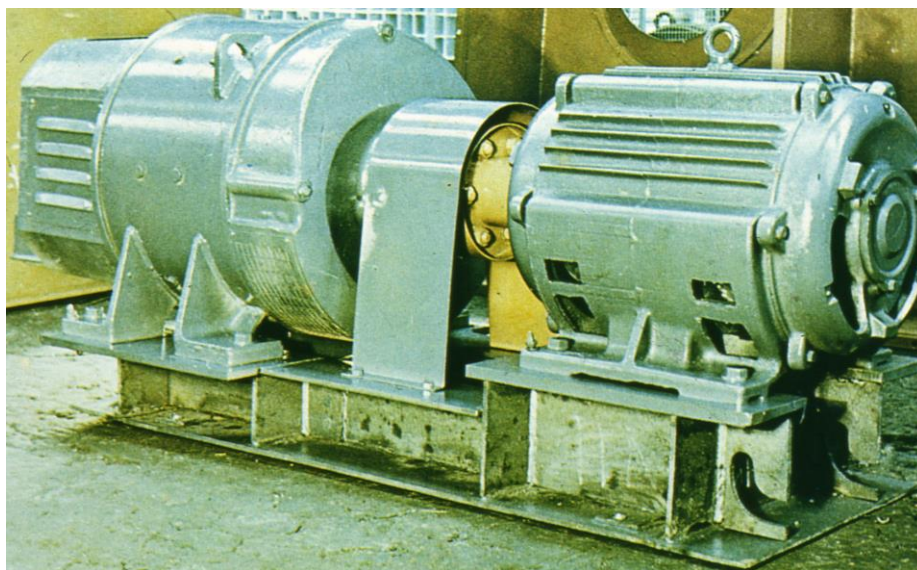


Рисунок 8.8. – Электромашинный агрегат:
«Асинхронный двигатель (справа) – генератор постоянного тока (слева)»

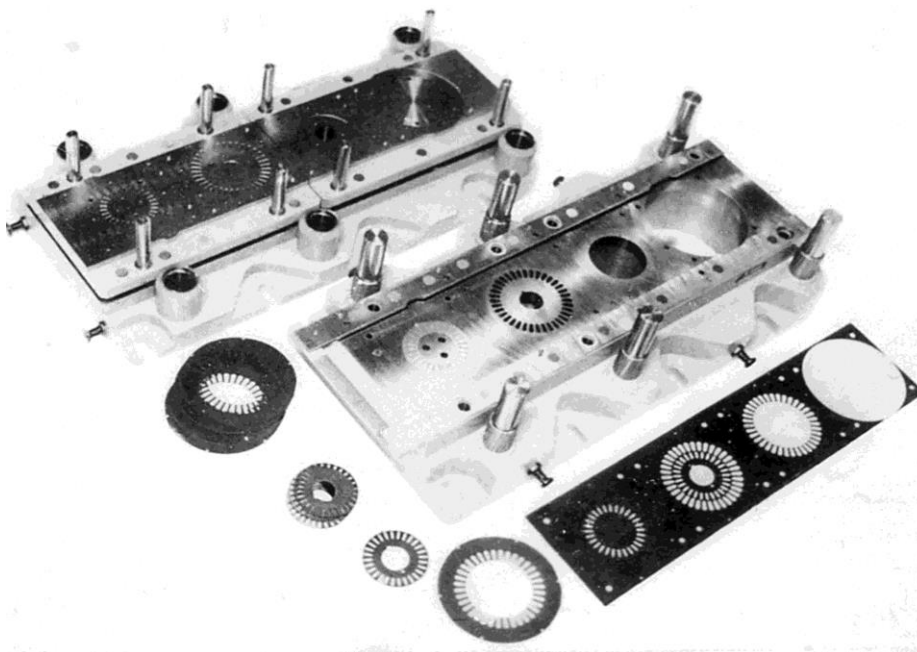


Рисунок 8.9. – Элементы штампа для изготовления пластин статора и ротора

Сердечники статора и ротора набираются из пластин электротехнической стали преимущественно холоднокатаной изотропной с толщиной 0,35 или 0,5 мм. На рис. 8.9 показана фотография элементов штампа для изготовления пластин статора и ротора из электротехнической стали. Пластины статора изолируют лаком.

На внутренней цилиндрической поверхности сердечника статора располагаются пазы, в которые укладывается трехфазная пространственно-распределенная обмотка (рис. 8.10).

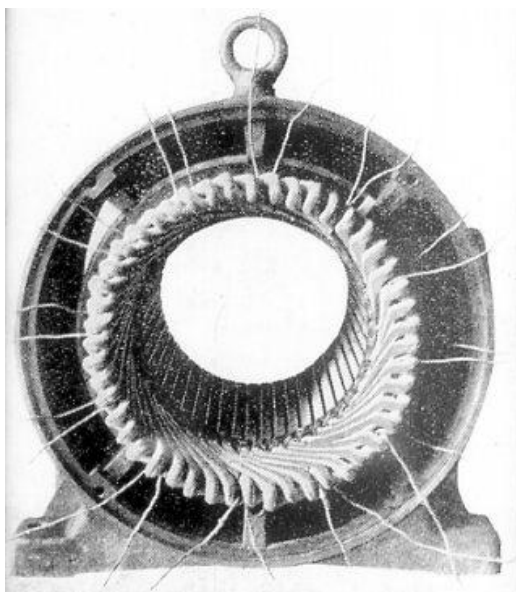


Рисунок 8.10. – Станина и статор с обмоткой, уложенной в пазы: в верхней части корпуса расположен рым-болт, используемый для подъема двигателя при монтаже

Сердечник статора укрепляют в станине. Форма пазов и число пазов на статоре **зависят от мощности и частоты вращения**. Пластины ротора не изолируются, так как частота перемагничивания сердечника ротора невелика и составляет примерно 1–2 Гц. Пазы ротора располагаются на внешней цилиндрической поверхности сердечника (рис. 8.11). При сборке сердечника ротора может быть выполнен скос пазов.

Современные асинхронные электрические двигатели *общепромышленного назначения* производятся во всем мире в виде *серий*, объединенных общностью конструктивного исполнения и условий работы при стройно нарастающей *взаимосвязи мощностей с высотами оси вращения* и предназначенных для широкого ряда потребителей.

В России асинхронные двигатели, изготавливаемые на различных электромашиностроительных заводах (например, Ярославский электромашиностроительный и Владимирский электромоторный заводы), разделены на ряд серий, охватывающих отдельные интервалы номинальных мощностей. В каждой серии проводится типизация, стандартизация и унификация *установочных размеров* асинхронных двигателей. Наиболее распространены двигатели мощностью от 0,06 до 100 кВт. При изготовлении серий машин (см. разд. 4, с. 20, сл.) предусматривается максимальная унификация,

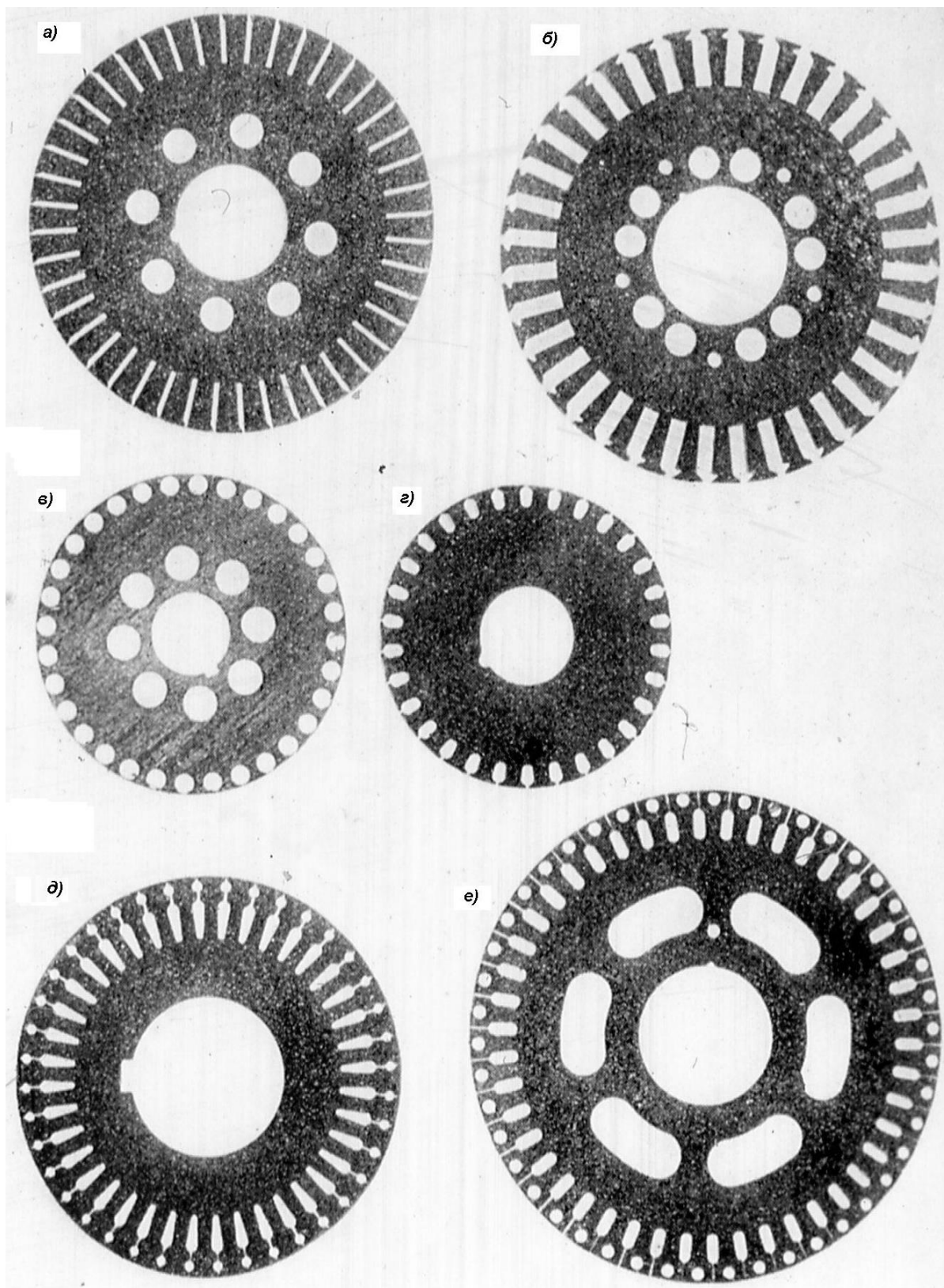


Рисунок 8.11. – Пластины ротора асинхронного двигателя:

с глубокими пазами для беличьей клетки специального исполнения – (а); с полуоткрытыми пазами для фазной обмотки – (б); с пазами для беличьей клетки классического исполнения – (в) и (г); с пазами для двойной беличьей клетки – (д) и (е)

поэтому большинство деталей одинаковые для двигателей, как с короткозамкнутым, так и с фазным ротором.

Наряду двигателями общего назначения изготавливаются микродвигатели, их конструкции отличаются друг от друга. Это связано с особенностями работы микродвигателей в системах автоматического управления, применением в бытовых приборах с однофазным питанием и функциями. Наиболее распространенные асинхронные микромашины рассмотрены в Л. Р. №3, см. Прил., с. 249, сл.

8.2. Развернутая схема трехфазной обмотки

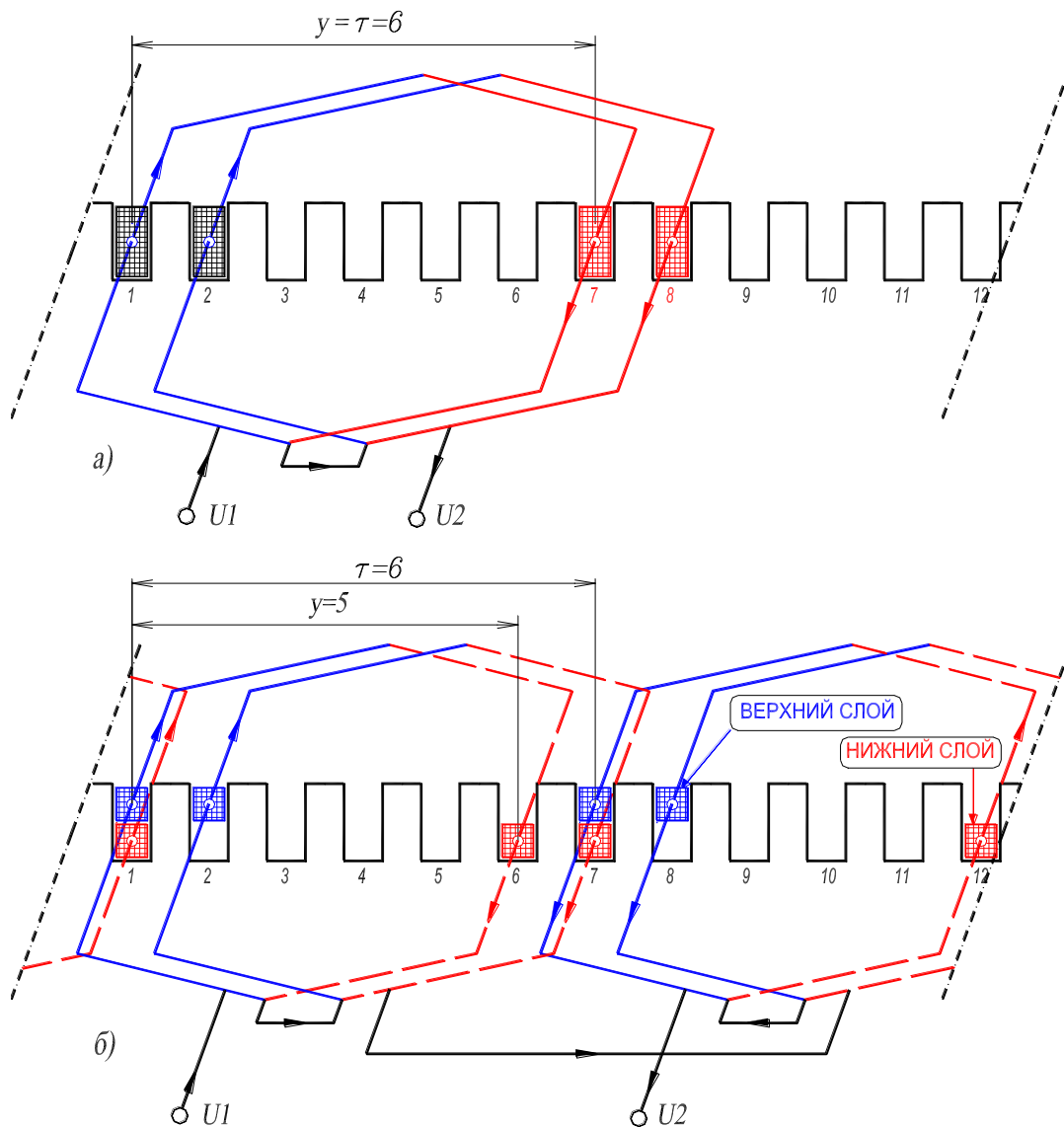
8.2.1. Построение схемы однослойной обмотки

По форме витка различают обмотки петлевые (рис. 8.12) и волновые. Катушка обмотки состоит из нескольких последовательно соединенных витков.

В пазу однослойной обмотки содержится сторона только одной катушки, а в пазу двухслойной обмотки содержатся стороны двух разных катушек (рис. 8.12).

Рассмотрим построение однослойной пространственно-распределенной петлевой трехфазной обмотки, которая характеризуется следующими данными:

- Число пазов (зубцов) $Z = 24$;
- Число полюсов $2p = 4$;
- Число фаз $m = 3$;
- Шаг обмотки *диаметральный* $y = \tau = Z/2p = 6 (1 \rightarrow 7)$;
- Угол сдвига векторов пазовых ЭДС $\alpha = 360^\circ p/Z = 30^\circ \text{ эл.}$;
- Число пазов на полюс и фазу $q = Z/2p \cdot m = 2$.



**Рисунок 8.12. – Расположение в пазовом слое фазы U однослойной обмотки, $y = \tau$ (а);
 расположение в пазовом слое фазы U двухслойной обмотки, $y < \tau$ (б):
 данные обмоток: $Z = 12$; $2p = 2$; $m = 3$**

*Построение однослойной обмотки осуществляется в последовательности.**

1. Строится звезда векторов пазовых ЭДС, то есть ЭДС, индуцированных вращающимся полем в проводниках, расположенных в пазах.

*Рассматривается *равносекционная* обмотка катушки, которой имеют одинаковые размеры и форму и изготавливаются на одном шаблоне.

При построении принимается во внимание следующее. Два вектора пазовых ЭДС, соответствующие двум любым *соседним* пазам, смещены, в общем случае, на угол α . Для рассматриваемой обмотки этот угол составляет 30° эл. Так как число периодов поля $p = 2$, то в проводниках расположенных в пазах смещенных на двойное полюсное деление τ (в данном случае $2\tau = 12$) векторы пазовых ЭДС будут совпадать по фазе. Следовательно, звезда векторов пазовых ЭДС состоит из двух двенадцатилучевых звезд, которые накладываются друг на друга (рис. 8.13).

Векторы обозначаются символами $\underline{E}_1, \underline{E}_2, \underline{E}_3, \dots, \underline{E}_{24}$;

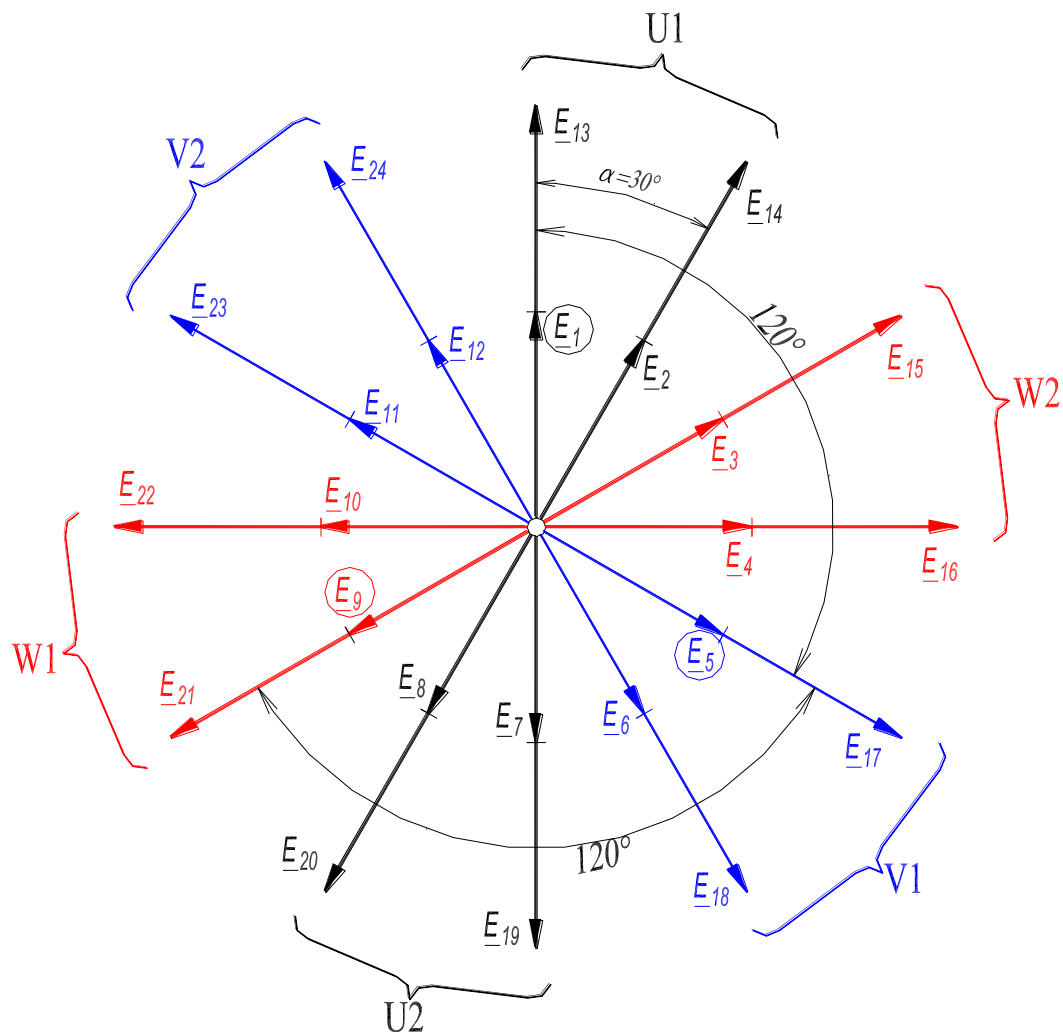


Рисунок 8.13. – Звезда векторов пазовых ЭДС однослойной трехфазной обмотки

2. Звезда векторов пазовых ЭДС делится на *шесть* фазных зон с одинаковым числом векторов в каждой зоне (обмотка называется шестизонной, фазная зона занимает 60°). Это число для однослойной обмотки равно q (в данном случае $q = 2$). На рис. 8.13 зоны обозначены символами $U1, W2, V1, U2, W1, V2$. Очевидно, что фазной зоне соответствует угол в 60° эл.;

3. Векторы пазовых ЭДС, которые находятся в фазных зонах, смещенных на 180° , относят к одной и той же фазе. Таким образом, векторы ЭДС, расположенные в фазных зонах $U1$ и $U2$, соответствуют 1-й фазе трехфазной обмотки. Векторы ЭДС, расположенные в фазных зонах $V1$ и $V2$, соответствуют 2-й фазе трехфазной обмотки. Векторы ЭДС, расположенные в фазных зонах $W1$ и $W2$, соответствуют 3-й фазе трехфазной обмотки. Очевидно, что если начало первой фазы принять в 1-м пазу, то начало второй фазы *должно* соответствовать 5-му пазу, а начало третьей фазы – 9-му пазу. В этом случае фазы обмотки будут сдвинуты в пространстве на угол в 120° эл., что является одним из условий создания вращающегося магнитного поля;

4. Звезда векторов пазовых ЭДС определяет распределение пазов и катушек по фазам. В табл. 8.1 приведено это распределение.

Таблица 8.1. – Распределение пазов и катушек по фазам

Фазная зона	1-я фаза		2-я фаза		3-я фаза	
	$U1$	$U2$	$V1$	$V2$	$W1$	$W2$
Номера пазов	1, 2 13, 14	7, 8 19, 20	5, 6 17, 18	11, 12 23, 24	9, 10 21, 22	15, 16 3, 4
Катушки *	(1 → 7), (2 → 8), (13 → 19), (14 → 20)		(5 → 11), (6 → 12), (17 → 23), (18 → 24)		(9 → 15), (10 → 16), (21 → 3), (22 → 4)	

Примечание. *В скобках обозначены номера двух пазов, в которых находятся стороны катушки. Катушки, уложенные в *соседние пары* пазов, например, (1 → 7) и (2 → 8), соединяются между собой последовательно и составляют катушечную группу. В катушечную группу входит q катушек (для рассматриваемой обмотки $q = 2$). Каждая фаза однослойной обмотки содержит p катушечных групп (для рассматриваемой обмотки $p = 2$). Катушечные группы в пределах каждой фазы однослойной обмотки соединяются между собой последовательно (если в обмотке не предусмотрены параллельные ветви) и *согласно*.

5. После построения звезды векторов пазовых ЭДС и заполнения табл. 8.1, изображаются 24 вертикальные линии, которые соответствуют пазам (для рассматриваемой обмотки число пазов $Z = 24$). Далее в пазы, которые соответствуют 1-й фазе, укладываются катушки этой фазы (см. табл. 8.1). Катушки в пределах каждой катушечной группы соединяются между собой последовательно, а катушечные группы соединяются между собой последовательно и согласно. На рис. 8.14,а показана 1-я фаза $U1-U2$ обмотки, уложенная в пазы. Начало этой фазы $U1$ соответствует 1-му пазу;

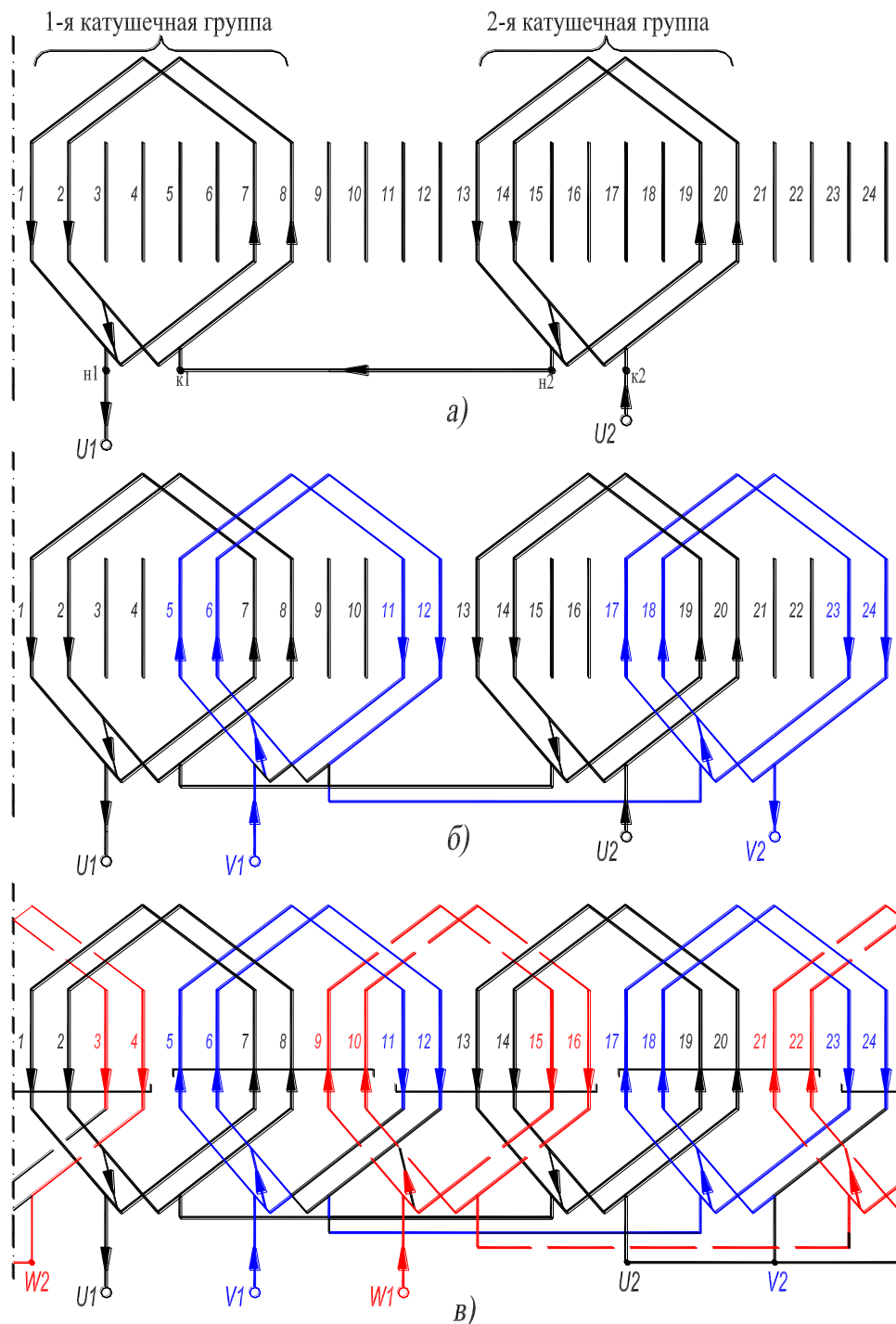


Рисунок 8.14. – Развернутая схема однослойной трехфазной обмотки ($2p = 4$):
 одна фаза U – (а); две фазы U и V – (б); три фазы U , V и W – (в)

6. Аналогично строится **2-я** фаза обмотки, причем начало фазы V_1 соответствует **5-му** пазу, так как в этом случае **1** и **2-я** фазы будут сдвинуты в пространстве на угол в 120° эл. На **рис. 8.14,б** показаны **1-я** фаза U_1-U_2 и **2-я** фаза V_1-V_2 обмотки;

7. Затем строится **3-я** фаза обмотки, причем начало фазы W_1 соответствует **9-му** пазу. На **рис. 8.14,в** показана развернутая схема трехфазной однослойной распределенной обмотки;

8. После построения развернутой схемы обмотки необходимо соединить выводы фаз, согласно заданной схеме, и указать направление токов в фазах для фиксированного момента времени. На [рис. 8.14,в](#) фазы соединены по схеме «звезда» (Y);

9. Проставить направление токов в фазах. На [рис. 8.14](#) оно приведено для момента времени, при котором ток в 1-й фазе максимален, а токи в двух других фазах равны половине максимального и противоположно направлены ([рис. 8.20, б](#)).

Как следует из [рис. 8.14](#), обмотка создает четырехполюсное магнитное поле, что соответствует заданию;

10. Так как фаза однослойной обмотки содержит p катушечных групп (см. [рис. 8.14,а](#)), то число параллельных ветвей в обмотке может быть не более p .

8.2.2. Построение схемы двухслойной обмотки

Двухслойная обмотка, в отличие от однослойной, выполняется с шагом меньшим диаметрального ($y < \tau$). Шаг y двухслойной обмотки принимается в диапазоне $(4/5 \div 6/7) \cdot \tau$, где τ – полное деление обмотки. За счет сокращения шага обмотки достигается уменьшение амплитуд 5 и 7-й пространственных гармоник в кривой МДС обмотки, что положительно влияет на форму механической характеристики трехфазного асинхронного двигателя, $n = f(M)$ (см. [разд. 8.5.1](#)). Кроме того, за счет сокращения шага обмотки достигается экономия обмоточного провода, так как длина лобовых частей в двухслойной обмотке меньше, чем в однослойной. Все катушки двухслойной обмотки имеют одинаковые размеры и форму.

В каждом пазу двухслойной обмотки содержатся стороны двух разных катушек, причем в верхней части паза расположена левая сторона катушки, а ее правая сторона расположена в нижней части другого паза. Если левая сторона катушки расположена, например, в 1-м пазу, то номер паза, в который необходимо уложить правую сторону катушки определяется как, $1 + y$, где y – шаг обмотки ([рис. 8.12,б](#)). На рисунке левые стороны катушек показаны **сплошными линиями**, а правые – **пунктирными**.

Рассмотрим построение *двухслойной* пространственно-распределенной петлевой трехфазной обмотки, которая характеризуется следующими данными:

➤ Число пазов (зубцов)

$$Z = 24;$$

- Число полюсов $2p = 4;$
- Число фаз $m = 3;$
- Шаг обмотки *укороченный* $y = (4/5—6/7) \cdot \tau = 5 \cdot \tau / 6 = 5 (1 \rightarrow 6);$
- Угол сдвига векторов пазовых ЭДС $\alpha = 360^\circ p / Z = 30^\circ \text{ эл.};$
- Число пазов на полюс и фазу $q = Z / 2p \cdot m = 2.$

Построение двухслойной обмотки осуществляется в последовательности.

1. Строится звезда векторов пазовых ЭДС, которые индуцируются вращающимся полем в *левых* сторонах катушек. Эта звезда полностью совпадает со звездой векторов пазовых ЭДС однослойной обмотки (рис. 8.13) с соответствующими данными (исходные данные рассматриваемых однослойной и двухслойной обмоток совпадают за исключением величины шага обмотки y). Порядок построения этой звезды описан в пп. 1, 2, 3 (см. с. 46 и 47). Таким образом, расположение в пазах левых сторон катушек (они находятся в верхней части пазов) определяется по звезде векторов. Расположение правых сторон катушек (они находятся в нижней части пазов) определяется по величине шага y и номеру паза, в котором лежит левая сторона катушки;

2. В табл. 8.2 приведено распределение пазов и катушек по фазам.

Таблица 8.2. – Распределение пазов и катушек по фазам

Фазная зона верхнего слоя обмотки (рис. 8.13)	1-я фаза		2-я фаза		3-я фаза	
	<i>U1</i>	<i>U2</i>	<i>V1</i>	<i>V2</i>	<i>W1</i>	<i>W2</i>
Номера пазов, в которых расположены левые стороны катушек	1, 2 13, 14	7, 8 19, 20	5, 6 17, 18	11, 12 23, 24	9, 10 21, 22	15, 16 3, 4
Катушки *	(1→6'), (2→7'), (7→12'), (8→13'), (13→18'), (14→19'), (19→24'), (20→1')		(5→10'), (6→11'), (11→16'), (12→17'), (17→22'), (18→23'), (23→4'), (24→5')		(9→14'), (10→15'), (15→20'), (16→21'), (21→2'), (22→3'), (3→8'), (4→9')	

Примечание. *Числа без штрихов обозначают верхние части пазов, числа со штрихом обозначают нижние части пазов. В скобках обозначены номера двух пазов, в которых находится катушка. Катушки, уложенные в *соседние пары* пазов, например (1→6') и (2→7'), соединяются между собой последовательно и составляют катушечную группу. В катушечную группу входит q катушек (для рассматриваемой обмотки $q=2$). Каждая фаза двухслойной обмотки содержит $2p$ катушечных групп (для рассматриваемой обмотки $2p = 4$). Катушечные группы в пределах каждой фазы двухслойной обмотки соединяются между собой последовательно (если в обмотке не предусмотрены параллельные ветви) и *встречно*.

3. После построения звезды векторов пазовых ЭДС и заполнения табл. 8.2, изображаются 24 пары вертикальных линий ($Z = 24$), причем сплошные линии соответствуют верхней части пазов (они пронумерованы числами 1, 2, 3, ..., 24), а пунктирные — их нижней части (они пронумерованы числами 1', 2', 3', ..., 24'). Далее в пазы, которые соответствуют 1-й фазе, укладываются катушки этой фазы (см. табл. 8.2). Катушки в пределах каждой катушечной группы соединяются между собой последовательно, а катушечные группы соединяются между собой последовательно и встречно. На рис. 8.15,а показана 1-я фаза обмотки, уложенная в пазы. Начало этой фазы соответствует 1-му пазу;

4. Аналогично строится 2-я фаза обмотки, начало фазы соответствует 5-му пазу, так как в этом случае 1 и 2-я фазы будут сдвинуты в пространстве на угол в 120° эл. На рис. 8.15,б показаны 1 и 2-я фазы обмотки;

5. Затем строится 3-я фаза обмотки, начало фазы соответствует 9-му пазу. На рис. 8.15,в показана трехфазная двухслойная обмотка;

6. После построения развернутой схемы обмотки необходимо соединить выводы фаз, согласно заданной схеме, и указать направление токов в фазах для фиксированного момента времени. На рис. 8.15 фазы соединены по схеме «звезда» (Y). Направление токов в фазах на рис. 8.15 указано для момента времени, при котором ток в 1-й фазе максимален, а токи в двух других фазах равны половине максимального и противоположно направлены (см. рис. 8.20,б). Как следует из рис. 8.15 обмотка создает четырехполюсное магнитное поле, что соответствует заданию;

7. Так как фаза двухслойной обмотки содержит $2p$ катушечных групп (см. рис. 8.15,а), то число параллельных ветвей в обмотке может быть не более $2p$.

Для асинхронных двигателей серии RA при высотах оси вращения 71–132 мм (для всех полюсностей) и при высотах оси вращения 160 и 180 мм (для $2p = 4, 6, 8$) применены трехфазные однослойные обмотки. Однослойные обмотки хорошо зарекомендовали себя в практике электромашиностроения как менее трудоемкие при изготовлении с возможностью их механизированной укладки на статорообмоточных станках. При больших высотах оси вращения применяются трехфазные двухслойные обмотки.

Наряду с рассмотренными петлевыми обмотками, имеющими много модификаций, также используются волновые обмотки [1–4].

8.3. МДС пространственно-распределенной обмотки

8.3.1. МДС однофазной обмотки

В трансформаторе МДС одной фазы сосредоточенной обмотки создает неподвижное в пространстве пульсирующее магнитное поле, изменяющееся во времени по периодическому закону с частотой тока, протекающего по обмотке. В асинхронном двигателе МДС одной фазы пространственно-распределенной ($q \geq 2$) обмотки статора также создает неподвижное в пространстве пульсирующее магнитное поле изменяющееся во времени по периодическому закону с частотой тока, протекающего по обмотке. Но в отличие от трансформатора магнитное поле одной фазы обмотки статора двигателя изменяется по периодическому закону *не только во времени, но и в пространстве* на полюсном делении τ .

На рис.8.16,*а* показана *одна фаза U* однослойной пространственно-распределенной трехфазной обмотки, которая характеризуется следующими данными:

Число пазов (зубцов)	- $Z = 12;$
Число полюсов	- $2p = 2;$
Число фаз	- $m = 3;$
Шаг обмотки <i>диаметральный</i>	- $y = \tau = Z/2p = 6 (1 \rightarrow 7);$
Угол сдвига векторов пазовых ЭДС	- $\alpha = p360^\circ/Z = 30^\circ \text{ эл.} = 30^\circ \text{ геом.};$
Число пазов на полюс и фазу	- $q = Z/2p \cdot m = 2.$

На рис. 8.16,*б* показано поперечное сечение сердечника статора *с одной катушкой* фазы *U*. Катушка уложена в пазы 1 и 7-й. На рис. 8.16,*в* показана развертка сердечника статора с этой катушкой и кривая МДС, которая создана одной катушкой *фазы U* при протекании по обмотке переменного тока $i_U = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin \omega t$. Кривая МДС соответствует моменту времени $t = 0,005$ с, при котором ток в катушке максимален, $i_U = \sqrt{2} \cdot I = I_m$.

На рис. 8.16,*г* показано поперечное сечение сердечника статора *с фазой U*. Катушки фазы уложены в пазы 1, 7-й и 2, 8-й. На рис. 8.16,*д* показана развертка сердечника статора с этими катушками и результирующая кривая МДС фазы, которая создана обмоткой при протекании по ней пере-

менного тока $i_U = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin \omega t$. Кривая результирующей МДС также соответствует моменту времени $t = 0,005$ с, при котором ток в фазе максимален, $i_U = \sqrt{2} \cdot I = I_m$.

Из анализа рис. 8.16,в следует, что МДС одной катушки изменяется по пространственной координате x , вдоль полюсного деления обмотки $\tau = \tau_1$, по закону прямоугольника, который в общем виде обозначим $F_K(\gamma)$. В теории электрических машин принято пространственную координату x выражать в угловых единицах, то есть $\gamma = \pi \cdot x / \tau_1$. Так как пространственная кривая МДС симметрична относительно оси абсцисс, то ее можно разложить в гармонический ряд Фурье, содержащий только нечетные гармоники порядка $\nu = 1, 3, 5, \dots$, то есть:

$$F_K(\gamma) = F_{1K} \cos \gamma + F_{3K} \cos 3\gamma + F_{5K} \cos 5\gamma + F_{7K} \cos 7\gamma + \dots \quad (8.1)$$

Амплитуда ν -й пространственной гармоники МДС $F_{\nu K}$ связана с амплитудой 1-й гармоники F_{1K} соотношением, известным из теории рядов Фурье, $F_{\nu K} = F_{1K} / \nu$. В частности, для 3-й гармоники ($\nu = 3$) справедливо равенство $F_{3K} = F_{1K} / 3$.

Очевидно, что во времени МДС катушки изменяется по синусоидальному закону, что определяется характером изменения тока, протекающего в ней.

Поэтому закон изменения МДС катушки в пространстве и во времени определяется выражением вида:

$$F_K(t, \gamma) = \sin \omega t \cdot (F_{1K} \cos \gamma + F_{3K} \cos 3\gamma + F_{5K} \cos 5\gamma + F_{7K} \cos 7\gamma, \dots), \quad (8.2)$$

а закон изменения 1-й гармоники МДС катушки в пространстве и во времени (то есть мгновенное значение этой гармоники) представляется в виде:

$$F_{1K}(t, \gamma) = F_{1K} \cdot \sin \omega t \cdot \cos \gamma, \quad (8.3)$$

где F_{1K} – амплитуда 1-й пространственной гармоники МДС катушки на один полюс, $F_{1K} = 2\sqrt{2} \cdot I \cdot w_K / \pi = 0,9 \cdot I \cdot w_K$; I – действующее значение тока в катушке с числом последовательно соединенных витков w_K .

Так как в процессе электрохимического преобразования энергии участвуют главным образом только первые гармоники МДС обмоток статора и ротора асинхронного двигателя, то в дальнейшем изложении рассмотрим только первые гармоники. Рассмотрение высших гармоник МДС оговаривается (см. разд. 8.3.3).

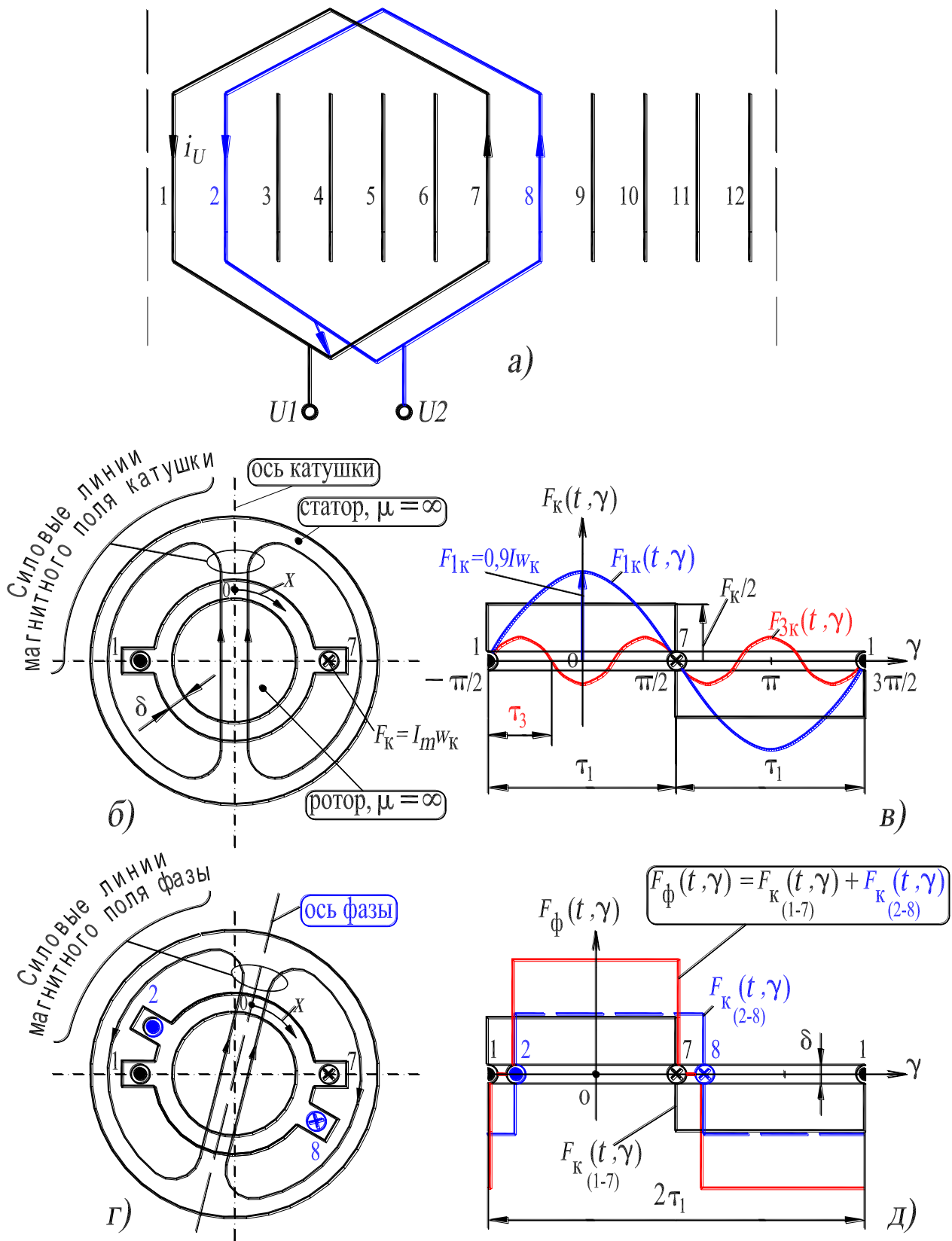


Рисунок 8.16. – МДС и магнитное поле:
 одной катушки – (б) и (в); фазы U (а) трехфазной обмотки – (г) и (д)

Как следует из анализа *1-я гармоника МДС катушки неподвижна в пространстве и пульсирует во времени с частотой тока*, протекающего в катушке (см. формулу 8.3). Этот вывод является общим, то есть он справедлив и для МДС *одной фазы* (формула 8.4).

Закон изменения 1-й гармоники МДС фазы в пространстве и во времени представляется в виде:

$$F_{1\phi}(t, \gamma) = F_{1\phi} \cdot \sin \omega t \cdot \cos \gamma. \quad (8.4)$$

В формуле (8.4) $F_{1\phi}$ – амплитуда 1-й пространственной гармоники МДС фазы *на один полюс*:

$$F_{1\phi} = 0,9 \cdot I \cdot w \cdot k_{o1} / p, \quad (8.5)$$

где $w = p \cdot q \cdot w_k$ – число последовательно соединенных витков фазы U ; k_{o1} – обмоточный коэффициент, его численное значение (несколько меньше единицы) определяется схемными особенностями обмотки (см. разд. 8.5).

Равенство (8.4), в соответствии с известной тригонометрической формулой, преобразуется к следующему виду:

$$F_{1\phi}(t, \gamma) = F_{1\phi} \cdot \sin \omega t \cdot \cos \gamma = F_{1\phi} \cdot \sin \omega t \cdot \cos(\pi \cdot x / \tau_1) = (F_{1\phi} / 2) \sin(\omega t + \pi \cdot x / \tau_1) + (F_{1\phi} / 2) \sin(\omega t - \pi \cdot x / \tau_1) = F_{1\phi,л}(t, \gamma) + F_{1\phi,п}(t, \gamma). \quad (8.6)$$

Каждое из двух слагаемых в правой части равенства (8.6) представляет собой *вращающуюся в пространстве* волну МДС, причем амплитуда каждой волны неизменна и составляет половину амплитуды МДС одной фазы, то есть $F_{1\phi} / 2 = 0,45 \cdot I \cdot w \cdot k_{o1} / p$. Волны МДС вращаются в противоположных направлениях.

На рис. 8.17,а показано, что волна МДС $F_{1\phi,л}(t, \gamma)$, соответствующая 1-му слагаемому в правой части (8.6), вращается против часовой стрелки (*левовращающаяся* волна). Рис. 8.17,б иллюстрирует, что волна МДС $F_{1\phi,п}(t, \gamma)$, соответствующая 2-му слагаемому в (8.6), вращается по часовой стрелке (*правовращающаяся* волна). Можно показать, что левовращающаяся волна имеет частоту вращения $n_{1л} = -f_1 / p$ об/с, а правовращающаяся – $n_{1п} = +f_1 / p$ об/с.

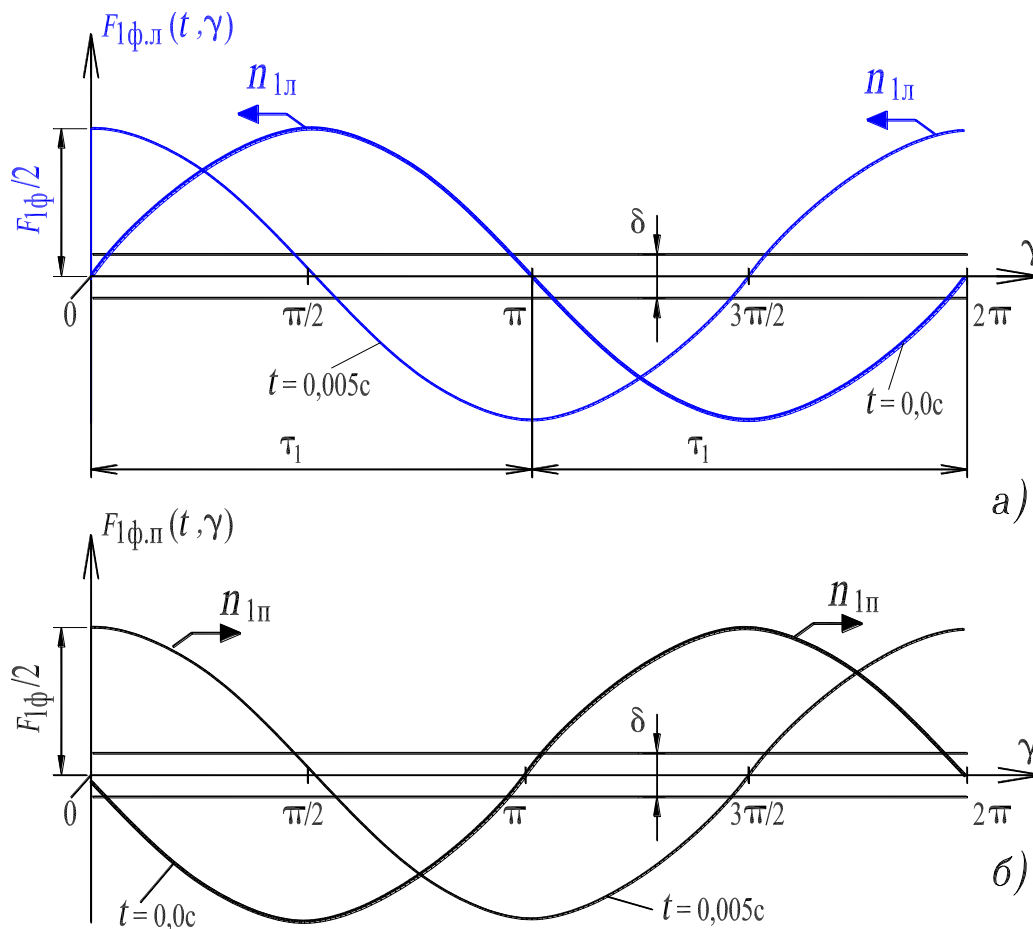


Рисунок 8.17. – К иллюстрации вращения двух волн МДС, составляющих пульсирующую МДС одной фазы: левовращающаяся волна – (а), правовращающаяся волна – (б)

Таким образом, МДС однофазной обмотки, которая **неподвижна в пространстве** и **пульсирует во времени** с частотой тока, раскладывается на две вращающиеся волны МДС (это делается для удобства анализа), имеющие равные амплитуды $F_{1φ,л} = F_{1φ,п}$, а их скорости равны по абсолютной величине $n_{1п} = |n_{1л}|$.

Отметим, что амплитуда МДС однофазной обмотки изменяется во времени (пульсирует), а амплитуды вращающихся волн неизменны и равны *половине* амплитуды МДС однофазной обмотки:

$$F_{1φ,л} = F_{1φ,п} = F_{1φ}/2 = 0,45 \cdot I \cdot w \cdot k_{о1}/p. \quad (8.7)$$

Сказанное иллюстрирует рис. 8.18 на котором показано положение неподвижного пульсирующего во времени вектора МДС одной катушки фазы $\underline{E}_{1к}$ и вращающихся векторов МДС $\underline{E}_{1к,л}$ и $\underline{E}_{1к,п}$ для различных моментов времени в течении половины периода переменного тока.

В связи с изложенным, результирующий электромагнитный момент, действующий на неподвижный ротор асинхронного двигателя (скольжение $s = 1$) с **однофазной обмоткой** на статоре будет равен нулю (см. рис. 12.1, с. 232):

$$M = M_{\text{л}} + M_{\text{п}} = 0, \quad (8.8)$$

где $M_{\text{л}}$ – электромагнитный момент, обусловленный магнитным полем $\Phi_{1\text{ф.л}}(t, \gamma)$, созданным левовращающейся волной МДС $F_{1\text{ф.л}}(t, \gamma)$; $M_{\text{п}}$ – электромагнитный момент, обусловленный магнитным полем $\Phi_{1\text{ф.п}}(t, \gamma)$, созданным правовращающейся волной МДС $F_{1\text{ф.п}}(t, \gamma)$.

Поэтому *ротор асинхронного двигателя с однофазной обмоткой на статоре самостоятельно развернуться не может и будет оставаться неподвижным.*

В связи с этим необходимы дополнительные меры для создания в двигателе *пускового момента*. Эти меры направлены на усиление при пуске правовращающегося поля (оно называется прямым) и ослабление левовращающегося поля (оно называется обратным) для того, чтобы при $s = 1$ выполнялось следующее неравенство

$$M = M_{\text{л}} + M_{\text{п}} > 0.$$

Наилучшие условия пуска достигаются, когда левовращающееся поле при пуске полностью уничтожается и поэтому $M_{\text{л}} = 0$. *Разные виды однофазных асинхронных двигателей отличаются друг от друга способами создания отличного от нуля пускового момента* (см. Л. Р. №3, с. 227, сл.).

8.3.2. МДС трехфазной обмотки

МДС трехфазной *сосредоточенной* обмотки трансформатора при протекании по ней трехфазного тока создает пульсирующее во времени по периодическому закону и *неподвижное* в пространстве магнитное поле. МДС трехфазной *пространственно-распределенной* обмотки асинхронного двигателя, при протекании по ней трехфазного тока, создает *вращающееся* магнитное поле, изменяющееся по периодическому закону не только во времени, но и в пространстве.

Условия создания вращающегося поля заключаются в следующем (см. разд. 8.4):

- 1) фазы U , V и W должны быть смещены в пространстве на 120 электрических градусов;
- 2) токи в этих фазах должны быть сдвинуты во времени на 120 градусов.

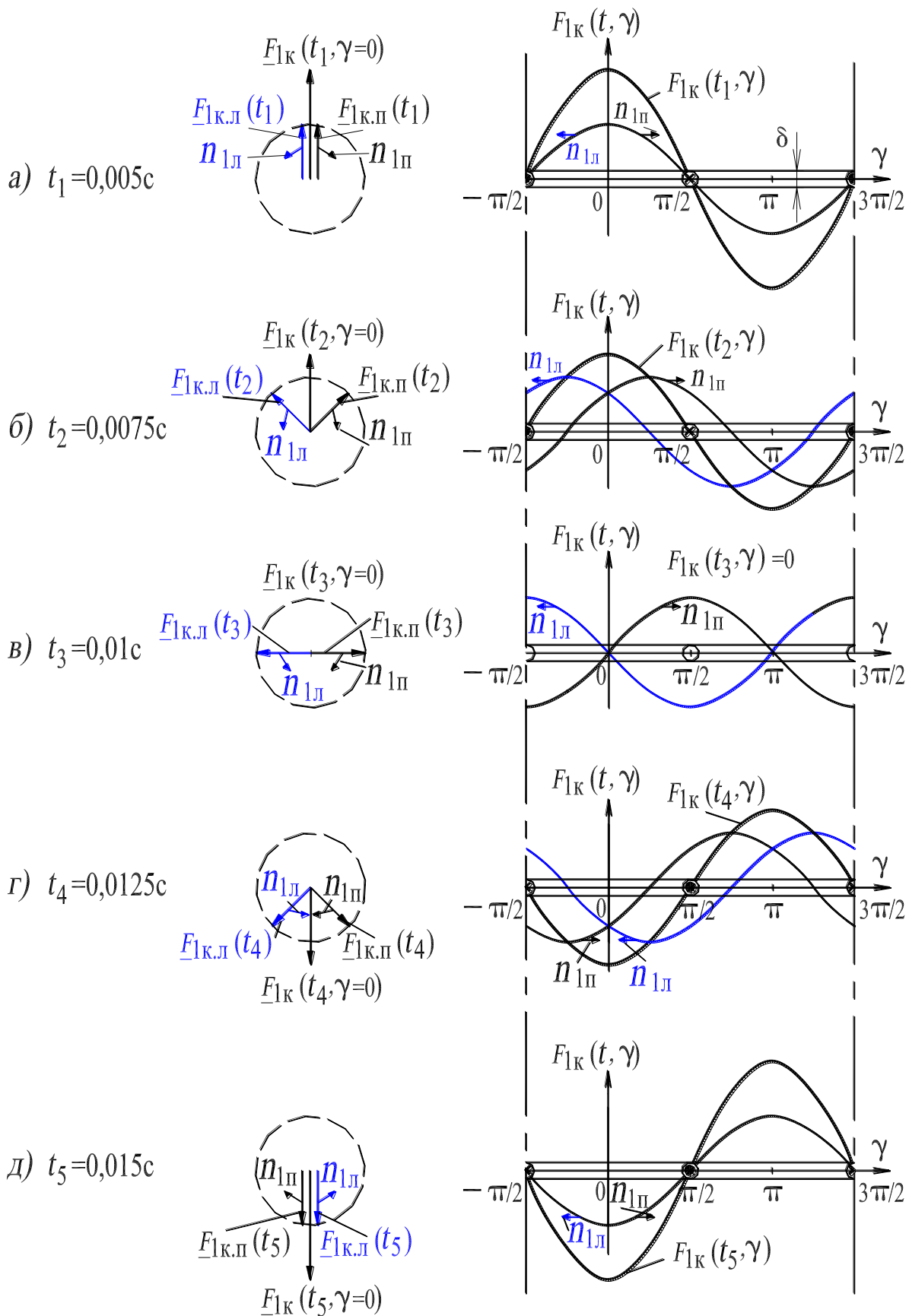


Рисунок 8.18. – Разложение неподвижной в пространстве пульсирующей МДС катушки на вращающиеся составляющие и их изменение во времени

Покажем, что МДС трехфазной пространственно-распределенной обмотки, при протекании по ней трехфазного тока, создает вращающееся магнитное поле, причем амплитуда этого поля остается неизменной (рассматривается 1-я гармоника МДС и 1-я гармоника магнитного поля). Такое поле называется *круговым*. Последний термин обусловлен тем, что годографом вектора поля является окружность.

Для фазы U справедливо выражение (см. (8.6)):

$$\begin{aligned} F_{1U}(t, \gamma) &= F_{1U} \cdot \sin \omega t \cdot \cos \gamma = (F_{1U}/2) \sin(\omega t + \gamma) + (F_{1U}/2) \sin(\omega t - \gamma) = \\ &= F_{1U.l}(t, \gamma) + F_{1U.p}(t, \gamma). \end{aligned} \quad (8.9)$$

Для фазы V записывается аналогичное выражение, но с учетом соответствующих углов сдвига во времени и пространстве:

$$\begin{aligned} F_{1V}(t, \gamma) &= F_{1V} \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \cdot \cos(\gamma - 120^\circ) = \\ &= (F_{1V}/2) \sin(\omega t + \gamma - 240^\circ) + (F_{1V}/2) \sin(\omega t - \gamma) = \\ &= F_{1V.l}(t, \gamma) + F_{1V.p}(t, \gamma). \end{aligned} \quad (8.10)$$

Для фазы W также записывается аналогичное выражение, но с учетом других углов сдвига во времени и пространстве:

$$\begin{aligned} F_{1W}(t, \gamma) &= F_{1W} \cdot \sin(\omega t - 240^\circ) \cdot \cos(\gamma - 240^\circ) = (F_{1W}/2) \sin(\omega t + \gamma - 120^\circ) + \\ &+ (F_{1W}/2) \sin(\omega t - \gamma) = F_{1W.l}(t, \gamma) + F_{1W.p}(t, \gamma). \end{aligned} \quad (8.11)$$

Суммируя левые и правые части выражений (8.9), (8.10) и (8.11) получаем искомое выражение для мгновенного значения 1-й гармоники МДС трехфазной обмотки. Оно определяется суммой правовращающихся волн МДС фаз U , V и W :

$$\begin{aligned} F_1(t, \gamma) &= F_{1U}(t, \gamma) + F_{1V}(t, \gamma) + F_{1W}(t, \gamma) = F_{1U.p}(t, \gamma) + F_{1V.p}(t, \gamma) + F_{1W.p}(t, \gamma) = \\ &= (F_{1U}/2) \sin(\omega t - \gamma) + (F_{1V}/2) \sin(\omega t - \gamma) + (F_{1W}/2) \sin(\omega t - \gamma) = \\ &= (3 \cdot F_{1\phi}/2) \sin(\omega t - \gamma) = F_1 \cdot \sin(\omega t - \gamma), \end{aligned} \quad (8.12)$$

$$\text{где } F_1 = 3 \cdot F_{1\phi}/2 = 1,35 \cdot I \cdot w \cdot k_{01}/p \quad (8.13)$$

амплитуда 1-й гармоники МДС трехфазной обмотки, которая в 1,5 раза больше амплитуды 1-й гармоники МДС одной фазы (см. формулу (8.5)).

Очевидно, что левовращающиеся волны МДС фаз U , V и W в сумме будут равны нулю:

$$\begin{aligned} F_{1U.l}(t, \gamma) + F_{1V.l}(t, \gamma) + F_{1W.l}(t, \gamma) &= (F_{1U}/2) \sin(\omega t + \gamma) + (F_{1V}/2) \sin(\omega t + \gamma - \\ &- 240^\circ) + (F_{1W}/2) \sin(\omega t + \gamma - 120^\circ) = 0. \end{aligned} \quad (8.14)$$

Выражение (8.12) определяет правовращающуюся волну МДС трехфазной обмотки

$$F_1(t, \gamma) = F_1 \cdot \sin(\omega t - \gamma), \quad (8.15)$$

амплитуда ее неизменна

$$F_1 = 1,35 \cdot I \cdot w \cdot k_{01} / p, \quad (8.16)$$

а частота вращения составляет

$$n_1 = f_1 / p \text{ об/с.} \quad (8.17)$$

Рис. 8.21 и 8.22 иллюстрируют процесс вращения поля, созданного МДС трехфазной обмотки (см. разд. 8.4).

В результате взаимодействия вращающегося магнитного потока с активной составляющей тока, протекающего в обмотке ротора, на ротор трехфазного асинхронного двигателя будет действовать электромагнитный момент. Под действием этого момента ротор трехфазного асинхронного двигателя будет вращаться в направлении магнитного поля с асинхронной скоростью $n = n_1(1 - s)$, которая несколько меньше синхронной скорости $n_1 = f_1 / p$.

8.3.3. Высшие гармоники МДС трехфазной обмотки

Кривая МДС одной катушки пространственно-распределенной обмотки являясь неподвижной в пространстве, изменяется вдоль полюсного деления по закону *прямоугольника* (рис. 8.16,в) и пульсирует во времени с частотой тока. Кривая МДС одной фазы состоящей из двух катушек пространственно-распределенной обмотки ($q = 2$), изменяется вдоль полюсного деления по *ступенчатому* закону (рис. 8.16,д). При $q > 2$ (q – это число последовательно соединенных катушек в фазе однослойной обмотки, уложенных в q пар соседних пазов) число катушек соответственно увеличивается и увеличивается количество ступеней в кривой МДС на полюсном делении.

Одна фаза обмотки создает неподвижную в пространстве МДС в виде ступенчатой кривой, причем при изменении мгновенных значений тока ее ординаты пропорционально изменяются, но ступенчатый характер кривой остается неизменным. В случае МДС всех *трех фаз* трехфазной обмотки картина будет другой.

На рис. 8.19 изображена кривая МДС простейшей трехфазной обмотки для трех моментов времени t_1, t_2, t_3 изменения синусоидального трехфазного тока (рис. 8.20,б). Из анализа рисунка следует, что ступенчатая

кривая МДС перемещается вдоль окружности расточки статора, причем её форма изменяется.

Поэтому высшие гармоники МДС будут вращаться с разными скоростями и в разных направлениях. Более детальный анализ (здесь не приводится) позволяет сделать следующие выводы [1–4]:

1. В кривой МДС трехфазной обмотки, кроме первой, содержится спектр высших нечетных пространственных гармонических составляющих.

2. Гармоники порядков 5, 11, 17, ... вращаются в направлении противоположном первой гармонике со скоростями обратно пропорциональными номеру (порядку) v гармоники, $n_v = -n_1/v$.

Выражение для мгновенного значения МДС этих гармоник записывается в виде

$$F_v(t, \gamma) = F_v \cdot \sin(\omega t + v \cdot \gamma), \quad (8.18)$$

где $\gamma_v = v \cdot \gamma = v \cdot \pi \cdot x / \tau_1 = \pi \cdot x / \tau_v$; τ_v – полюсное деление v -й гармоники МДС, $\tau_v = \tau_1/v$;

3. Гармоники порядков 7, 13, 19, ... вращаются в том же направлении, что и первая гармоника, также со скоростями обратно пропорциональными номеру (порядку) v гармоники, $n_v = n_1/v$.

Выражение для мгновенного значения МДС этих гармоник записывается в виде

$$F_v(t, \gamma) = F_v \cdot \sin(\omega t - v \cdot \gamma). \quad (8.19)$$

Выражение для амплитуд высших гармоник МДС, упомянутых в пунктах 2 и 3

$$F_v = 1,35 \cdot I \cdot w \cdot k_{ov} / p_v, \quad (8.20)$$

где $p_v = v \cdot p$ – число пар полюсов v -й вращающейся гармоники МДС; k_{ov} – обмоточный коэффициент v -й гармоники (см. разд. 8.5.1).

Высшие пространственные гармоники МДС, в особенности 5 и 7-я, влияют отрицательно на механическую характеристику асинхронного двигателя, вызывая в ней провалы в зоне скольжений 1,2 и 0,857. Для уменьшения амплитуд этих гармоник, а, следовательно, для уменьшения их влияния, трехфазную обмотку статора выполняют двухслойной с шагом $y_1 = (4/5 \div 6/7)\tau_1$, а число пазов q на полюс и фазу увеличивают.

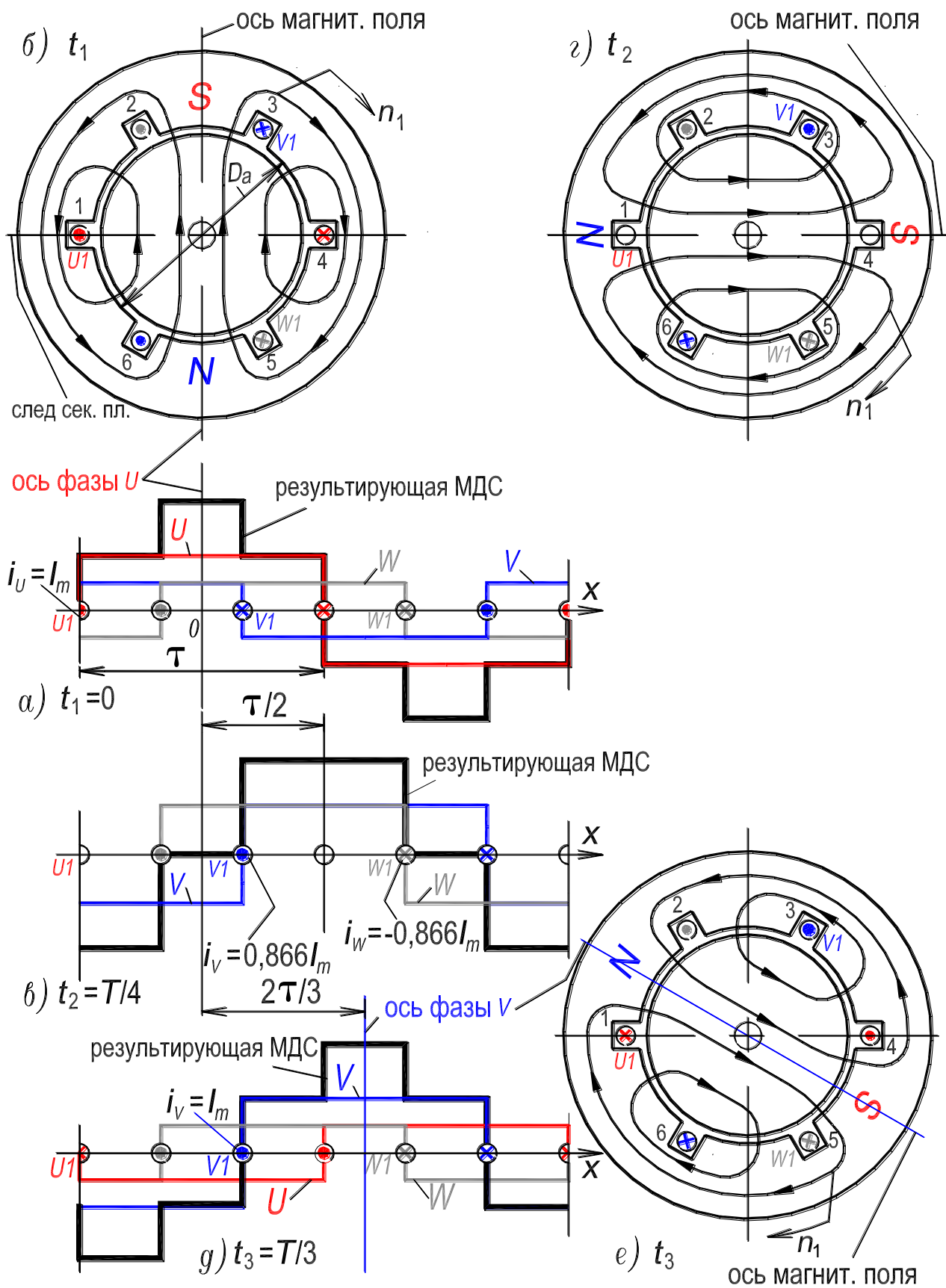


Рисунок 8.19. – МДС и магнитное поле трехфазной обмотки: ($Z = 6$; $2p = 2$; $y = \tau$)
 для моментов времени: $t_1 = 0$ с – (а) и (б); $t_2 = 0,005$ с – (в) и (г); $t_3 \approx 0,0067$ с – (д) и (е)

4. Гармоники порядков 3, 9, 15,... не создают вращающейся волны МДС.

5. В момент времени, когда ток в одной из фаз максимален, ось вращающейся МДС трехфазной обмотки и ось этой фазы совпадают (см. рис. 8.19,а,д).

Для подавления высших гармоник МДС выполняют обмотки с большим числом пазов на полюс и фазу q и с укороченным шагом y . Эти меры действительны и для улучшения формы кривой ЭДС обмотки (см. разд. 8.5).

8.4 Создание вращающегося магнитного поля трехфазной пространственно-распределенной обмоткой двигателя

На рис. 8.20,а,б приведена развернутая схема простейшей обмотки (число пазов $Z = 6$, число пар полюсов $p = 1$, число фаз $m = 3$) и кривые трехфазного тока этой обмотки. На кривых тока обозначены моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4 и t_5 . Мгновенные значения токов в фазах обмотки, для этих моментов, представлены в табл. 8.3.

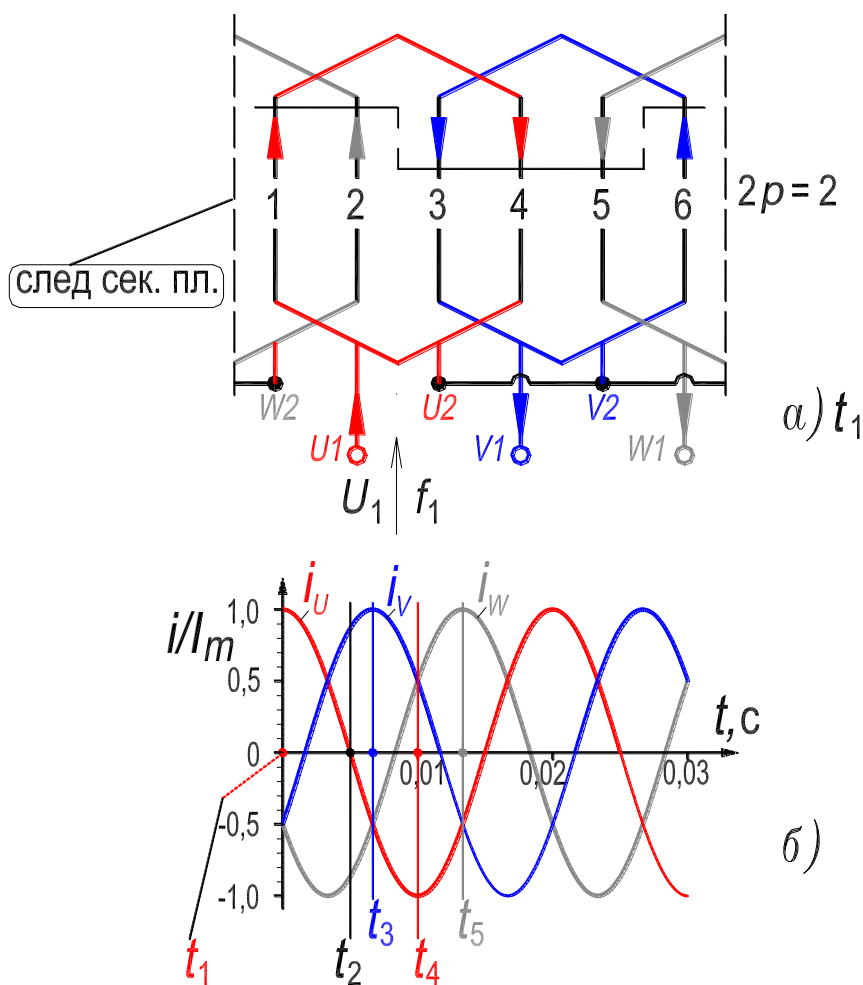


Рисунок 8.20. – Развернутая схема простейшей трехфазной обмотки – (а)
кривые трехфазного тока – (б)

Таблица 8.3. – Мгновенные значения токов в фазах обмотки статора (рис. 8.20,б)

Момент времени t , с	Значение тока в фазе, отн. ед.		
	U	V	W
$t_1 = 0$	1	-0,5	-0,5
$t_2 = 0,005$	0	$\sqrt{3}/2$	$-\sqrt{3}/2$
$t_3 = 0,00667$	-0,5	1	-0,5
$t_4 = 0,01$	-1	0,5	0,5
$t_5 = 0,0133$	-0,5	-0,5	1

Каждая фаза простейшей обмотки статора состоит из одной катушки (начало и конец 1-й фазы обозначены символами $U1$ и $U2$, 2-й фазы – $V1$ и $V2$, 3-й – $W1$ и $W2$). Стороны каждой катушки расположены в пазах смещенных на $Z/2p = \tau = 6/2 = 3$ паза, то есть левая сторона катушки фазы U укладывается в 1-й паз, а правая сторона – в 4-й ($1 + 3 = 4$). Величина τ называется полюсным делением. Оно измеряется количеством зубцов (пазов), приходящихся на один полюс. Кроме того полюсное деление выражают в линейных единицах длины, $\tau = \pi \cdot D_a / 2p$, где D_a – диаметр внутренней полости (расточки) сердечника статора (см. рис. 8.19,б). Другими словами полюсное деление τ – это часть окружности, соответствующая одному полюсу (рис. 8.21,а и 8.22,а). Расстояние между сторонами одной катушки (ширина катушки) называется шагом обмотки и обозначается символом y . Если шаг y равен полюсному делению τ , то он является полным (диаметральным), а обмотка выполняется однослойной. В пазу однослойной обмотки располагается сторона только одной катушки (в пазу двухслойной обмотки располагаются две стороны двух разных катушек, см. рис. 8.12).

Таким образом, на рис. 8.20,а приведена развернутая схема простейшей однослойной трехфазной обмотки с полным (диаметральным) шагом $y = \tau = 3$, а на рис. 8.21,а,б,в,г,д эта обмотка показана в поперечном сечении активной части машины, показано направление тока в фазах и положение силовых линий основного магнитного поля, имеющего одну пару полюсов ($N-S$) и созданного обмоткой статора для пяти моментов времени соответственно t_1, t_2, t_3, t_4 и t_5 .

Каждому моменту времени t_1, t_2, t_3, t_4 и t_5 , зафиксированному на рис. 8.20,б, соответствуют различные мгновенные значения токов в фазах обмотки статора (см. табл. 8.3). Направление токов в сторонах катушек обмотки, показанное на рис. 8.21,а,б,в,г,д знаками «х» и «•», соответствует моментам времени t_1, t_2, t_3, t_4 и t_5 . На схеме обмотки (рис. 8.20,а) показано направление тока стрелками, соответственно моменту времени t_1 . Очевидно, что различным мгновенным значениям тока соответствует и различное положение в пространстве силовых линий магнитного поля (рис. 8.21,а,б,в,г,д).

Как следует из сопоставления положений силовых линий на рис. 8.21,а,б,в,г,д магнитное поле, представленное силовыми линиями, *вращается в направлении чередования фаз*, то есть от фазы **U** к фазе **V**, далее к фазе **W**, потом к фазе **U** и т. д. *Если изменить чередование фаз, то направление вращения поля изменится.*

На рис. 8.21 направление вращения поля (по часовой стрелке) показано стрелкой, а скорость поля обозначена символом « n_1 ». Формула для скорости поля выводится исходя из следующего наблюдения. За время соответствующее половине периода тока (0,01 с при частоте $f_1 = 50$ Гц), прошедшее между моментами времени t_1 и t_4 (рис. 8.20,б), поле повернулось по часовой стрелке на половину оборота (рис. 8.21,а и 8.21,г).

В соответствии с этим, из решения следующей пропорции

$$0,01\text{с} - 0,5 \text{ об.},$$

$$1 \text{ с} - n_1 \text{ об.},$$

получаем искомую формулу для скорости поля,

$$n_1 = 50 \text{ об/с} = f_1 \text{ об/с}. \quad (8.21)$$

Формула (8.21) записана для частного случая, так как вращающееся поле создается двухполюсной обмоткой (число полюсов $2p = 2$, а число пар полюсов $p = 1$). При бóльшем p формула будет записана в общем виде. Промышленность выпускает асинхронные двигатели общепромышленного назначения имеющие $p = 1, 2, 3, 4, 5$ и 6 .

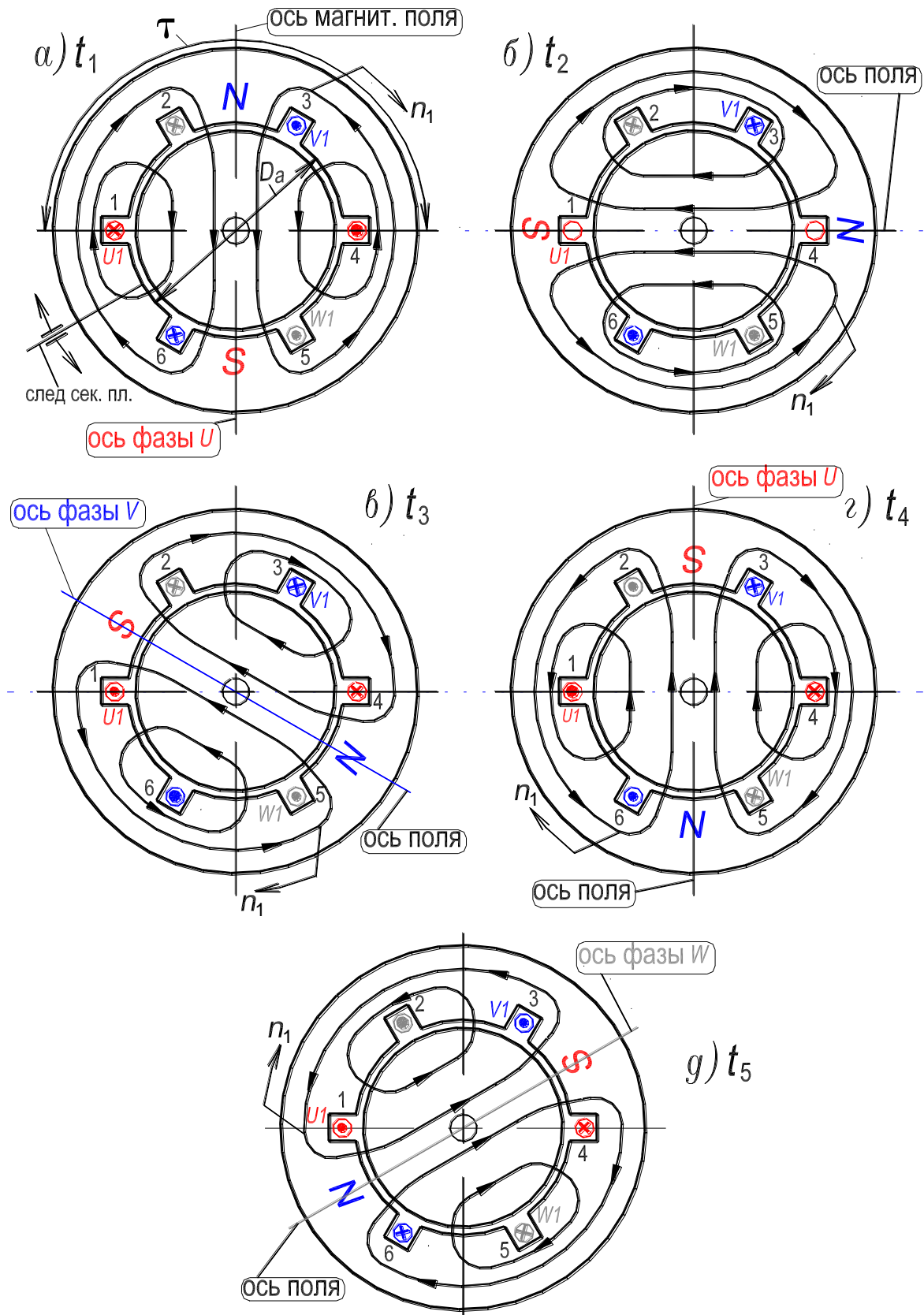


Рисунок 8.21. – Положение силовых линий магнитного поля трехфазной распределенной двухполюсной обмотки – (а, б, в, г, д) в моменты времени t_1, t_2, t_3, t_4, t_5 (см. рис. 8.20, а, б)

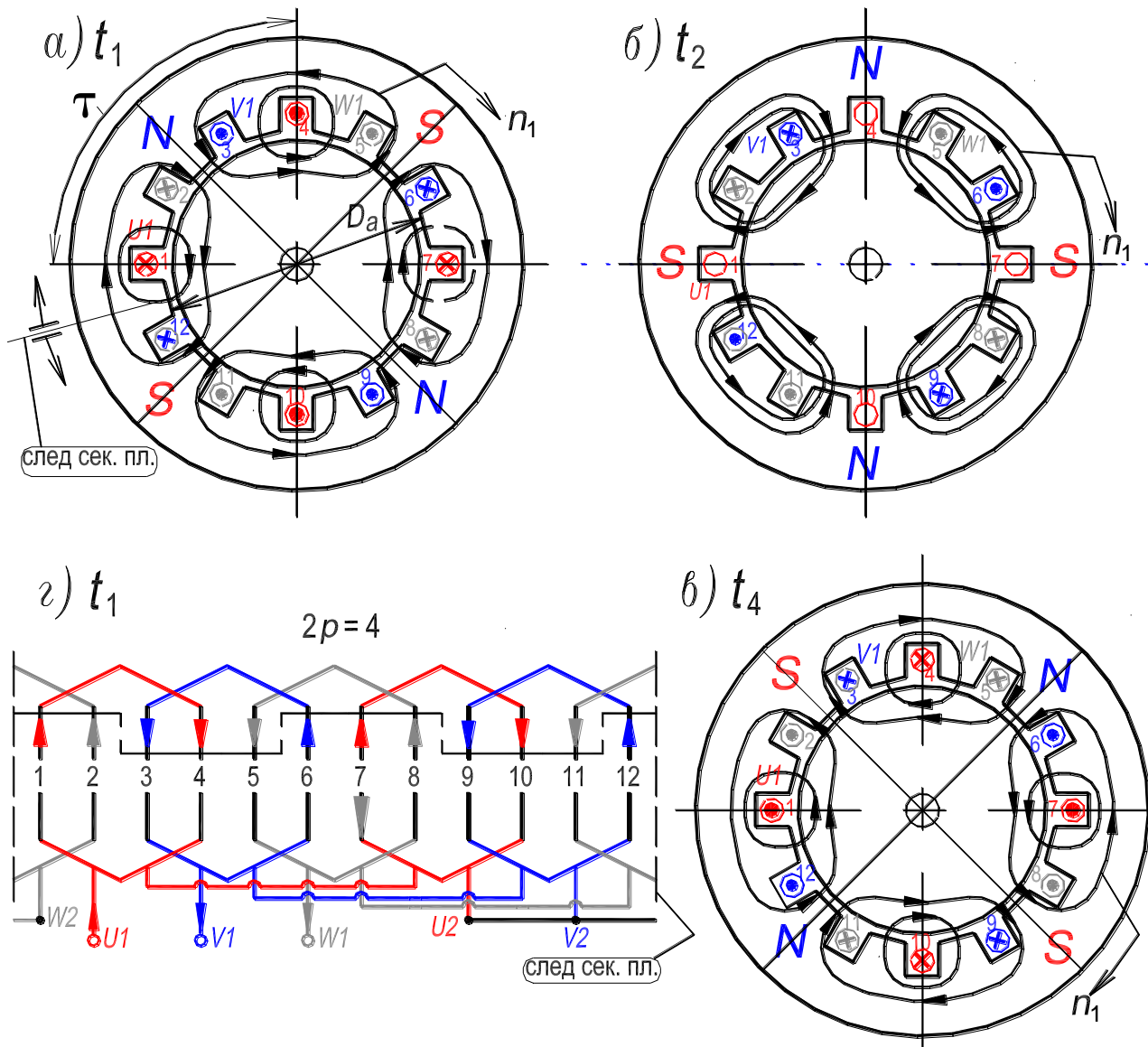


Рисунок 8.22. – Положение силовых линий магнитного поля – (а, б, в) трехфазной распределенной *четырёх*полюсной обмотки – (г) в моменты времени t_1, t_2, t_4 (рис. 8.20,б)

На рис. 8.22,г приведена развернутая схема однослойной *четырёх*полюсной обмотки с полным шагом $y = \tau = 3$ (число пазов $Z = 12$, число пар полюсов $p = 2$, число фаз $m = 3$). На рис. 8.22,а,б,в приведено поперечное сечение активной части *четырёх*полюсного асинхронного двигателя, показано направление тока в фазах и положение силовых линий магнитного поля имеющего две пары полюсов ($N-S$ и $N-S$), созданного обмоткой статора, для трех моментов времени t_1, t_2, t_4 (рис. 8.20,б).

Формула для скорости поля в этом случае (при $p = 2$) выводится исходя из следующего наблюдения. За время соответствующее половине периода тока (0,01 с при частоте $f_1 = 50$ Гц), прошедшее между моментами

времени t_1 и t_4 (рис. 8.20,б), поле повернулось по часовой стрелке на четверть оборота (рис. 8.22,а и 8.22,в). В соответствии с этим, из решения следующей пропорции

$$0,01\text{с} - 0,25 \text{ об.},$$

$$1 \text{ с} - n_1 \text{ об.},$$

получаем искомую формулу для скорости поля, $n_1 = 25 \text{ об/с} = f_1/2 \text{ об/с}$, или в общем виде

$$n_1 = f_1/p \text{ об/с}. \quad (8.22)$$

Число оборотов поля в минуту определится по формуле

$$n_1 = 60 \cdot f_1/p \text{ об/мин}. \quad (8.23)$$

При промышленной частоте $f_1 = 50$ Гц, скорость поля n_1 является неизменной ($n_1 = \text{const}$), наибольшее ее значение составляет 3000 об/мин или 50 об/с. Значения скорости поля при различных числах пар полюсов и частоте $f_1 = 50$ Гц приведены в табл. В.1, с. 8.

Как видно из двух схем трехфазной распределенной обмотки, показанных на рис. 8.20,а и 8.22,г фазы U , V и W обмоток взаимно смещены в пространстве на 120 геометрических градусов на первом рисунке и на 60 геометрических градусов на втором. В теории электрических машин также пользуются понятием электрических градусов. Покажем, что *один геометрический градус в p раз (p – число пар полюсов) больше одного электрического градуса* и, следовательно, фазы U , V и W трехфазных обмоток смещены в пространстве на 120 электрических градусов как на рис. 8.20,а, так и на рис. 8.22,г. Сдвиг в 120° эл. должен быть между фазами *трехфазных* распределенных обмоток, выполненных на любое реальное число пар полюсов, например, $p = 1, 2, 3, 4, 5$ и 6.

Для доказательства развернем активные части двигателей, показанных на рис. 8.21,а и 8.22,а в плоскости, предполагая, что их размеры, в том числе диаметр расточки статора, одинаковы. Развертки активных частей показаны соответственно на рис. 8.23,а и 8.23,б.

На рис. 8.23,*а* обмотка статора создает *двухполюсное* магнитное поле (*N-S*), то есть поле имеет один период (число пар полюсов $p = 1$), который укладывается вдоль окружности расточки статора. Один электрический градус (1° эл.) определяется как $1/360$ часть периода поля, а один геометрический градус (1° геом.) определяется как $1/360$ длины окружности расточки статора. В данном случае, при $p = 1$, эти градусы равны, 1° геом. = 1° эл., и фазы *U*, *V* и *W* двухполюсной обмотки (рис. 8.20,*а*) взаимно смещены в пространстве на 120 электрических градусов.

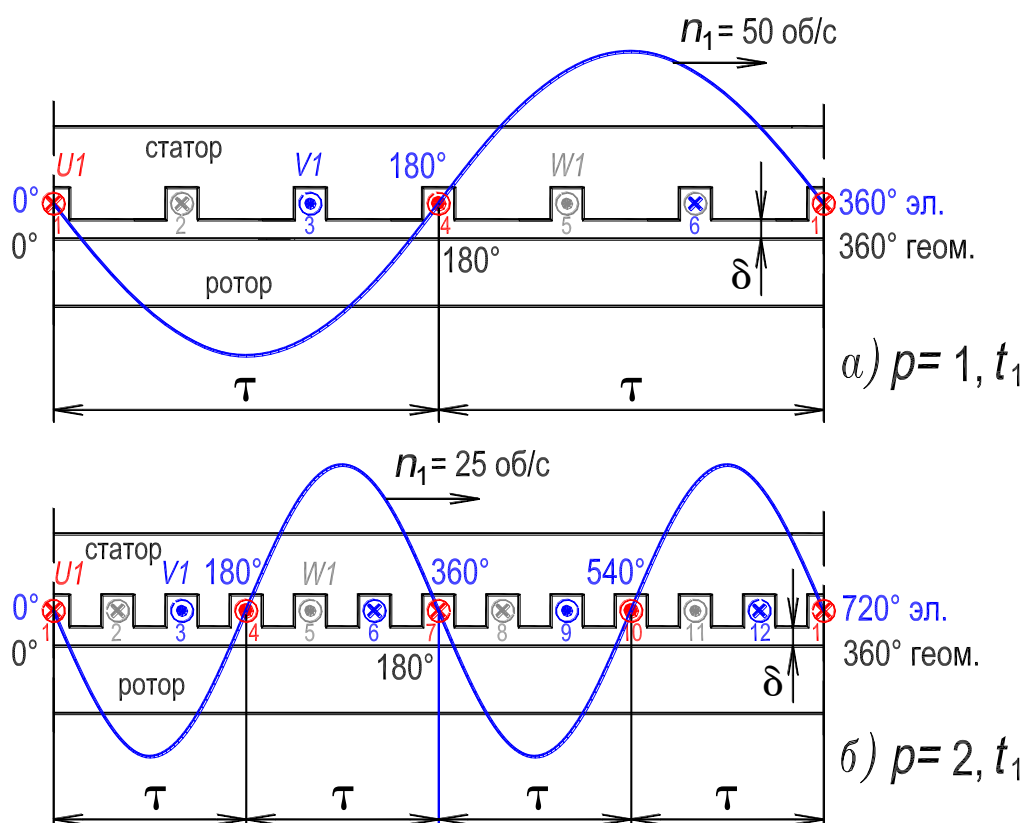


Рисунок 8.23. – Развернутые схемы активной части асинхронного двигателя:
с двухполюсной трехфазной распределенной обмоткой – (а);
с четырехполюсной обмоткой – (б)

На рис. 8.23,*б* обмотка статора создает *четырёхполюсное* магнитное поле (*N-S, N-S*), то есть поле имеет два периода (число пар полюсов $p = 2$), которые укладываются вдоль окружности расточки статора. Как следует из сопоставления рис. 8.23,*а* и 8.23,*б* один электрический градус при $p = 2$ в два раза меньше, чем при $p = 1$. Очевидно, что при $p = 2$ соотношение между геометрическим и электрическим градусами является следующим, 1° геом. = $2 \cdot 1^\circ$ эл., и фазы *U*, *V* и *W* *четырёхполюсной* обмотки (рис. 8.21,*з*)

взаимно смещены в пространстве также на 120 электрических градусов. В общем случае имеем:

$$1^\circ \text{геом.} = p \cdot 1^\circ \text{эл.} \quad (8.24)$$

Вывод. Условия создания вращающегося поля магнитодвижущей силой *трех*фазной распределенной обмотки асинхронного двигателя, имеющей любое число пар полюсов, заключаются в следующем:

1. Фазы U , V и W обмотки должны быть смещены в пространстве на 120 электрических градусов;
2. Токи в фазах U , V и W обмотки должны быть смещены во времени на 120 градусов.

Для того, чтобы двигатель создавал бóльший электромагнитный момент необходимо, чтобы вращающееся поле имело неизменную амплитуду (такое поле называется *круговым*). Это выполняется при равенстве магнитодвижущих сил фаз U , V и W .

Примечание. 1. Как следует из рис. 8.21, *a, в, г, д* ось вращающегося магнитного поля совпадает с осью той фазы U , V или W ток в которой имеет амплитудное значение (см. на рис. 8.20, *a* значения токов фаз в моменты времени t_1 , t_3 , t_4 и t_5). Это также следует и из рис. 8.23, на котором мгновенные значения токов в фазах соответствуют моменту времени t_1 .

2. На рис. 8.23 приведены для удобства анализа кривые *синусоидального* распределения на протяжении полюсного деления двухполюсного и четырехполюсного полей. Фактически магнитное поле в асинхронных двигателях распределяется по более сложному периодическому закону, так как содержит спектры гармоник. Их основными причинами являются: ступенчатый периодический характер распределения магнитодвижущей силы на протяжении полюсного деления, дискретность зубцово-пазового слоя и насыщение участков магнитопровода. При конструировании и изготовлении асинхронных двигателей принимаются меры для подавления высших гармоник в магнитном поле (см. разд. 8.5), так как они отрицательно влияют на свойства двигателя, обуславливая провалы в механической характеристике двигателя, увеличивая потери мощности и снижение КПД и др.

8.5. ЭДС пространственно-распределенной обмотки

В типическом трехфазном трансформаторе все витки обмотки фазы расположены на стержне соосно. Такая обмотка, витки которой расположены на одной оси, называется *сосредоточенной*. Все витки такой обмотки

пересекаются практически одним и тем *пульсирующим* основным магнитным потоком Φ . ЭДС фазы первичной обмотки трансформатора, обусловленная этим потоком, определяется как ЭДС одного витка $e_B = -d\Phi/dt$, умноженная на число витков w_1 , а действующее значение ЭДС E_1 фазы [7], при синусоидальном изменении во времени, определяется по формуле

$$E_1 = 4,44f_1w_1\Phi_m, \quad (8.25)$$

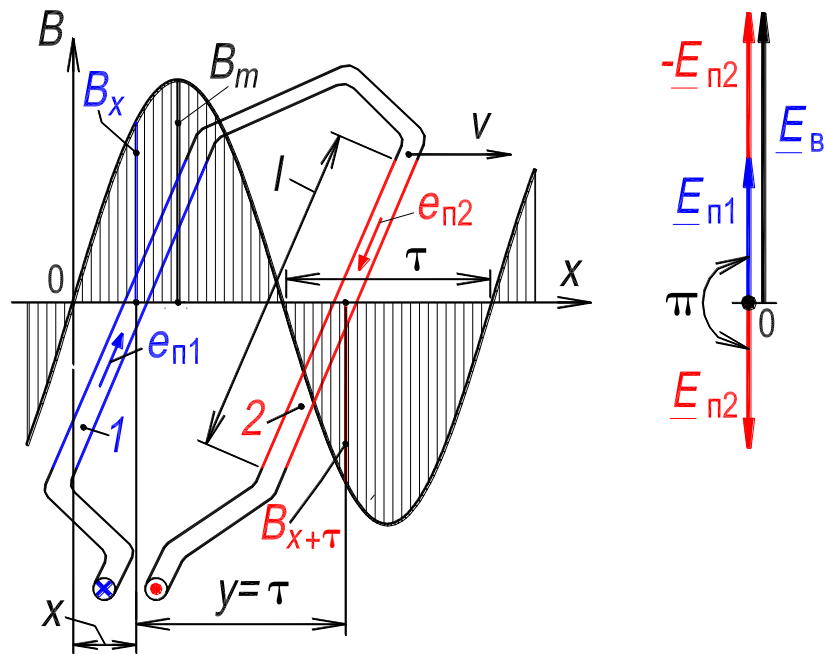
где Φ_m – амплитуда основного магнитного потока, изменяющегося во времени с частотой f_1 .

Действующее значение ЭДС фазы вторичной обмотки трансформатора E_2 определяется подобным же выражением

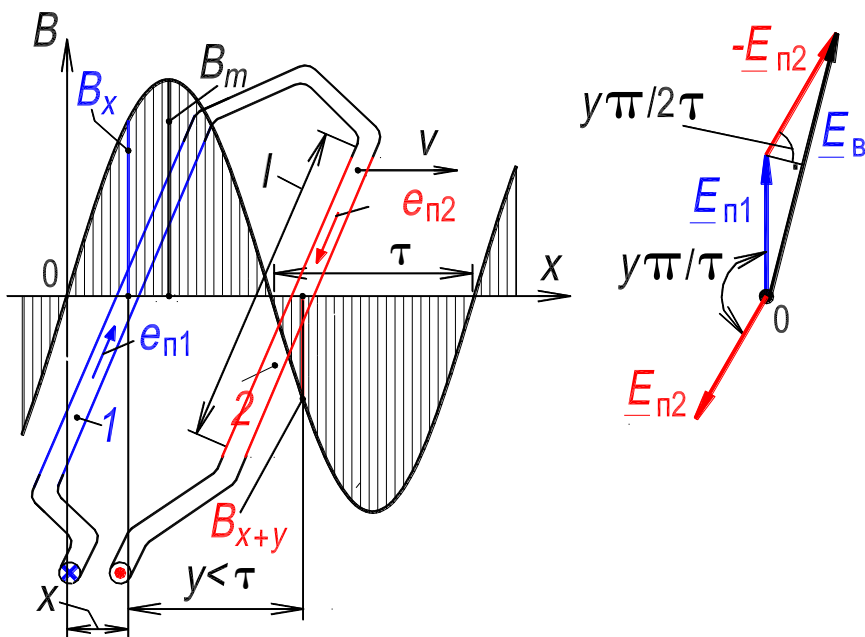
$$E_2 = 4,44f_1w_2\Phi_m. \quad (8.26)$$

Так как трансформатор является статическим устройством, то частота ЭДС и токов его обмоток одна и та же – это частота f_1 электрической сети, в которую включен трансформатор.

В асинхронном двигателе ситуация иная: в обмотке статора напряжение и ток изменяются с частотой f_1 , а в обмотке ротора – с переменной частотой f_2 . Это объясняется тем, что ЭДС в обмотках двигателя индуцируется вращающимся магнитным полем, причем обмотка ротора вращается вместе с ротором. Еще одно отличие от трансформатора заключается в том, что катушки фазы обмоток двигателя уложены в разные пары пазов, то есть смещены в пространстве. Есть и другие отличия. Поэтому применительно к *пространственно-распределенной* трехфазной обмотке двигателя необходимо различать ЭДС витка, катушки, катушечной группы, фазы. У обмотки двигателя различается такое понятие как *шаг обмотки* u – это расстояние между сторонами витка, расположенными в двух пазах; он может быть диаметральной, тогда $u = \tau$, или укороченным, $u = (4/5 \div 6/7)\tau$. Напомним также, что катушечная группа состоит из q последовательно соединенных катушек, которые расположены в q парах соседних пазов, смещенных относительно друг друга на $360^\circ/Z$ геом. градусов. Фаза однослойной обмотки состоит из p катушечных групп (рис. 8.14), а двухслойной — из $2p$ (рис. 8.15). В однослойной обмотке катушечные группы фазы соединяются между собой согласно, а в двухслойной встречно. Катушечные группы фазы могут быть соединены последовательно или параллельно.



а)



б)

Рисунок 8.24. – Процесс наведения ЭДС в витке при его движении в магнитном поле: шаг диаметральный, $y = \tau$ – (а); шаг укороченный, $y < \tau$ – (б)

Запишем выражение для ЭДС витка обмотки двигателя, учитывая, что он состоит из двух активных проводников 1 и 2 длиной l , расположенных в двух пазах. Предполагаем шаг $y = \tau$. Проводники витка соединены встречно. Пусть виток (рис. 8.24,а), движется с постоянной скоростью v относительно магнитного поля машины в направлении оси координат x . Считаем также, что составляющая вектора индукции, нормальная к направлению движения, изменяется в пространстве вдоль оси x по за-

кону синуса (*учитывается только первая гармоническая поля*):

$$B_x = B_m \sin(x \cdot \pi / \tau), \quad (8.27)$$

где $x \cdot \pi / \tau = \gamma$ – пространственная координата x , выраженная в угловых единицах, рад.

Мгновенное значение ЭДС, наводимой в проводнике l , при этих условиях будет изменяться во *времени* также по закону синуса:

$$e_{\text{пл}} = B_x l v = B_m l v \cdot \sin(x \cdot \pi / \tau). \quad (8.28)$$

За время t проводник передвигается на расстояние x , поэтому

$$v = x/t = 2\tau/t = 2\tau/T = 2\tau f_1,$$

где T – время одного периода; f_1 – частота (при $f_1 = 50$ Гц период $T = 0,02$ с).

Так как угловая частота $\omega_1 = 2\pi f_1$ и максимальное значение вращающегося магнитного потока, соответствующего одному полюсному делению τ , равно

$$\Phi_m = B_{\text{ср}} l \tau = (2/\pi) B_m l \tau, \quad (8.29)$$

то мгновенное значение ЭДС в проводнике

$$e_{\text{пл}} = f_1 \Phi_m \cdot \sin(\omega_1 t) = E_{\text{пл.м}} \cdot \sin(\omega_1 t), \quad (8.30)$$

а *действующее значение ЭДС, наведенной в проводнике*, равно

$$E_{\text{пл}} = E_{\text{пл.м}} / \sqrt{2} = \pi f_1 \Phi_m / \sqrt{2} = 2,22 \cdot f_1 \Phi_m. \quad (8.31)$$

Так как проводники в витке смещены на полюсное деление τ (шаг $y = \tau$), то плоскость витка пересекает магнитный поток всего полюса (рис. 8.24,а). Поэтому *действующее значение ЭДС витка* будет удвоенным по отношению к ЭДС проводника, то есть

$$E_{\text{в}} = 2\pi f_1 \Phi_m / \sqrt{2} = 4,44 \cdot f_1 \Phi_m. \quad (8.32)$$

Если виток выполнить с укороченным шагом ($y < \tau$), то плоскость витка будет пересекаться несколько меньшим магнитным потоком, и ЭДС витка также будет меньше (рис. 8.24,б). Это учитывается коэффициентом укорочения шага k_y , который несколько меньше единицы ([см. разд. 8.5.1](#))

$$E_{\text{в}} = 4,44 \cdot f_1 \Phi_m k_y. \quad (8.33)$$

Катушка обмотки содержит несколько последовательно соединенных витков w_k . Если стороны катушки смещены на τ , то *действующее значение ЭДС катушки* равно

$$E_K = 4,44 \cdot f_1 w_K \Phi_m. \quad (8.34)$$

Если шаг $y < \tau$, то действующее значение ЭДС катушки

$$E_K = 4,44 \cdot f_1 w_K \Phi_m k_y. \quad (8.35)$$

Катушечная группа состоит из q последовательно соединенных катушек, которые расположены в q парах соседних пазов. Векторы ЭДС в этих катушках будут смещены по фазе на угол $\alpha = p \cdot 360^\circ / Z$ эл. градусов (рис. 8.25,а), поэтому действующее значение ЭДС катушечной группы записывается следующим образом (предполагаем, что $y < \tau$)

$$E_{K,\Gamma} = 4,44 \cdot f_1 w_{K,\Gamma} \Phi_m k_y k_p, \quad (8.36)$$

где $w_{K,\Gamma} = q w_K$ – число витков в катушечной группе; k_p – коэффициент распределения, учитывающий небольшое уменьшение 1-й гармонической ЭДС катушечной группы $E_{K,\Gamma}$, за счет распределения катушек по пазам и, в связи с этим, сдвига по фазе векторов ЭДС катушек. Коэффициент распределения несколько меньше единицы (см. разд. 8.5.1).

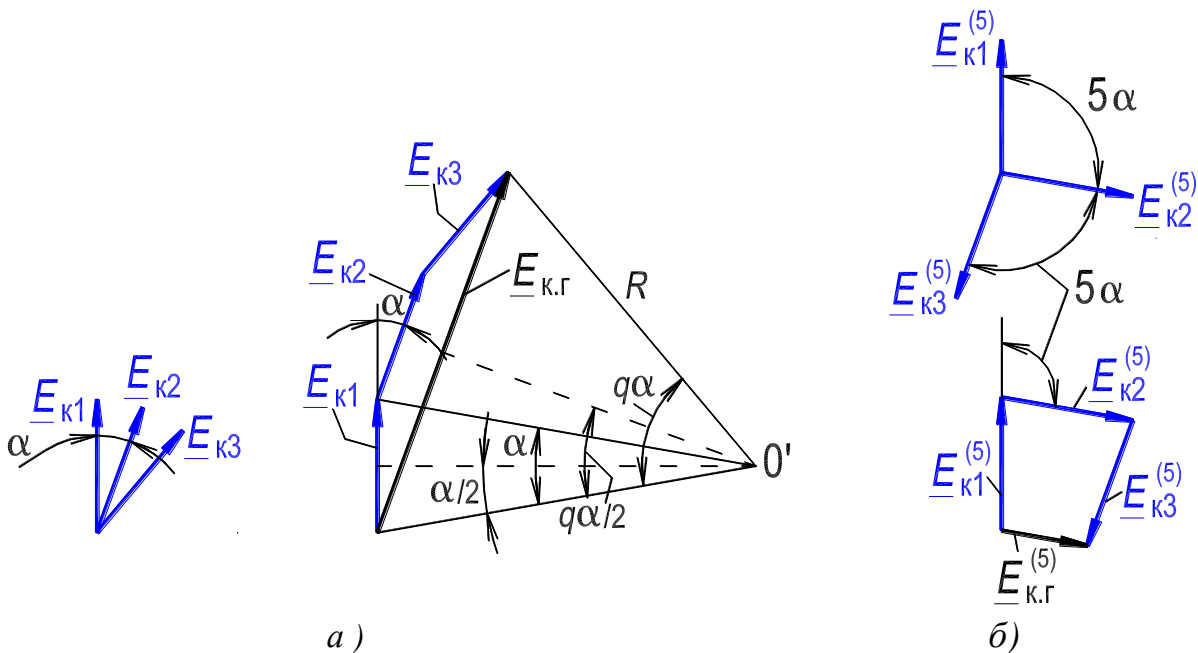


Рисунок 8.25. – Сложение ЭДС в катушечной группе: первые гармонические ЭДС – (а); пятые гармонические ЭДС – (б)

В фазе однослойной обмотки содержится p последовательно соединенных катушечных групп (предполагаем, что параллельных ветвей в фазе нет), поэтому число последовательно соединенных витков в фазе $w_\phi = p w_{K,\Gamma} = p q w_K$ (проводники стороны катушки в однослойной обмотке

соответствуют всему пазу, рис. 8.14). В фазе двухслойной обмотки содержится $2p$ последовательно соединенных катушечных групп (предполагаем, что параллельных ветвей в фазе нет), а витки катушки занимают половину паза (рис. 8.15) поэтому число последовательно соединенных витков в фазе будет таким же как и в фазе однослойной обмотки, то есть $w_\phi = pqw_k$. Таким образом действующее значение ЭДС фазы определится как

$$E_\phi = 4,44 \cdot f_1 w_\phi \Phi_m k_y k_p. \quad (8.37)$$

В некоторых случаях, например, с целью улучшения формы кривой ЭДС фазы, то есть приближения кривой к синусоиде, обмотку целесообразно располагать в скошенных пазах на величину b_c (рис. 8.26 и 8.27). При скошенных пазах действующее значение ЭДС фазы несколько уменьшается, что учитывается коэффициентом скоса k_c несколько меньшим единицы. С учетом коэффициента скоса формула для действующего значения первой гармонической фазной ЭДС, записывается так:

$$E_\phi = 4,44 \cdot f_1 w_\phi \Phi_m k_y k_p k_c = 4,44 \cdot f_1 w_\phi \Phi_m k_o, \quad (8.38)$$

где $k_o = k_y k_p k_c$ – обмоточный коэффициент, который учитывает укорочение шага обмотки, распределение катушек обмотки по пазам и скос пазов. В формуле (8.38) магнитный поток выражен в Веберах (Вб), а ЭДС в Вольтах (В).

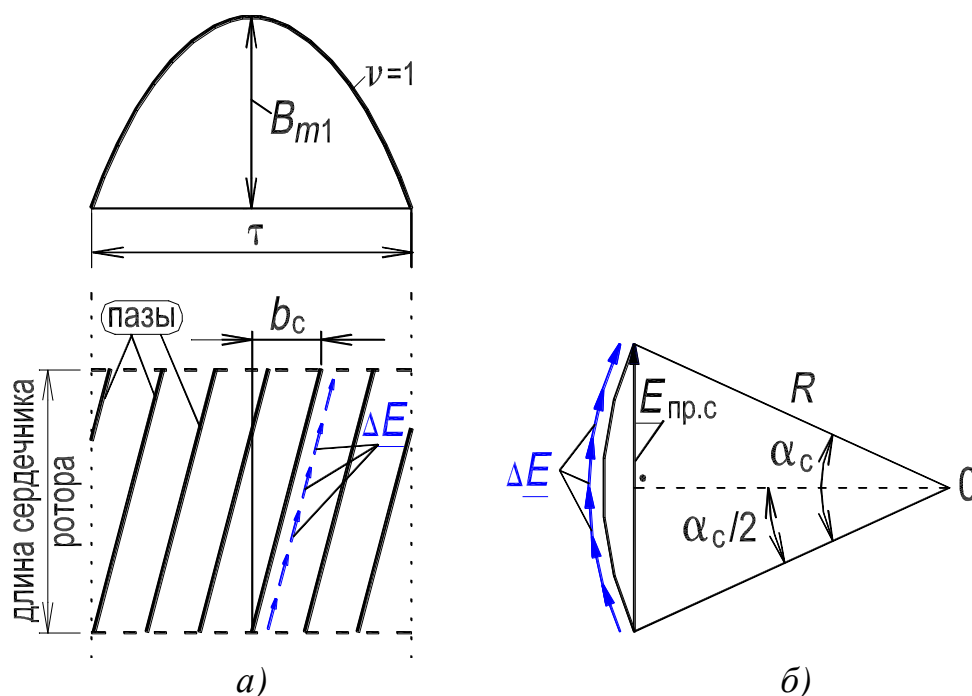


Рисунок 8.26. – Первая гармоническая ЭДС проводника при скосе пазов – (а); определение ЭДС проводника при скосе пазов – (б)

Вывод формул для определения составляющих обмоточного коэффициента приведен в разд. 8.5.1. Перечисленные особенности устройства обмоток реализуют на практике с целью исключения высших гармонических в кривой ЭДС (а также в кривой МДС, см. разд. 8.3).

Выше дан вывод для ЭДС проводника, витка, катушечной группы и фазы пространственно-распределенной трехфазной обмотки двигателя в предположении синусоидального распределения магнитного поля на полюсном делении. Однако реально *магнитная индукция вдоль окружности воздушного зазора распределяется несинусоидально*. Расчет ЭДС, наводимой в обмотке при ее относительном движении в несинусоидальном магнитном поле, выполняют в общем случае *методом гармонического анализа*. Кратко проанализируем этот вопрос [3, 4].

Кривую индукции разлагают в гармонический ряд, который содержит обычно лишь нечетные члены, так как распределение поля бывает одинаковым под соседними полюсами.

Действующее значение ЭДС определяется по формуле, аналогичной (8.38), отдельно для каждой ν -й гармонической магнитного поля:

$$E_{\nu\phi} = 4,44 \cdot f_{\nu} w_{\phi} \Phi_{\nu m} k_{ov}. \quad (8.39)$$

Наиболее характерными являются случаи, когда $f_{\nu} = \nu f_1$ или $f_{\nu} = f_1$.

Первый случай ($f_{\nu} = \nu f_1$) имеет место в *синхронной машине* при создании поля обмоткой возбуждения постоянного тока [3, 4], расположенной на роторе. Все гармонические поля возбуждения передвигаются относительно обмотки статора (якоря) с одинаковыми скоростями и их сумма, характеризующая форму распределения магнитного поля в зазоре на полюсном делении, остается при движении неизменной. То есть поле возбуждения и его первая и высшие гармонические вращаются с одной и той же скоростью ротора (индуктора), $n_1 = n_{\nu} = n$. Так как число пар полюсов ν -й гармонической поля в ν раз больше чем у первой гармонической, $p_{\nu} = \nu p_1$, то гармонические поля индуцируют в проводнике обмотки гармонические ЭДС с частотой равной $f_{\nu} = p_{\nu} n_{\nu} = \nu p_1 n_1 = \nu f_1$. Для исключения высших гармоник ЭДС в обмотке статора (якоря) синхронного генератора осуществляют укорочение шага обмотки, распределение ее по пазам и скос полюсного наконечника полюсов возбуждения [3, 4].

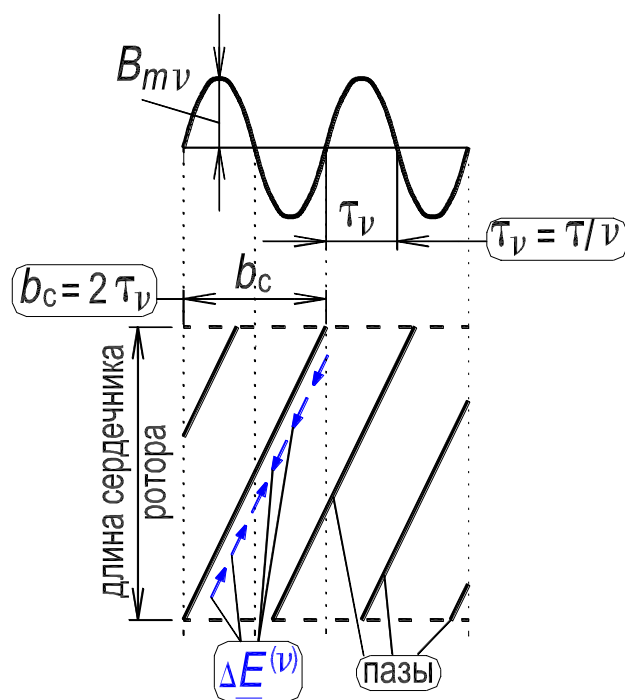


Рисунок 8.27. – Иллюстрация исключения v -й гармонической ЭДС проводника при скосе пазов на двойное полюсное деление $2\tau_v$

Второй случай ($f_v = f_1$) имеет место в асинхронной машине, когда магнитное поле машины создается трехфазной пространственно-распределенной обмоткой переменного тока, по которой проходит синусоидальный ток частоты f_1 . Пространственное распределение магнитного поля в воздушном зазоре при этом испытывает в процессе движения периодические изменения, так как отдельные гармонические поля, имея неизменную амплитуду, движутся со скоростями, обратно пропорциональными их порядковому номеру, $n_v = n_1/v$. При этих условиях любая пространственная гармоническая поля наводит в обмотке ЭДС неизменной частоты f_1 ($f_v = p_v n_v = v p_1 n_1/v = f_1$), и хотя поле распределено в пространстве несинусоидально, суммарное потокосцепление синусоидально изменяется во времени и наводит в обмотке суммарную синусоидальную ЭДС. Формула для действующего значения этой суммарной фазной ЭДС в обмотке двигателя, при совпадении всех гармонических составляющих ЭДС по фазе, записывается следующим образом

$$E_{\Phi} = 4,44 \cdot f_1 w_{\Phi} \Sigma(\Phi_{vm} k_{ov}), \quad (8.40)$$

где $k_{ov} = k_{yv} k_{pv} k_{cv}$ – обмоточный коэффициент по v -й гармонической; $\Phi_{vm} = (2/\pi) B_{mv} l \tau_{1/v}$ – максимальное значение вращающейся v -й гармонической магнитного потока, соответствующего одному полюсному делению

τ_1/v этой гармонической [см. формулу (8.29)] [если рассматривается только первая гармоническая ($v = 1$), то индекс «1» можно опустить].

Для исключения высших гармоник ЭДС в обмотке статора асинхронного двигателя, а также исключения высших гармоник МДС осуществляют укорочение шага обмотки, распределение ее по пазам и скос пазов [3, 4].

В дальнейшем изложении будем пользоваться для действующего значения фазной ЭДС обмотки статора формулой (8.38) (это первичная обмотка асинхронного двигателя). Индекс «ф» в выражении (8.39) заменим на индекс «1» и будем считать, что в формулу (8.41) включен обмоточный коэффициент k_{o1} по первой гармонической

$$E_1 = 4,44 \cdot f_1 w_1 \Phi_m k_{o1}. \quad (8.41)$$

В обмотке ротора двигателя (для определенности рассмотрим фазную обмотку ротора, рис. 8.4) вращающееся поле двигателя также индуцирует ЭДС. Выражение для действующего значения фазной ЭДС обмотки ротора (это вторичная обмотка) записывается аналогично формуле (8.41), следующим образом:

$$E_{2s} = 4,44 \cdot f_{2s} w_2 \Phi_m k_{o2}. \quad (8.42)$$

Индекс «s» отражает тот факт, что ЭДС во вторичной обмотке двигателя и ее частота, зависят от скольжения s и, соответственно, скорости n ротора, причем $f_{2s} = s f_1$ (частота f_{2s} называется частотой скольжения). В формуле (8.42) k_{o2} – обмоточный коэффициент по первой гармонической обмотки ротора. Частота скольжения f_{2s} является переменной, в начальный момент пуска двигателя $f_{2s} = f_1 = 50$ Гц, а при холостом ходе $f_{2s} \approx (1 \div 3)$ Гц. Изменение частоты в обмотке ротора существенно влияет на свойства двигателя.

Отметим, что в трансформаторе частота ЭДС и тока во вторичной обмотке неизменна и равна f_1 , то есть такая же как и в первичной обмотке [сопоставить формулы (8.25), (8.26) для трансформатора и формулы (8.41), (8.42) для двигателя].

8.5.1. Обмоточный коэффициент обмотки двигателя

Для определенности рассматриваем трехфазную шестизонную обмотку статора (см. разд. 8.2).

Обмоточный коэффициент $k_o = k_y k_p k_c$. имеет три составляющих: k_y – коэффициент укорочения шага обмотки; k_p – коэффициент распреде-

ления обмотки; k_c – коэффициент скоса. Обмоточный коэффициент по первой гармонике, $\nu = 1$, незначительно меньше единицы. Это приводит к небольшому уменьшению первой гармоники ЭДС (МДС). По высшим гармоникам, $\nu = 5, 7, 11, 13, \dots$, обмоточный коэффициент имеет значение близкое к нулю. В результате высшие гармоники ЭДС (МДС) значительно уменьшаются.

При определении обмоточных коэффициентов $k_{ov} = k_{yv}k_{pv}k_{cv}$ высших гармонических следует иметь в виду, что одному полюсному делению τ первой гармонической поля соответствуют три полюсных деления третьей гармонической, пять полюсных делений пятой гармонической и т. д. (рис. 8.28). Поэтому две катушки, сдвинутые между собой в поле первой гармонической на угол α , в поле третьей гармонической будут сдвинуты на угол $3 \cdot \alpha$, а в поле ν -й гармонической – на угол $\nu \cdot \alpha$ (рис. 8.25).

8.5.1.1. Коэффициент укорочения шага обмотки

Проводники витка с полным (диаметральным) шагом расположены на расстоянии полюсного деления, т. е. $y = \tau$ (рис. 8.24,а). Примем, что магнитное поле вдоль полюсного деления τ распределяется по синусоидальному закону. Проводник 2 занимает такое же положение по отношению к южному полюсу, как проводник 1 по отношению к северному, поэтому в обоих проводниках одновременно наводятся одинаковые ЭДС, векторы которых смещены во времени на π рад. Так как проводники 1 и 2 соединены в витке встречно, то при $y = \tau$ ЭДС витка E_v равна удвоенному значению ЭДС проводника [см. формулу (8.32) и рис. 8.24,а].

Проводники витка с укороченным шагом располагаются на расстоянии $y < \tau$, они занимают в магнитном поле по отношению к полюсам различное положение (рис. 8.24,б). Для уменьшения 5 и 7-й гармоник укороченный шаг принимают равным $y = (4/5 \div 6/7)\tau$. Укороченный шаг выражают в угловых единицах на основе пропорции:

$$\tau - \pi,$$

$$y - \beta.$$

Откуда шаг y , выраженный в угловых единицах составляет $\beta = y\pi/\tau$, рад. На рис. 8.24,б показан виток с шагом $y \approx (4/5)\tau$, и приведена векторная диаграмма ЭДС в витке. Векторы ЭДС в проводниках 1 и 2 смещены на угол $\beta = y\pi/\tau$. Поэтому ЭДС витка при укороченном шаге бу-

дет больше ЭДС проводника только в $2 \cdot \sin(y\pi/2\tau)$ раза, а не в 2 раз, как при $y = \tau$ (см. рис. 8.24,а,б).

Коэффициент

$$k_y = \sin(y\pi/2\tau) \quad (8.43)$$

называется *коэффициентом укорочения* по первой гармонической ЭДС (МДС) [см. выражения (8.33), (8.37) и (8.16), (8.20)].

При шаге $y = (4/5)\tau$ коэффициент $k_y = 0,951$, при шаге $y = \tau$ – коэффициент $k_y = 1$. Таким образом, укорочение шага двухслойной обмотки приводит к незначительному уменьшению первой гармоники ЭДС (МДС)

Расположение векторов высших гармонических ЭДС проводников витка с укороченным шагом отличается от расположения векторов первой гармонической вследствие меньшего периода изменения высших гармонических. На рис. 8.28 полюсное деление v -й гармоники поля составляет $\tau_v = \tau/v$. Поэтому угол сдвига между векторами высших гармонических ЭДС проводников равен $\beta_v = v(y\pi/\tau)$ и коэффициент укорочения для них

$$k_{yv} = \sin(y\pi/2\tau_v) = \sin(vy\pi/2\tau). \quad (8.44)$$

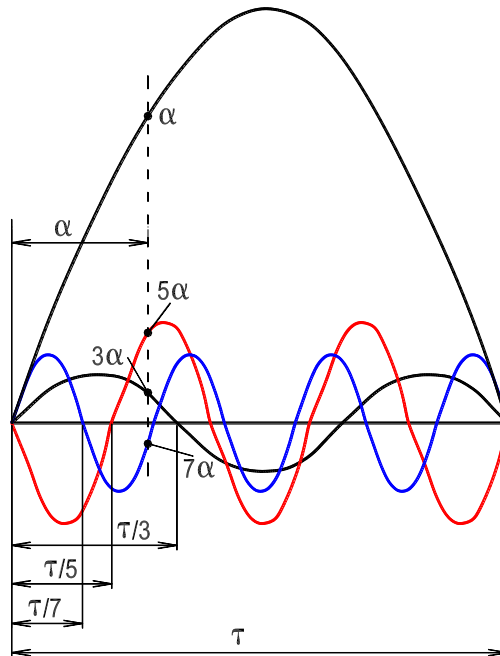


Рисунок 8.28. – Разложение в гармонический ряд кривой магнитного поля в воздушном зазоре машины

Для 5-й гармоники коэффициент равен нулю, $k_{y5} = 0$, то есть 5-я гармоника исключается из кривой ЭДС (МДС), для 7-й гармоники $k_{y7} = 0,0153$. Значительно уменьшаются и другие высшие гармоники.

8.5.1.2. Коэффициент распределения обмотки

В катушечной группе q катушек фазной обмотки занимают q пар соседних пазов (см. разд. 8.2), и если катушки выполнены с одинаковым шагом витка, то векторы первой гармонической ЭДС соседних катушек сдвинуты по фазе на угол $\alpha = p2\pi/Z$, соответственно сдвигу сторон соседних катушек в магнитном поле (см. рис. 8.13). Все q катушек катушечной группы соединяются последовательно и поэтому вектор ЭДС катушечной группы равен геометрической сумме векторов ЭДС катушек, входящих в группу. На рис. 8.25,а показаны три вектора ЭДС катушек, сдвинутых относительно друг друга на угол α (принято $q = 3$, $\alpha = 20^\circ$ эл.) и представлена векторная диаграмма ЭДС катушечной группы, состоящей из $q = 3$ катушек. Как следует из рисунка вектор ЭДС катушечной группы $\underline{E}_{к.г.}$, равный геометрической сумме векторов ЭДС 3-х катушек, составляет $2 \cdot R \cdot \sin(q\alpha/2)$, где R – радиус описанной окружности вокруг многоугольника, образованного тремя векторами ЭДС $\underline{E}_{к1}$, $\underline{E}_{к2}$ и $\underline{E}_{к3}$, катушек катушечной группы. Очевидно, что арифметическая сумма векторов ЭДС 3-х катушек, составляет $2 \cdot R \cdot q \cdot \sin(\alpha/2)$. Это выполнялось бы в том случае, если бы все три катушки были расположены только в двух пазах, а не были распределены в пространстве, то есть реально расположены в трех парах соседних пазов ($q = 3$). Отношение геометрической суммы ЭДС к арифметической сумме ЭДС составит

$$k_p = \text{геом. сумма/арифм. сумма} = [2 \cdot R_{к.г.} \cdot \sin(q\alpha/2)] / [2 \cdot R_{к.г.} \cdot q \cdot \sin(\alpha/2)] = [\sin(q\alpha/2)] / [q \cdot \sin(\alpha/2)]. \quad (8.45)$$

Коэффициент k_p называется *коэффициентом распределения* по первой гармонической ЭДС (МДС) [см. выражения (8.36), (8.37) и (8.16), (8.20)].

Рис. 8.25,а изображен в предположении, что $q = 3$ и $\alpha = 20^\circ$ эл., тогда коэффициент распределения по первой гармонической ЭДС (МДС) составит

$$k_p = (\sin 30^\circ) / (3 \sin 10^\circ) = 0,96.$$

Таким образом, распределение катушек по пазам фазной обмотки приводит к незначительному уменьшению первой гармоники ЭДС (МДС).

Угол сдвига векторов высших гармонических ЭДС катушек, расположенных в парах соседних пазов, больше угла сдвига по первой в ν раз, $\alpha_\nu = \nu \cdot \alpha$, так как число пар полюсов ν -й гармоники в ν раз больше, чем у первой, $p_\nu = \nu \cdot p$ (рис. 8.25,б). Поэтому коэффициент распределения по ν -й гармонике запишется в виде

$$k_p = [\sin(\nu q \alpha / 2)] / [q \cdot \sin(\nu \alpha / 2)]. \quad (8.46)$$

Для 5-й гармоники ЭДС (МДС) коэффициент распределения, $k_{p5} = 0,28$, а для 7-й – $k_{p7} = 0,177$. Пятая, седьмая и другие высшие гармоники значительно уменьшаются.

Распределение катушек по пазам, так же как укорочение шага витка, приводит к улучшению формы ЭДС (МДС) обмотки, приближая ее к синусоиде [см. выражения (8.40) и (8.20)].

8.5.1.3. Коэффициент скоса

В ряде случаев для улучшения формы ЭДС пазы, в которые укладываются проводники (или полюсные наконечники), располагаются по винтовой линии под небольшим углом α_c к образующей цилиндрической поверхности статора (или ротора). Тогда фаза ЭДС ΔE , наводимой в участках проводника первой гармонической магнитной индукции, непрерывно изменяется по длине проводника l в соответствии с углом скоса $p\alpha_c = \arctg(\pi b_c / \tau) \approx \pi b_c / \tau$, рад. (рис. 8.26). В этом случае для определения ЭДС в проводнике необходимо сложить векторы ЭДС $\Delta \underline{E}$ всех участков проводника. При малой длине участка эти векторы располагаются по дуге с центральным углом $p\alpha_c$, и их сумма соответствует хорде, стягивающей эту дугу (рис. 8.26,б). При делении проводника на m участков центральный угол для каждого вектора $\Delta \underline{E}$ будет $p\alpha_c / m$ и величина радиуса описанной окружности

$$R = \Delta E / 2 \sin(p\alpha_c / 2m). \quad (8.47)$$

Величина ЭДС в скошенном проводнике (длина хорды)

$$E_{\text{пр.с}} = 2R \sin(p\alpha_c / 2) = [\Delta E \sin(p\alpha_c / 2)] / [\sin(p\alpha_c / 2m)]. \quad (8.48)$$

При большом количестве участков $\sin(p\alpha_c / 2m) \approx p\alpha_c / 2m$, в этом случае

$$E_{\text{пр.с}} = [m\Delta E \sin(p\alpha_c/2)] / (p\alpha_c/2). \quad (8.49)$$

Так как $m\Delta E$ представляет собой арифметическую сумму ЭДС всех участков, а именно, ЭДС проводника $E_{\text{п}}$ без учета скоса, то

$$E_{\text{п.с}} = [E_{\text{п}} \sin(p\gamma_c/2)] / (p\gamma_c/2) = E_{\text{п}} k_c, \quad (8.50)$$

$$\text{где } k_c = [\sin(p\gamma_c/2)] / (p\gamma_c/2) - \quad (8.51)$$

коэффициент скоса для первой гармоники ЭДС.

Уменьшение ЭДС вследствие скоса проводников относительно магнитного поля учитывается коэффициентом скоса k_c . Таким образом, в общем случае действующее значение ЭДС в проводнике [см. выражение (8.31)]

$$E_{\text{п.с}} = 2,22 k_c f_1 \Phi_m. \quad (8.52)$$

Обычно угол скоса мал и значение k_c для первой гармонической ЭДС получается близким к единице. Например, если дуга b_c , на которую скошены пазы одного торца статора относительно другого (рис. 8.26,а), составляет $\tau/6$, то угол скоса, соответствующий этой дуге,

$$p\alpha_c = \pi b_c / \tau = \pi/6, \text{ рад}$$

и коэффициент скоса

$$k_c = [\sin(p\alpha_c/2)] / (p\alpha_c/2) = 0,989,$$

т.е. вследствие скоса ЭДС уменьшается на 1,1 %.

Для высших гармонических ЭДС коэффициент скоса

$$k_{cv} = [\sin(v\pi b_c/2\tau)] / (v\pi b_c/2\tau) \quad (8.53)$$

может быть значительно меньше единицы (рис. 8.27).

8.6. Параметры обмоток асинхронной машины

8.6.1. Главное поле и поле рассеяния

Рассмотрим магнитное поле в асинхронной машине с двумя трехфазными обмотками, одна из которых расположена на статоре, другая – на роторе.

Считая относительную магнитную проницаемость магнитопроводов статора и ротора бесконечно большой ($\mu_r = \infty$), можно представить магнитное поле такой машины в установившемся режиме в виде двух полей: *главного* поля и поля *рассеяния*. Силовые магнитные линии этих полей замыкаются по разным путям (контурам).

Главным называют магнитное поле, соответствующее *основной (первой) гармонической* распределения *радиальной* составляющей индукции в зазоре. Это поле выполняет основную роль в процессе преобразования энергии. При $\mu_r = \infty$ главное поле можно представить состоящим из двух *взаимно неподвижных* полей: главного поля статора, образованного токами в обмотке статора, и главного поля ротора, образованного токами в обмотке ротора.

Силовые линии *главного* магнитного поля машины замыкаются по замкнутым контурам вдоль ярм статора и ротора, вдоль их зубцов и дважды пересекают радиальный зазор между статором и ротором (см. рис. 8.21 и 8.22). Силовые линии *главного* магнитного поля сцеплены с обеими обмотками машины (статора и ротора). Это поле определяет индуктивное сопротивление взаимной индукции $X_{12} = X_m$.

Силовые линии *магнитного поля рассеяния* сцеплены только с создавшей это поле обмоткой. Поле рассеяния, *созданное токами обмотки статора*, определяет ее индуктивное сопротивление рассеяния $X_{\sigma 1}$. Поле рассеяния, *созданное токами обмотки ротора*, определяет индуктивное сопротивление рассеяния $X_{\sigma 2}$. В магнитном поле рассеяния выделяют три составляющие: поле пазового рассеяния; поле лобового рассеяния; поле дифференциального рассеяния (это поля высших гармонических в зазоре между статором и ротором). Кроме того различают поле рассеяния по коронкам зубцов (коронка – это часть зубца, обращенная к зазору δ). На рис. 8.29 показано распределение в пространстве силовых линий составляющих магнитного поля рассеяния.

8.6.2. Активные и индуктивные сопротивления обмоток

Параметрами асинхронной машины являются активные и индуктивные сопротивления. Вместо индуктивных сопротивлений удобно применять индуктивности: полные – L , взаимные – M и рассеяния – L_σ . Таким образом, L , M , L_σ , R обмоток машины есть параметры машины.

Активное сопротивление фазы обмотки определяется по формуле

$$R = (\rho l/s)k_r, \quad (8.54)$$

где l – длина проводника; s – поперечное сечение проводника; k_r – коэффициент, учитывающий увеличение активного сопротивления за счет не-

равномерного распределения тока по сечению проводника; ρ – удельное сопротивление материала проводника, которое зависит от температуры обмоток.

При расчетах сопротивление проводника приводится к расчетной температуре t_2 , принимаемой равной 75°C

$$R_2 = R_1[1 + \alpha(t_2 - t_1)], \quad (8.55)$$

где R_1 – сопротивление проводника при температуре t_1 ; R_2 – сопротивление проводника при температуре t_2 .

В табл. 8.4 приведены значения ρ при температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$.

Таблица 8.4. – Значение удельного электрического сопротивления и температурного коэффициента сопротивления материала проводников

Материал проводника	Удельное электрическое сопротивление $\rho_{20^\circ\text{C}}$, Ом·мм ² /м	Температурный коэффициент сопротивления α , 1/ $^\circ\text{C}$
Серебро	0,016	0,004
Медь	0,0175	0,004
Алюминий	0,029	0,004

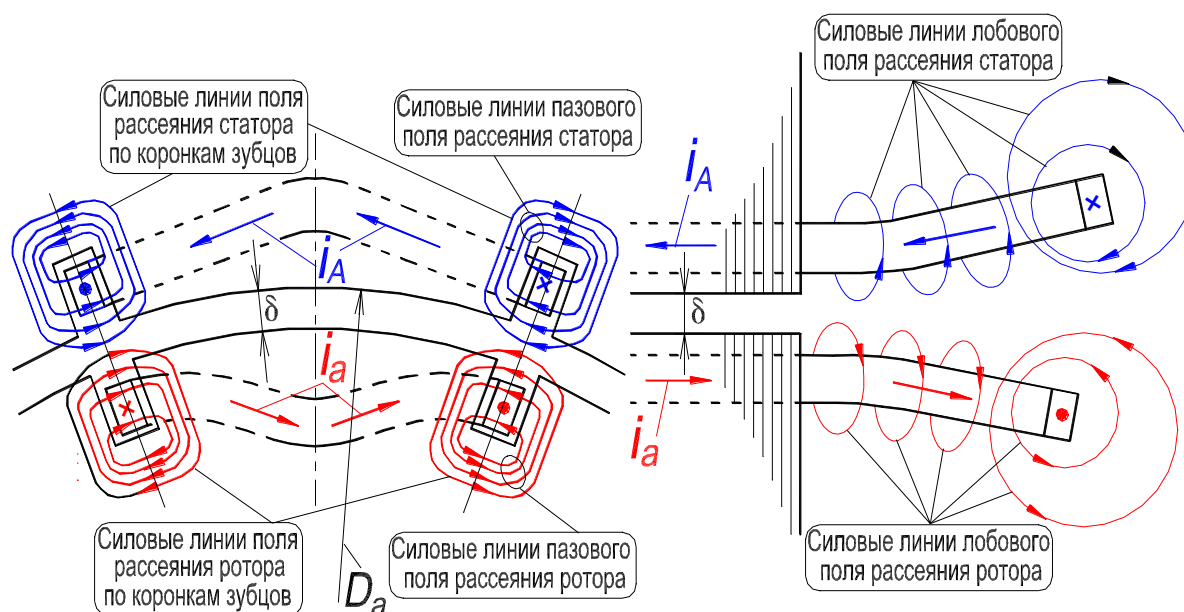


Рисунок 8.29. – Силловые линии составляющих магнитных полей рассеяния статора и ротора

Определение индуктивностей и индуктивных сопротивлений расчетным и опытными путями относится к наиболее важному и трудному разделу теории электрических машин. Наличие многих контуров, насыщение стали затрудняют определение индуктивностей. При определении индуктивностей их относят к одной фазе обмотки, а главное магнитное поле является общим для всей машины и создается токами, протекающими во всех фазах

обмотки машины. Если по обмотке фазы протекает ток с амплитудным значением $I\sqrt{2}$, то амплитудное значение МДС обмотки *фазы* по 1-й гармонике составит [см. выражение (8.5)]

$$F_{1\phi} = 0,9 \cdot I \cdot w \cdot k_{o1} / p. \quad (8.56)$$

Эта МДС создает в воздушном зазоре магнитное поле с индукцией

$$B_{1\phi m} = \mu_0 F_{1\phi m} / \delta' = 0,9 \cdot I \cdot w \cdot k_{o1} \cdot \mu_0 / p \cdot \delta', \quad (8.57)$$

где $\delta' = k_\delta \cdot \delta$; k_δ — коэффициент воздушного зазора, учитывающий увеличение длины силовой линии поля в воздушном зазоре за счет пазов, $k_\delta = 1,1 \div 1,5$.

Считая, что ось поля совпадает с осью фазы (см. рис. 8.21,а), найдем потокосцепление фазы

$$\Psi_A = w \cdot k_{o1} \cdot \Phi_{1\phi m} = 2 \cdot \tau \cdot l_\delta \cdot w \cdot k_{o1} \cdot B_{1\phi m} / \pi, \quad (8.58)$$

где $\Phi_{1\phi m}$ — поток первой гармоники; $B_{1\phi m}$ — индукция первой гармоники в воздушном зазоре машины; $\tau \cdot l_\delta$ — площадь, пронизываемая потоком; l_δ — осевая длина сердечника статора с учетом осевых воздушных зазоров.

Тогда главная индуктивность фазы

$$L_A = \Psi_A / I\sqrt{2} = 0,405 \cdot \mu_0 \cdot (w \cdot k_{o1})^2 \cdot \tau \cdot l_\delta / p \cdot \delta'. \quad (8.59)$$

Для трехфазной обмотки взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора [см. формулу (8.13)]

$$L_{12} = 3L_A / 2 = 0,608 \cdot \mu_0 \cdot (w \cdot k_{o1})^2 \cdot \tau \cdot l_\delta / p \cdot \delta'. \quad (8.60)$$

При вращении поля в воздушном зазоре и перемещении обмоток реальной машины взаимные индуктивности между обмотками фаз статора и ротора изменяются по гармоническому закону, так как изменяется расположение обмоток относительно друг друга, поэтому взаимная индуктивность между фазами будет

$$L_{B_A} = L_A \cos(\pi \cdot x / \tau) = L_A \cos \gamma. \quad (8.61)$$

При анализе поле рассеяния обмотки выделяют следующие составляющие: рассеяние пазовой части, лобовой части обмотки, дифференциальное рассеяние, а также рассеяние по коронкам зубцов (см. рис. 8.29). Индуктивность рассеяния фазы обмотки определяют по формуле (вывод не приводится) [2]

$$L_\sigma = 2 \cdot \mu_0 \cdot w^2 \cdot l_\delta \cdot \lambda_\sigma / p \cdot q, \quad (8.62)$$

где $\lambda_{\sigma} = \lambda_{\Pi} + \lambda_{\text{л}} + \lambda_{\text{д}} + \lambda_{\text{к}}$ – соответственно коэффициенты магнитной проводимости пазового, лобового, дифференциального рассеяния и рассеяния по коронкам зубцов для обмотки статора или ротора.

Чем больше тот или иной коэффициент проводимости, тем больше соответствующая индуктивность рассеяния обмотки. Коэффициенты проводимости зависят от соотношения размеров, определяющих то или иное поле рассеяния. В целях облегчения расчетов формулы для вычисления этих коэффициентов выводятся при определенных допущениях в отношении конфигурации поля рассеяния, кроме того, магнитная проницаемость ферромагнитных частей машины считается бесконечно большой.

Коэффициент проводимости *пазового рассеяния* зависит от формы паза. Пазовое рассеяние тем больше, чем глубже пазы, а ширина их меньше. Пазовое рассеяние в сильной степени определяется степенью раскрытия паза. Для открытого паза прямоугольной формы (рис. 8.29) коэффициент проводимости

$$\lambda_{\Pi} = h_1/3b_{\Pi} + h_2/b_{\Pi}, \quad (8.63)$$

где b_{Π} – ширина паза; h_1 и h_2 – сумма этих размеров определяет глубину паза.

Коэффициент проводимости *лобового рассеяния* зависит от соотношения между длиной вылета лобовой части катушки и длиной магнитопровода. Поле лобовых частей имеет сложный вид из-за того, что в лобовых частях секции обмоток, принадлежащих разным фазам, переплетаются и на поле рассеяния лобовых частей обмоток оказывают влияние стальные части машины (магнитопровод, подшипниковые щиты, станина)

Коэффициент проводимости *дифференциального рассеяния* зависит от соотношения между зубцовым делением t_{z1} и длиной зазора δ

$$t_{z1} = \pi D_a / Z_1, \quad (8.64)$$

где D_a – диаметр внутренней окружности сердечника статора (рис. 8.29); Z_1 – число зубцов сердечника статора.

Проводимость дифференциального рассеяния определяется наличием полей высших гармоник в воздушном зазоре. Чем значительнее кривая поля в зазоре отличается от синусоиды, тем больше дифференциальное рассеяние.

Коэффициент проводимости *по коронкам зубцов* зависит от ширины раскрытия паза в сторону зазора δ , а также от эквивалентного зазора между

статором и ротором, учитывающего дискретную структуру зубцово-пазового слоя.

Расчетные формулы для коэффициентов проводимости приводятся в книгах по проектированию электрических машин [5]. Расчет поля рассеяния при заданных токах производится на основе теории поля Дж. К. Максвелла [11].

Сумма взаимной индуктивности M (используется также обозначение L_{12}) и индуктивности рассеяния L_{σ} составляет полную индуктивность $L = M + L_{\sigma}$. Для первичной обмотки (например, на статоре) полную индуктивность обозначают как $L_1 = M + L_{\sigma 1}$. Для вторичной обмотки – $L_2 = M + L_{\sigma 2}$.

Зная индуктивности обмоток, определяют индуктивные сопротивления обмоток: $X = \omega L$ – полное индуктивное сопротивление обмотки, $X_{12} = \omega M$ – сопротивление взаимной индукции и $X_{\sigma} = \omega L_{\sigma}$ – индуктивное сопротивление рассеяния.

Индуктивное сопротивление взаимной индукции между обмотками статора и ротора

$$\begin{aligned} X_{12} &= \omega_1 \cdot M = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot 0.608 \cdot \mu_0 \cdot (w \cdot k_{o1})^2 \cdot \tau \cdot l_{\delta} / p \cdot \delta' = \\ &= 3,82 \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot (w \cdot k_{o1})^2 \cdot \tau \cdot l_{\delta} / p \cdot \delta'. \end{aligned} \quad (8.65)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора

$$\begin{aligned} X_{\sigma 1} &= \omega_1 \cdot L_{\sigma 1} = 2 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot 2 \cdot \mu_0 \cdot w_1^2 \cdot l_{\delta} \cdot \lambda_{\sigma} / p \cdot q = \\ &= 12,57 \cdot f_1 \cdot \mu_0 \cdot w_1^2 \cdot l_{\delta} \cdot \lambda_{\sigma} / p \cdot q. \end{aligned} \quad (8.66)$$

Индуктивное сопротивление рассеяния вторичной обмотки

$$X_{\sigma 2} = \omega_2 \cdot L_{\sigma 2} = 2\pi f_2 L_{\sigma 2}. \quad (8.67)$$

Обычно индуктивные сопротивления рассеяния обмоток имеют значение от нескольких процентов до 10–15 % сопротивления взаимной индукции. Однако в микромашинах и специальных машинах сопротивления рассеяния могут быть больше этих значений.

При изменении режимов работы, а также в переходных режимах – при пуске, реверсе, повторном включении – активные и индуктивные сопротивления изменяются из-за вытеснения тока в токопроводящих частях и насыщения магнитной системы. Поэтому при исследовании электрических машин рассматривают переходные и установившиеся параметры электрических машин.

Сопротивление взаимной индукции в бóльшей степени зависит от насыщения, чем сопротивление рассеяния, так как поток рассеяния в основном замыкается по воздуху, а главный поток по стали магнитопровода. Однако при коротких замыканиях, когда токи увеличиваются в 10–15 раз, пути потоков рассеяния насыщаются, и индуктивное сопротивление рассеяния изменяется.

Явление рассеяния оказывает влияние на работу машины. В генераторе переменного тока из-за возникновения ЭДС рассеяния изменяется его напряжение. В машинах в той части проводника, которая расположена в пазу, нижние слои проводника сцепляются с большим числом индукционных линий потока пазового рассеяния, чем верхние (рис. 8.29), поэтому их индуктивное сопротивление больше, чем верхних слоев. Это приводит к вытеснению тока к верхней части проводника. В результате потери в проводнике больше потерь постоянного тока.

Потоки рассеяния лобовых частей проникают в торцовые части машины (рис. 8.29). Пульсируя во времени, они наводят в стальных частях ЭДС, что вызывает в них вихревые токи и приводит к потерям.

9. Номинальные данные исследуемых двигателей

Перед подключением к сети асинхронного двигателя, нужно знать, на какое напряжение он рассчитан, какие схемы соединения обмоток допустимы, каковы значения тока в обмотке статора и др. Необходимая информация приводится в паспортных данных двигателя, которые указываются в табличке (она также называется – шильдик), расположенной на его корпусе.

Для примера рассмотрим табличку двигателя АИР71А4У3 (см. разд. 4, с. 20).



Тип двигателя – АИР71А4У3,

где «А» – асинхронный двигатель;

«И» – Интерэлектро;

«Р» – привязка мощностей к установочным размерам по ГОСТ Р 31606–2012;

«71» – высота оси вращения вала, мм;

«А» – установочный размер по длине статора;

«4» – число полюсов;

«У3» – климатическое исполнение, для умеренного климата (см. разд. 7.4, с. 34, сл.).

Ниже приводятся характеристики двигателя:

3 Ф ~ 50 Hz – питание от трехфазной сети, с частотой тока 50 Гц;

Δ/Υ 220/380 V – при соединении обмотки статора по схеме «треугольник», линейное напряжение сети должно быть равно 220 В, при соединении по схеме «звезда» – 380 В;

2.8/1.8 А – при соединении обмотки статора по схеме «треугольник», линейный ток должен быть равно 2.8 А, при соединении по схеме «звезда» – 1.8 А;

0.55 KW – номинальная мощность двигателя, кВт;

1360 r/min – номинальная частота вращения ротора, об/мин;

КПД 71 % – коэффициент полезного действия;

cosφ 0.73 – коэффициент мощности;

Режим S1 – продолжительный режим работы;

Кл. изоляц. F – класс изоляции, предельная температура при длительном режиме работы – 155 °С;

IP54 – степень защиты (см. разд. 7.1, с. 28, сл.).

Подобным образом расшифровывается обозначение типа асинхронных двигателей общепромышленного назначения.

9.1. Агрегат «Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором – генератор постоянного тока» (работа №1)

Исследуется трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа А41/4 (см. схему на рис. 10.29 и фотографию на рис. 10.31 в Л. Р. №1) (см. разд. 4, с. 20, сл.).

В качестве нагрузки используется генератор постоянного тока ПН-45.

Данные приведены в табл. 9.1 и 9.2.

Таблица 9.1. – Номинальные данные двигателя типа А41/4

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность (полезная механическая мощность на валу)	P_H	1,7	кВт
Напряжение обмотки статора (схема Y)	$U_{л.н}$	380	В
Линейный ток	$I_{л.н}$	3,9	А
Фазный ток обмотки статора	$I_{ф.н}$	3,9	А
Коэффициент мощности	$\cos \varphi_1$	0,82	–
Коэффициент полезного действия	η	81,5	%
Частота сети	f	50	Гц
Частота вращения ротора	n	1420	об/мин

Таблица 9.2. – Номинальные данные генератора постоянного тока ПН-45

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность	P_H	3,3	кВт
Напряжение обмотки якоря	U_H	115	В
Ток обмотки якоря	I_H	28,7	А
Частота вращения якоря	n	1440	об/мин

9.2. Агрегат «Трехфазный асинхронный двигатель

с фазным ротором – электромашинный динамометр» (работа №2)

Исследуется трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором типа АК-51-4 (см. схему на рис. 11.3 и фотографии на рис. 11.7 в Л. Р. №2) (см. разд. 4, с.20,сл.).

В качестве нагрузки используется электромашинный динамометр.

Данные приведены в табл. 9.3 и 9.4.

Краткое описание конструкции двигателя. Активная часть асинхронного двигателя состоит из статора и ротора. Статор содержит сердечник, набранный из пластин электротехнической стали. В его пазах расположена трехфазная распределенная 4-полюсная обмотка ($p = 2$), которая соединена по схеме треугольник.

Ротор также содержит сердечник, набранный из пластин электротехнической стали, и в его пазах расположена трехфазная распределенная 4-полюсная обмотка ($p = 2$). Обмотка ротора соединена в звезду. Начала фаз обмотки выведены на контактные кольца, которые закреплены на валу и изолированы друг от друга. На кольца накладываются неподвижные щетки.

На период пуска к обмотке ротора подсоединяется пусковой реостат. Его назначение – ограничить пусковые токи в обмотке статора и ротора; увеличить пусковой момент.

Таблица 9.3. – Номинальные данные двигателя типа АК-51-4

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность (полезная механическая мощность на валу)	P_n	2,8	кВт
Напряжение обмотки статора (схема Δ)	$U_{л.н} = U_{ф.н}$	220	В
Линейный ток обмотки статора	$I_{л.н}$	11,5	А
Фазный ток обмотки статора	$I_{ф.н}$	6,7	А
Коэффициент мощности	$\cos \varphi_1$	0,82	–
Коэффициент полезного действия	η	78	%
Частота	f	50	Гц
Частота вращения ротора	n	1370	об/мин
Момент (момент на валу двигателя)	M	19,5	Н·м
Скольжение	s	0,0866	–

Таблица 9.4. – Номинальные данные электромашинного динамометра

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Напряжение обмотки якоря	U_H	115	В
Ток обмотки якоря	I_H	1,5	В

9.3. Агрегат «Трехфазный асинхронный двигатель в однофазном режиме – генератор постоянного тока» (работа №3)

Исследуется трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа А41/4 в однофазном режиме (см. схему на рис. 12.7 и фотографию на рис. 12.9 в Л. Р. №3).

В качестве нагрузки используется генератор постоянного тока ПН-17,5.

Данные приведены в табл. 9.5 и 9.6.

Таблица 9.5. – Номинальные данные двигателя типа А41/4

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность (полезная механическая мощность на валу)	P_H	1,7	кВт
Напряжение обмотки статора (схема Y)	$U_{Л.Н}$	220	В
Ток обмотки статора	$I_{Л.Н} = I_{ф.н}$	6,6	А
Коэффициент мощности	$\cos \varphi_1$	0,8	–
Коэффициент полезного действия	η	81,5	%
Частота сети	f	50	Гц
Частота вращения ротора	n	1420	об/мин

Таблица 9.6. – Номинальные данные генератора постоянного тока ПН-17,5

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность	P_H	1,3	кВт
Напряжение обмотки якоря	U_H	115	В
Ток обмотки якоря	I_H	11,3	А
Частота вращения якоря	n	1420	об/мин

9.4. Агрегат «Трехфазный асинхронный генератор – двигатель постоянного тока» (работа №4)

Исследуется трехфазный асинхронный генератор. В режиме генератора используется трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором типа А41/4 (см. схемы на рис. 13.5 и фотографию на рис. 13.7 в Л. Р. №4).

В качестве приводного двигателя используется двигатель постоянного тока ПН-17,5.

Данные приведены в табл. 9.7 и 9.8.

Таблица 9.7. – Номинальные данные двигателя типа А41/4

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность (полезная механическая мощность на валу)	P_H	1,7	кВт
Напряжение обмотки статора (схема Δ)	$U_{л.н} = U_{ф.н}$	220	В
Линейный ток обмотки статора	$I_{л.н}$	6,7	А
Фазный ток обмотки статора	$I_{ф.н}$	3,9	А
Коэффициент мощности	$\cos \varphi_1$	0,8	–
Коэффициент полезного действия	η	81,5	%
Частота сети	f	50	Гц
Частота вращения ротора	n	1420	об/мин

Таблица 9.8. – Номинальные данные двигателя постоянного тока ПН-17,5

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Мощность	P_H	1,3	кВт
Напряжение обмотки якоря	U_H	110	В
Ток обмотки якоря	I_H	19,6	А
Частота вращения якоря	n	1500	об/мин

9.5. Трехфазная асинхронная машина с неподвижным ротором (работа №5)

Исследуется трехфазная асинхронная машина с неподвижным ротором в режимах индукционного регулятора и регулируемой реактивной (индуктивной) катушки. Для исследования используется трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором. Для торможения и поворота ротора реализована червячная передача (см. схемы на рис. 14.5 и 14.6 и фотографии на рис. 14.7 и 14.8 в Л. Р. №5).

Таблица 9.9. Номинальные данные индукционного регулятора

Наименование	Обозначение	Численное значение	Единица измерения
Первичное напряжение	$U_{1.н}$	127	В
Вторичное напряжение	$U_{2.н}$	114	В
Минимальное вторичное напряжение	$U_{2.min}$	16	В
Максимальное вторичное напряжение	$U_{2.max}$	266	В
Число пар полюсов	p	6	–

10. РАБОТА № 1

ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Оглавление

1. Цель работы	100
2. Программа работы	100
3. Основы теории	100
3.1. Принцип действия двигателя. Природа электромагнитного момента	100
3.2. Эквивалентное представление асинхронного двигателя с вращающимся ротором в виде двигателя с неподвижным ротором.	110
3.3. Приведение обмотки ротора двигателя к параметрам обмотки статора	113
3.4. Уравнения равновесия ЭДС (напряжений) и МДС двигателя с приведенной вторичной обмоткой	115
3.5. Векторная диаграмма двигателя с приведенной вторичной обмоткой	115
3.6. Энергетическая диаграмма двигателя с приведенной вторичной обмоткой	116
3.6.1. Диаграмма активной мощности двигателя. Коэффициент полезного действия	116
3.6.2. Баланс реактивных мощностей двигателя. Коэффициент мощности	120
3.7. Схемы замещения асинхронного двигателя	121
3.7.1. Т-образная схема замещения двигателя	121
3.7.2. Г-образная схема замещения двигателя	122
3.8. Вращающий момент асинхронного двигателя	124
3.8.1. Электромагнитный момент и его зависимость от скольжения .	124
3.8.2. Максимальный электромагнитный момент	126
3.8.3. Начальный пусковой электромагнитный момент	127
3.8.4. Механическая характеристика асинхронного двигателя	128
3.8.5. Статическая устойчивость работы агрегата «асинхронный двигатель – производственный механизм»	128
3.8.6. Формула Клосса для относительного вращающего момента двигателя	130
3.8.7. Сопоставление асинхронного и синхронного моментов	131
3.8.8. Паразитные моменты двигателя. Краткая характеристика	132
3.8.8.1. Паразитные асинхронные моменты	134

3.8.8.2. Паразитные синхронные моменты	136
3.8.8.3. Вибрационные силы и вращающие моменты	138
3.8.8.4. Шумы при работе асинхронной машины	138
3.8.8.5. Выбор рационального соотношения чисел зубцов статора и ротора	139
3.9. Способы пуска трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором	140
3.9.1. Способы пуска трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором классического исполнения	140
3.9.2. Пуск трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором специального исполнения	145
3.9.3. Самозапуск асинхронных двигателей	148
3.10. Способы регулирования скорости трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором	149
3.10.1. Регулирование скорости вращения двигателя изменением частоты первичной сети	149
3.10.2. Регулирование скорости вращения двигателя изменением числа пар полюсов	150
3.10.3. Регулирование скорости вращения двигателя уменьшением первичного напряжения	152
3.11. Электрическое торможение асинхронных двигателей	153
3.12. Построение рабочих (эксплуатационных) характеристик двигателя по данным опытов холостого хода и короткого замыкания	155
3.12.1. Назначение круговой диаграммы трехфазной асинхронной машины	155
3.12.2. Опыты холостого хода и короткого замыкания двигателя ...	157
3.12.3. Построение упрощенной круговой диаграммы	161
3.12.4. Построение шкал скольжения s , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ и КПД η	164
3.12.5. Определение мощностей и потерь мощности двигателя по круговой диаграмме	165
3.12.6. Определение скольжения s , КПД η и коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ двигателя по круговой диаграмме	166
3.12.7. Определение электромагнитных моментов, кратностей моментов и пускового тока двигателя по круговой диаграмме	167
3.12.8. Точность построения круговой диаграммы	168

4. Экспериментальное исследование	169
4.1. Пуск двигателя	169
4.2. Изменение диапазона измерений амперметров $PA1, PA2, PA3$ при работающем двигателе	170
4.3. Опыт холостого хода	173
4.4. Опыт короткого замыкания.....	174
4.5. Опыт нагрузки. Рабочие характеристики	176
Приложение. График зависимости электромагнитного момента M генератора постоянного тока от тока якоря I_a	179
5. Содержание и оформление отчета	180
6. Контрольные вопросы	180
Рис. 10.1. Иллюстрация природы возникновения электромагнитного момента	101
Рис. 10.2. Силовые линии магнитного поля	106
Рис. 10.3. Иллюстрация природы возникновения электромагнитной силы	109
Рис. 10.4. Векторные диаграммы вторичной (роторной) цепи асинхронного двигателя	112
Рис. 10.5. Векторная диаграмма асинхронного двигателя	116
Рис. 10.6. Энергетическая диаграмма активной мощности двигателя	116
Рис. 10.7. Схемы замещения двигателя	123
Рис. 10.8. Кривые электромагнитного момента и токов асинхронного двигателя	125
Рис. 10.9. Определение статической устойчивости работы агрегата «АД–ПМ»	129
Рис. 10.10. Пилообразное распределение индукции в воздушном зазоре	133
Рис. 10.11. Деформация распределения индукции в воздушном зазоре	134
Рис. 10.12. Искажение кривой момента M двигателя моментами от 5 и 7-й гармоник поля.	135
Рис. 10.13. Наложение синхронного вращающегося момента на асинхронный	137
Рис. 10.14. Схема прямого пуска двигателя с короткозамкнутым ротором	142
Рис. 10.15. Схемы пуска в ход двигателей с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении	143
Рис. 10.16. Схема пуска двигателя с короткозамкнутым ротором с переключением со «звезды» на «треугольник»	144
Рис. 10.17. Форма паза ротора глубокопазного двигателя (a); распределение плотности тока в стержне при пуске (b); распределение плотности тока при номинальном режиме ($в$)	145
Рис. 10.18. Пазы ротора двухклеточного двигателя	147

Рис. 10.19. Принципиальная схема переключения обмотки для изменения числа полюсов в 2 раза	151
Рис. 10.20. Механические характеристики асинхронных двигателей при различных значениях первичного напряжения	152
Рис. 10.21. Схема регулирования скорости асинхронного двигателя с помощью реактора с подмагничиванием постоянным током	153
Рис. 10.22. Схема переключения для изменения направления вращения магнитного поля асинхронного двигателя	154
Рис. 10.23. Рабочие характеристики асинхронного двигателя мощностью 15 кВт	157
Рис. 10.24. Характеристики холостого хода двигателя	158
Рис. 10.25. Разделение магнитных и механических потерь асинхронного двигателя	159
Рис. 10.26. Характеристики короткого замыкания двигателя	161
Рис. 10.27, <i>а</i> . Годограф токов (круговая диаграмма) асинхронного двигателя	163
Рис. 10.27, <i>б</i> . Упрощенная круговая диаграмма асинхронного двигателя	164
Рис. 10.27, <i>в</i> . Определение мощностей двигателя по круговой диаграмме	165
Рис. 10.28. Изменение диапазона измерений амперметров <i>PA1, A2, PA3</i> при работающем двигателе	171
Рис. 10.29. Схема лабораторной установки для исследования асинхронного двигателя с беличьей клеткой	172
Рис. 10.30. Фотография приборной панели лабораторного стенда для исследования трехфазного асинхронного двигателя с беличьей клеткой	181
Рис. 10.31. Фотография исследуемого агрегата «Трехфазный асинхронный двигатель с беличьей клеткой – генератор постоянного тока»	181

1. Цель работы

Ознакомиться с устройством асинхронного двигателя с беличьей клеткой, уяснить принцип действия, пуск и реверсирование двигателя. Овладеть техникой и методикой снятия характеристик.

2. Программа работы

2.1. Осуществить пуск асинхронного двигателя.

2.2. Провести опыт холостого хода и построить зависимости $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_x)$. Произвести разделение потерь мощности холостого хода P_x на электрические потери в обмотке статора $p_{\Sigma 1}$, магнитные потери $p_{МГ}$ в магнитопроводе и механические $p_{МХ}$.

2.3. Провести опыт короткого замыкания и построить зависимости $I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_k)$.

2.4. Провести опыт нагрузки двигателя и построить рабочие характеристики $I_1, P_1, M, \cos \varphi_1, \eta, s = f(P_2)$, где P_2 – механическая (вторичная) мощность на валу двигателя.

3. Основы теории

3.1. Принцип действия двигателя.

Природа электромагнитного момента

Электромагнитный момент двигателя обусловлен взаимодействием результирующего магнитного поля двигателя с *активной* составляющей тока.

Электромагнитный момент, приводящий ротор во вращение:

$$M = c_M \cdot \Phi_m \cdot I_2 \cdot \cos \psi_2 = c_M \cdot \Phi_m \cdot I_{2a}, \quad (10.1)$$

где c_M – постоянная величина для двигателя; Φ_m – амплитуда основного результирующего магнитного потока; I_{2a} – активная составляющая тока I_2 обмотки ротора; ψ_2 – угол сдвига между векторами ЭДС \underline{E}_{2s} и тока \underline{I}_2 обмотки ротора.

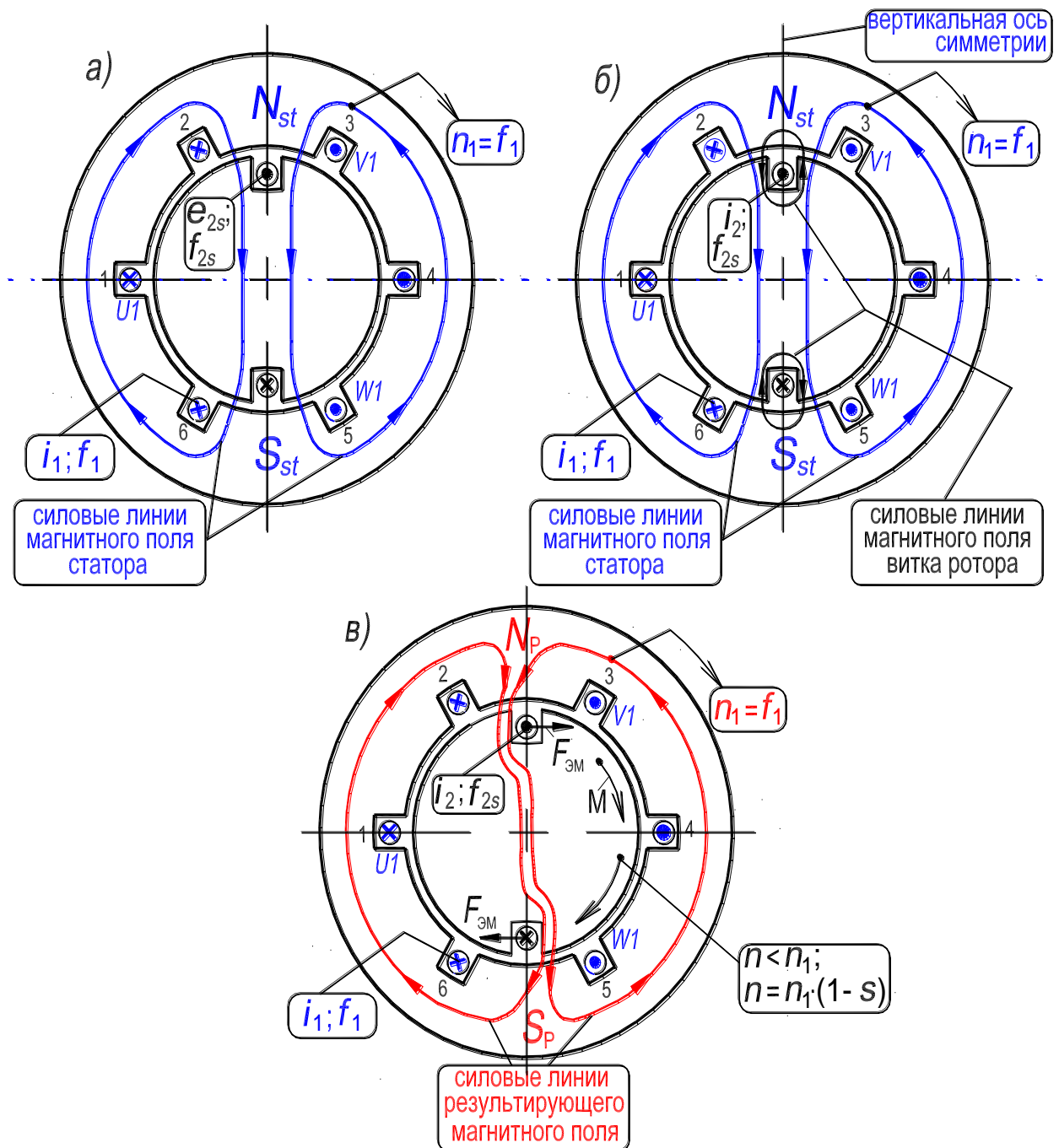


Рис. 10.1. Иллюстрация природы возникновения электромагнитного момента:
 силовые линии магнитного поля статора – (а); силовые линии поля статора и витка ротора совмещены – (б); силовые линии результирующего поля – (в)

Рис. 10.1 иллюстрирует природу возникновения электромагнитного момента. На рис. 10.1,а показаны силовые линии магнитного поля статора, которое создано *двухполюсной обмоткой статора с трехфазным током i_1* (момент времени t_1 , рис. 8.20,б, с. 64). Его полюсы обозначены символами N_{st} – S_{st} . Поле статора вращается в направлении чередования фаз обмотки

статора со скоростью n_1 , определяемой частотой f_1 трехфазного напряжения, подведенного к обмотке, $n_1 = f_1$ об/с. Поле статора индуцирует в витке ротора ЭДС e_{2s} пропорциональную произведению магнитного потока статора на скорость вращения витка ротора *относительно* поля статора. Направление ЭДС e_{2s} определяется по правилу правой руки [9, рис. 1.1,а, с. 27]. Примем, для удобства анализа, что направление тока i_2 , обусловленного ЭДС e_{2s} , совпадает с этой ЭДС (то есть ток i_2 является активным, $i_2 = i_{2a}$). Их направление на рис. 10.1,а и 10.1,б показаны одинаковыми знаками. На рис. 10.1,б *совмещены* силовые линии поля статора и силовые линии поля, созданного током i_2 , протекающим в витке ротора.

Как видно из рис. 10.1,б слева от вертикальной оси симметрии силовые линии поля статора и поля ротора действуют в одном направлении, а справа от этой оси они направлены навстречу. В результате происходит перераспределение в пространстве силовых линий и линии результирующего поля (рис. 10.1,в), созданного совместным действием тока i_1 обмотки статора и тока i_2 витка ротора, замыкаются не по кратчайшему пути (то есть не по радиусу), а оказываются растянутыми. Стремясь замкнуться по кратчайшему пути, обладающему минимальным магнитным сопротивлением, силовые линии результирующего поля выталкивают проводники витка ротора в направлении вращающегося поля (рис. 10.1,в). Таким образом, ротор будет вращаться со скоростью n в *направлении поля* под действием возникшей пары электромагнитных сил $F_{эм}$. Направление силы $F_{эм}$ определяется по правилу левой руки [9, рис. 1.1,б, с. 27]. Паре сил соответствует электромагнитный момент M , действующий на ротор [см. формулу (10.1) и рис. 10.1,в].

В режиме двигателя скорость n ротора не может быть равна скорости поля n_1 (*всегда* $n < n_1$), так как при равенстве этих скоростей вращающиеся ротор и поле будут взаимно неподвижны и в обмотке ротора не будет индуцироваться ЭДС, не будет протекать ток и не возникнет электромагнитный момент, приводящий ротор во вращение. Поэтому скорость ротора может максимально приблизиться к скорости поля, что происходит при отсутствии механической нагрузки на валу двигателя (холостой ход двигателя), но достичь ее не может.

В теории асинхронного двигателя наряду с понятием *абсолютной* частоты вращения ротора n , широко используют понятие *относительной* частоты вращения ротора

$$(n_1 - n). \quad (10.2)$$

Относительную частоту вращения ротора выражают в долях n_1 и называют *скольжением*

$$s = (n_1 - n)/n_1. \quad (10.3)$$

Из записанного по определению выражения для скольжения s , легко получить формулу для скорости ротора (см. рис. 10.1,в)

$$n = n_1 \cdot (1 - s). \quad (10.4)$$

Из нее следует, что частота вращения ротора n и его скольжение s находятся во взаимнообратной связи, а именно: при увеличении n скольжение s уменьшается; при уменьшении n скольжение s увеличивается (см. табл. 10.1).

Таблица 10.1. – Значения величин ротора асинхронного двигателя

Величина ротора	Режим двигателя		Идеальный холостой ход
	Начальный момент пуска (или к. з.)	Холостой ход	
Скорость, n	$n = 0$	$n = n_1(1 - s) \approx n_1$ (но $n < n_1$)	$n = n_1$ (синхронизм)
Скольжение, s	$s = 1$	$s \approx 0$ (но $s > 0$)	$s = 0$
Частота скольжения, f_{2s}	$f_{2s} = f_1 = 50$ Гц	$f_{2s} = f_1 \cdot s \approx 1 \div 3$ Гц	отсутствует
Скорость вращения n_{2s} поля ротора относительно ротора	$n_{2s} = n_1$	$n_{2s} = n_1 \cdot s \approx 1 \div 3$ об/с; ($p=1$)	поле ротора отсутствует
Скорость вращения поля ротора относительно статора	$n + n_{2s} = n_1 = f_1/p$	$n + n_{2s} = n_1 = f_1/p$	отсутствует

Таким образом, скорость ротора двигателя изменяется в диапазоне: $0 \leq n < n_1$, а скольжение ротора изменяется в соответствующем диапазоне: $1 \geq s > 0$.

В идеальный холостой ход (синхронизм) двигатель самостоятельно войти не может, для его достижения к ротору двигателя необходимо приложить внешний момент.

Вывод: поле статора и поле ротора вращаются в пространстве с одной и той же синхронной скоростью $n_1 = f_1/p$ в одном направлении [см. формулу (10.2) и 5-ю строку табл. 10.1]. Таким образом, возникает результирующее поле. Оно создается совместным действием МДС обмоток статора и ротора. Величина поля устанавливается в соответствии с магнитным насыщением (сопротивлением) магнитопровода.

Выведем выражения для величин ротора, упомянутых в строках 3, 4 и 5 табл. 10.1, а именно: 1) частота скольжения f_{2s} ЭДС и ток обмотки ротора; 2) скорость вращения поля ротора относительно *ротора*; 3) скорость вращения поля ротора относительно *статора*.

1. Частота скольжения f_{2s} ЭДС и тока обмотки ротора

Частота этих величин зависит от скорости вращения ротора по отношению к полю (10.2). Относительная скорость ротора является величиной переменной так как: в выражении (10.2) синхронная скорость поля n_1 при $f_1 = 50$ Гц является постоянной, $n_1 = f_1/p = \text{const}$, а скорость n ротора, вращающегося в направлении поля, изменяется (например, в период пуска и при изменении механической нагрузки на валу). Поэтому частота f_{2s} ЭДС e_{2s} и тока i_2 обмотки ротора будет также величиной переменной. Выражение для частоты f_{2s} записывается на основе формулы (8.22, с. 69),

$$f_{2s} = (n_1 - n) \cdot p = [(n_1 - n)/n_1] \cdot (n_1 \cdot p) = s \cdot f_1. \quad (10.5)$$

Частота f_{2s} ЭДС и тока обмотки ротора является *переменной*, она зависит от скорости и скольжения ротора и называется *частотой скольжения* (см. табл. 10.1).

При *неподвижном* роторе (в *начальный момент пуска* двигателя или при его коротком замыкании) частота скольжения тока в обмотке ротора такая же как и частота тока в обмотке статора, $f_{2s} = f_1 = 50$ Гц. Это обусловлено тем, что при неподвижном роторе, $n = 0$, магнитное поле вращается с одной и той же скоростью $n_1 = \text{const}$ как относительно статора, так и относительно ротора.

При холостом ходе двигателя частота скольжения тока (и ЭДС) в обмотке ротора минимальна и составляет $f_{2s} \approx 1 \div 3$ Гц. Это объясняется тем, что при отсутствии механической нагрузки на валу двигателя его ротор разгоняется (в направлении вращения поля) до максимальной скорости n , которая очень близка к скорости поля n_1 . Поэтому скорость ротора *относительно* поля будет весьма небольшой, что и приводит к небольшой частоте перемагничивания ротора, а также к малой частоте скольжения f_{2s} . По этой причине магнитные потери в сердечнике ротора малы и их не учитывают при анализе КПД двигателя.

Отметим, что в трансформаторе частота ЭДС и тока во вторичной обмотке неизменна и всегда равна f_1 .

2. Скорость вращения n_{2s} поля ротора *относительно ротора*

Рассмотрим, для определенности, фазный ротор с трехфазной обмоткой на роторе (рис. 8.4, с. 38). Вращающееся поле двигателя *индуцирует* в обмотке ротора трехфазную ЭДС, последовательность чередования фаз которой будет такой же, как у обмотки статора. Протекающий в обмотке ротора трехфазный ток, имеющий переменную частоту скольжения f_{2s} , создает магнитное поле ротора, которое вращается в направлении вращения ротора с переменной же скоростью, определяемую по формуле, которая аналогична формуле (8.22, разд. 8.4),

$$n_{2s} = f_{2s}/p = f_1 \cdot s/p = n_1 \cdot s \text{ об/с.} \quad (10.6)$$

Как следует из формулы (10.6) скорость поля ротора n_{2s} относительно ротора зависит от скольжения ротора s и, следовательно, от его скорости n (см. табл. 10.1).

Так как при неподвижном роторе частота скольжения f_{2s} и частота f_1 равны, то и $n_{2s} = n_1$. При вращающемся же роторе частота f_{2s} уменьшается и скорость поля ротора n_{2s} относительно ротора по мере разгона ротора также уменьшается до своего минимального значения, которое при $p = 1$ составляет $n_{2s} \approx 1 \div 3$ об/с.

3. Скорость вращения поля ротора *относительно статора*

Запишем выражение для этой скорости на основе анализа рис. 10.2. На рис. 10.2,*a* показаны силовые линии магнитного поля статора, которое создано *двухполюсной* обмоткой статора *с трехфазным током i_1* (момент времени t_1 , рис. 8.20,*б*, с. 64). Его полюсы обозначены символами $N_{st} - S_{st}$. Поле статора вращается в направлении чередования фаз обмотки статора со скоростью $n_1 = f_1$ об/с, определяемой частотой f_1 трехфазного напряжения, подведенного к обмотке. Поле статора индуцирует в обмотке ротора ЭДС e_{2s} пропорциональную произведению магнитного потока статора на скорость вращения обмотки ротора *относительно* поля статора. Направление ЭДС e_{2s} определяется по правилу правой руки [9, рис. 1.1,*a*, с. 27].

Примем, для удобства анализа, что направление тока i_2 , обусловленного ЭДС e_{2s} , совпадает с этой ЭДС (то есть *ток i_2 является активным*).

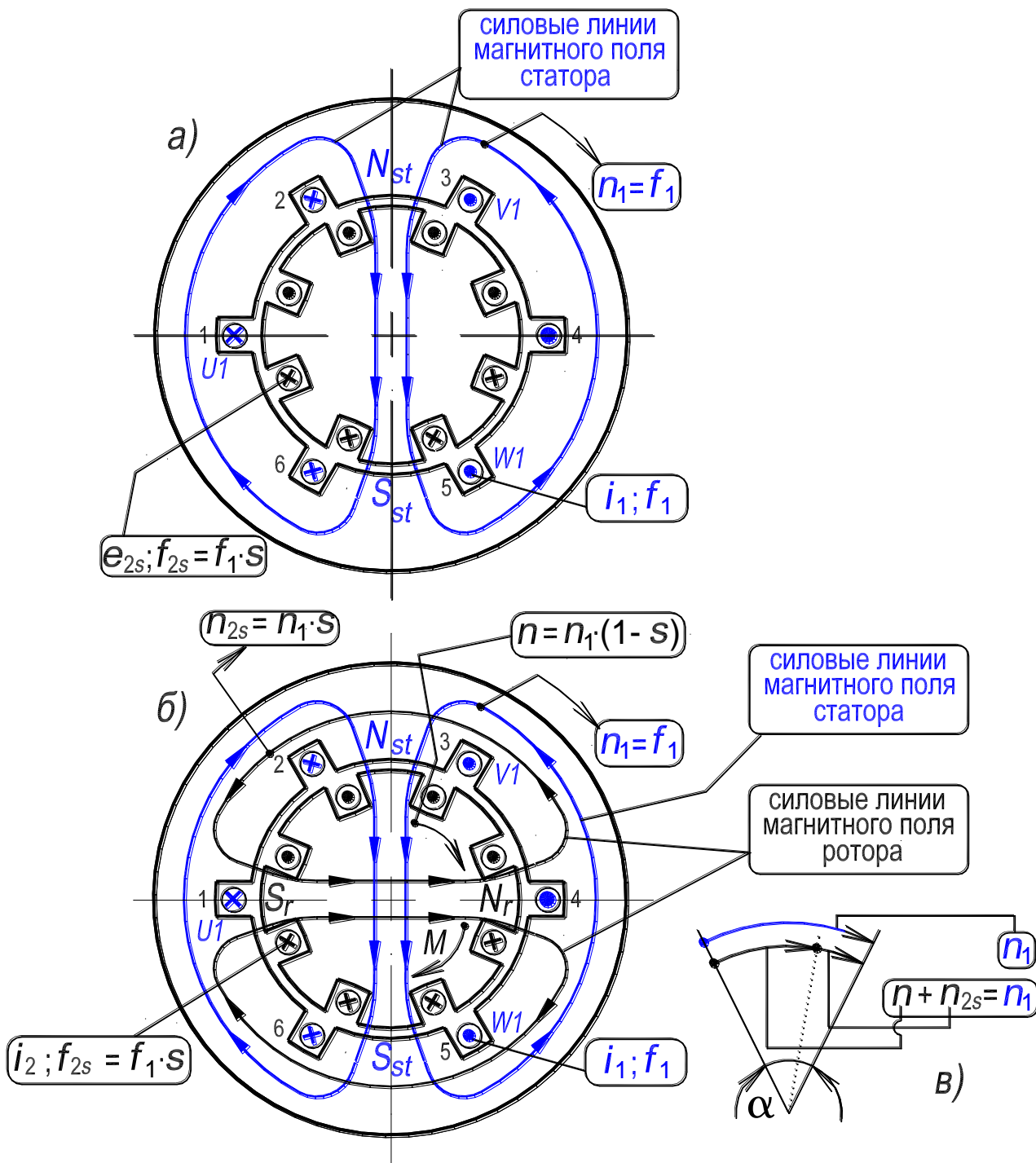


Рисунок 10.2. – Силовые линии магнитного поля статора – (а);
 силовые линии магнитного поля статора и ротора совмещены – (б);
 диаграмма скоростей магнитного поля – (в)

Их направление на рис. 10.2,а и 10.2,б показаны одинаковыми знаками. На рис. 10.2,б совмещены силовые линии поля статора и поля, созданного током i_2 , протекающим в обмотке ротора.

Искомая скорость вращения поля ротора *относительно статора* зависит от двух скоростей: скорости $n_{2s} = n_1 \cdot s$ поля ротора относительно ротора (его полюсы обозначены символами $N_r - S_r$) и скорости ротора $n = n_1 \cdot (1 - s)$ (см. рис. 10.2,в). Так как ротор и его поле вращаются в одном направлении, то искомая скорость вращения поля ротора *относительно статора* определится как сумма указанных двух скоростей, то есть

$$n + n_{2s} = n_1 \cdot (1 - s) + n_1 \cdot s = (n_1 - n_1 \cdot s) + n_1 \cdot s = n_1 = \text{const.} \quad (10.7)$$

Таким образом, при любой скорости вращения ротора двигателя поля статора и ротора вращаются в пространстве в одном направлении с одной и той же синхронной скоростью n_1 и неподвижны относительно друг друга. Последнее следует из того положения, что насколько, например, уменьшается скорость ротора ($-n_1 \cdot s$) настолько же увеличивается скорость поля ротора относительно ротора ($+n_1 \cdot s$) и наоборот. Это графически иллюстрирует рис. 10.2,в. На рисунке дуга, обозначенная символом n_1 , опирается на некоторый угол α . А сумма дуг, обозначенных символами n и n_{2s} , опирается на этот же угол. При увеличении/уменьшении дуги n_{2s} на такую же величину уменьшится/увеличится дуга n . Сумма дуг, обозначенных символами n и n_{2s} , при любой скорости ротора двигателя остается неизменной и равной дуге, обозначенной символом n_1 . А ротор асинхронного двигателя всегда вращается со скоростью n , меньшей скорости поля, то есть $n < n_1$.

Следует отметить, что взаимное равенство скоростей полей статора и ротора (имеются ввиду *первые* гармоники) является необходимым условием *однонаправленного* процесса преобразования мощности во всех электрических машинах общепромышленного применения переменного и постоянного тока как в двигательном, так и в генераторном режимах. Если это условие нарушается, например, в синхронном генераторе, работающем в сети бесконечно большой мощности, то синхронный генератор за *один* оборот ротора (при $p = 1$) переходит в двигательный режим, затем в генераторный режим; далее опять в двигательный и т. д. (см. в [8] рис. 1.6,а на с. 127), и нормальная работа синхронного генератора становится невозможной.

Замечание. Реально в асинхронной машине существует единое результирующее магнитное поле, созданное совместным действием МДС обмоток статора и ротора (на рис. 10.2,в силовые линии результирующего поля не показаны). Величина поля устанавливается в соответствии с маг-

нитным состоянием (насыщением) магнитопровода. Для удобства анализа рассмотрено раздельное существование поля статора и поля ротора (такое представление возможно, если магнитная система ненасыщена).

В формуле (10.1) отражен тот факт, что электромагнитный момент, приводящий ротор во вращение, обусловлен взаимодействием результирующего магнитного поля двигателя именно с *активной* составляющей тока I_{2a} ротора, а не с полным током I_2 ротора или с его реактивной составляющей I_{2p} . Так как обмотка ротора обладает активно-индуктивным сопротивлением, то ток I_2 отстает от создавшей его ЭДС скольжения E_{2s} на угол ψ_2 (рис. 10.3,а). Величина угла изменяется, так как индуктивное сопротивление обмотки ротора зависит от частоты скольжения f_{2s} и от **насыщения магнитопровода**.

Анализируя рис. 10.3,б,в,г (изображена развертка статора и ротора) рассмотрим электромагнитные силы, образуемые за счет взаимодействия результирующего вращающегося магнитного поля с активной и реактивной составляющими тока обмотки ротора. На рис. 10.3,б,в,г зависимость $B_{\delta x} = f(x)$ определяет значение индукции магнитного поля в зазоре δ в точке x на протяжении полюсного деления τ . Стрелкой « n_1 » обозначено направление вращения поля. На рис. 10.2,б знаками « \times » и « \bullet » обозначено направление ЭДС e_{2s} , индуцируемой вращающимся магнитным полем в обмотке ротора.

На рис. 10.3,в знаками « \times » и « \bullet » обозначено направление *активной* составляющей тока i_{2a} ротора, которая совпадает по фазе с ЭДС e_{2s} . Электромагнитные силы $f_{эм,x}$, обусловленные взаимодействием результирующего вращающегося магнитного поля с током i_{2a} , на всех полюсных делениях направлены одинаково и создают результирующий вращающий момент M .

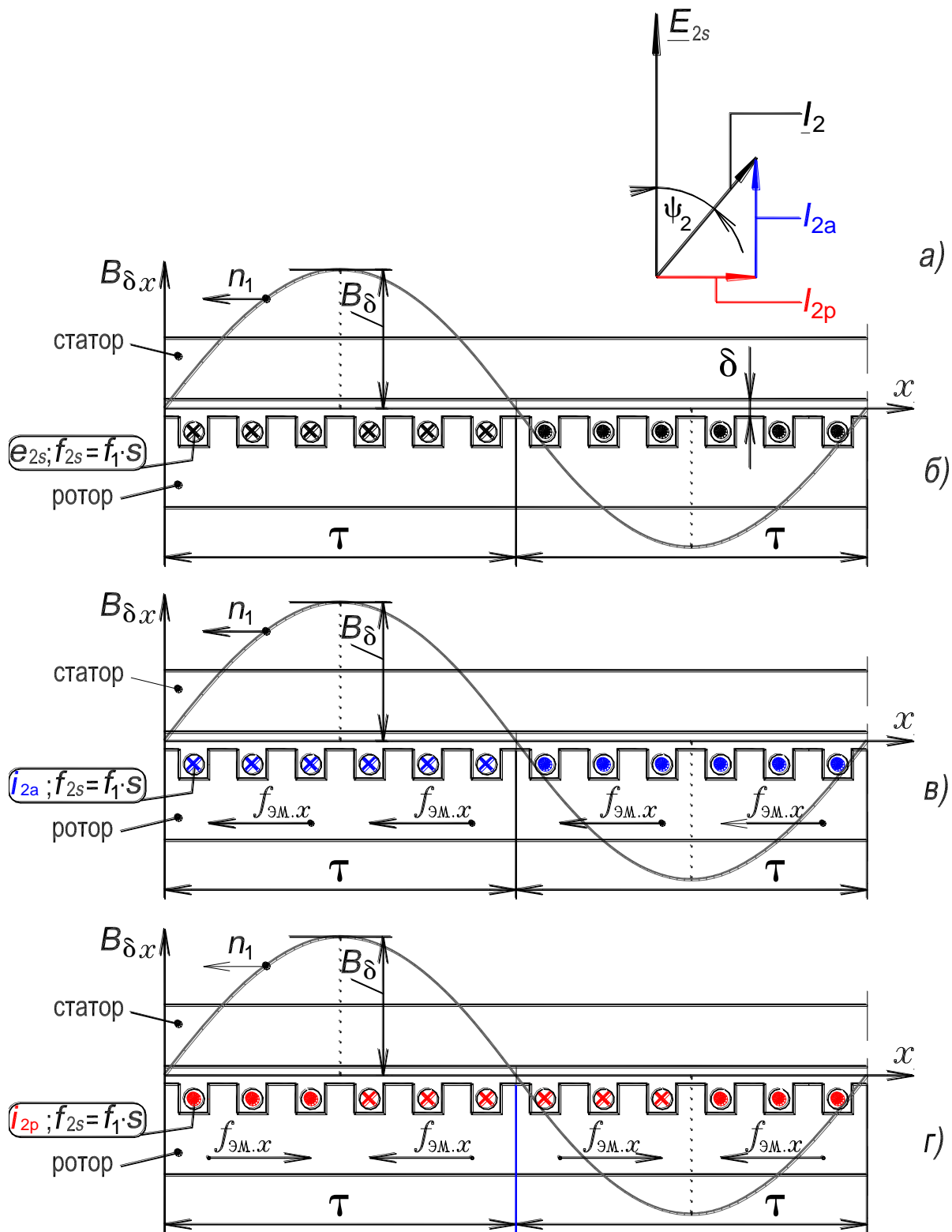


Рисунок 10.3. – Иллюстрация природы возникновения электромагнитной силы:
 векторная диаграмма ЭДС и тока обмотки ротора – (а); ЭДС в обмотке ротора – (б);
 электромагнитная сила, обусловленная взаимодействием поля с *активной*
 и с *реактивной* составляющими тока ротора – (в) и (г)

На рис. 10.3,2 знаками « \times » и « \bullet » обозначено направление реактивной составляющей тока i_{2p} ротора, которая отстает по фазе от ЭДС e_{2s} на 90° . Электромагнитные силы $f_{\text{эм.х}}$, обусловленные взаимодействием результирующего вращающегося магнитного поля с током i_{2p} , в пределах каждого полюсного деления взаимно уравновешены. Следовательно, реактивная составляющая тока ротора не создает результирующий вращающий момент. Она расходуется на создание магнитного поля.

3.2. Эквивалентное представление асинхронного двигателя с вращающимся ротором в виде двигателя с неподвижным ротором

Эквивалентное представление асинхронного двигателя с вращающимся ротором в виде двигателя с неподвижным ротором дает возможность использовать для анализа реального двигателя с вращающимся ротором элементы теории трансформатора, а именно: уравнения равновесия ЭДС и МДС, векторные диаграммы, схемы замещения и др. [7].

Такая возможность обусловлена тем, что работа и трансформатора и двигателя основана на электромагнитной связи между обмотками. Причем, если в трансформаторе поля обмоток пульсируют во времени с одной и той же частотой $f_1 = 50$ Гц, то в двигателе поля обмоток вращаются в пространстве с одной и той же скоростью $n_1 = f_1/p$, об/с [имеются в виду первые (основные) гармоники полей].

Представление будет эквивалентным в том случае, если энергетические процессы в двигателе с неподвижным ротором будут такими же, как и в реальном двигателе с вращающимся ротором.

Энергетические процессы в реальном и в эквивалентном двигателях будут совпадать, если токи в обмотках ротора эквивалентного и реального двигателей, а также их МДС, будут одинаковыми. Покажем, что для этого достаточно в каждую фазу обмотки ротора ввести (включить) добавочное активное сопротивление, равное $R_2(1-s)/s$, где R_2 — активное сопротивление фазы обмотки ротора. С этой целью запишем следующие выражения.

1) Выражение для действующего значения ЭДС в фазе обмотки ротора:

$$E_{2s} = 4,44 \cdot f_{2s} w_2 \Phi_m k_{o2}. \quad (10.8)$$

Так как частота скольжения $f_{2s} = s \cdot f_1$, то

$$E_{2s} = s \cdot E_2, \quad (10.9)$$

где $E_2 = 4,44 \cdot f_1 w_2 \Phi_m k_{o2}$ – действующее значение ЭДС фазы обмотки ротора при неподвижном роторе.

Для комплекса ЭДС справедлива запись

$$\underline{E}_{2s} = s \cdot \underline{E}_2. \quad (10.10)$$

2) Активное сопротивление фазы обмотки ротора можно считать неизменным, если не учитывать поверхностный эффект, то есть $R_2 = \text{const}$.

3) Индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора X_{2s} зависит от частоты тока ротора и, соответственно, от скольжения, то есть

$$X_{2s} = 2\pi f_{2s} L_2 = s \cdot X_2, \quad (10.11)$$

где $X_2 = 2\pi f_1 L_2$ – индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора при неподвижном роторе.

4) Полное сопротивление фазы обмотки вращающегося ротора

$$\underline{Z}_{2s} = R_2 + jX_{2s}, \quad (10.12)$$

а при неподвижном роторе полное сопротивление фазы его обмотки

$$\underline{Z}_2 = R_2 + jsX_2. \quad (10.13)$$

5) Выражение для комплекса тока обмотки вращающегося ротора, с учетом выражений (10.10), (10.12) и (10.13), записывается в виде

$$\underline{I}_2 = \underline{E}_{2s} / \underline{Z}_{2s} = s \cdot \underline{E}_2 / (R_2 + jX_{2s}) = s \cdot \underline{E}_2 / (R_2 + jsX_2). \quad (10.14)$$

Разделив числитель и знаменатель правой части выражения (10.14) на скольжение s , запишем для комплекса тока:

$$\underline{I}_2 = \underline{E}_2 / (R_2/s + jX_2), \quad (10.15)$$

где величины \underline{E}_2 , X_2 , R_2 – соответствуют неподвижному ротору.

Из сопоставления выражений (10.14) и (10.15) следует, что комплекс вторичного тока остается при неподвижном роторе таким же, как и при вращающемся роторе. Но для того чтобы это выполнялось активное сопротивление фазы обмотки ротора должно быть равным R_2/s , которое представляется в виде

$$R_2/s = R_2 + R_2(1-s)/s = R_2 + R_d. \quad (10.16)$$

Таким образом, показано, что для эквивалентного перехода от двигателя с реальным вращающимся ротором к воображаемому двигателю с неподвижным ротором необходимо в каждую фазу обмотки ротора включить гипотетическое сопротивление $R_d = R_2(1-s)/s$, причем его величина зави-

сит от скольжения или, что тоже, от частоты вращения ротора. В этом случае не только величина тока обмотки ротора остается неизменной, но и его фаза ψ_2 , так как

$$\psi_2 = \arctg(X_{2s}/R_2) = \arctg(sX_2/R_2) = \arctg[(X_2/(R_2/s))]. \quad (10.17)$$

Если принять, что значение скольжения реального двигателя с вращающимся ротором $s = 0.025$ (оно соответствует диапазону номинальных значений асинхронных двигателей общепромышленного назначения, $s_H \approx 0,02 \div 0,05$), то при переходе к рассмотрению эквивалентного двигателя с неподвижным ротором ЭДС $E_2 = E_{2s}/s$, так же как и сопротивления $x_2 = x_{2s}/s$ и R_2/s , увеличиваются в 40 раз [см. формулы (10.9), (10.11) и (10.16)]. Поэтому, как было отмечено выше, и величина тока обмотки ротора (10.15) и его фаза ψ_2 (10.17) остаются неизменными.

На рис. 10.4,а,б приведены векторные диаграммы вторичной (роторной) цепи асинхронного двигателя с вращающимся (а) и с неподвижным (б) ротором. На рис. 10.4,а величина и фаза вторичного тока, такие же, как и на рис. 10.4,б.

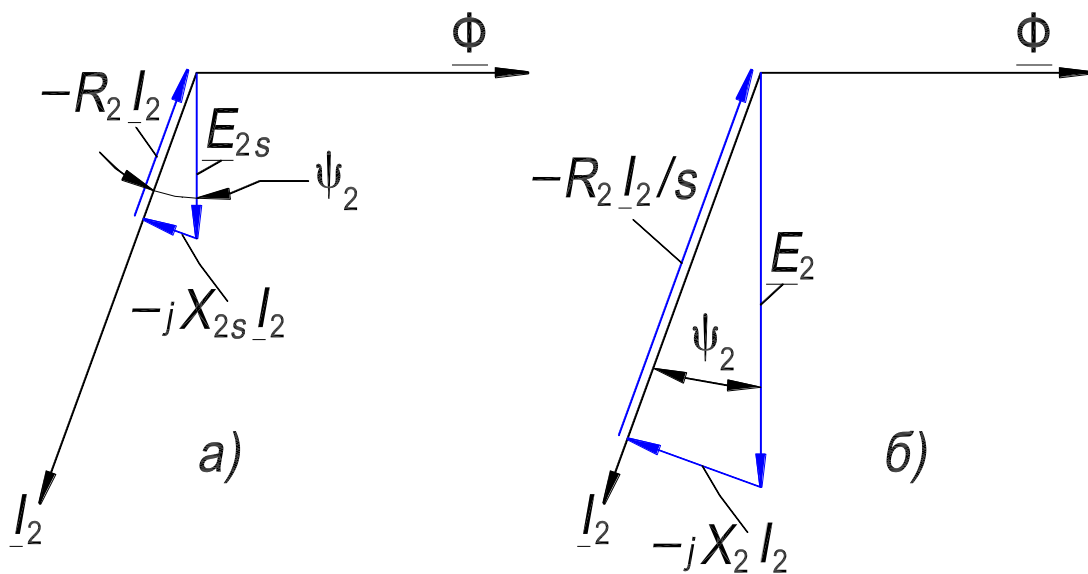


Рисунок 10.4. – Векторные диаграммы роторной цепи асинхронного двигателя: с вращающимся ротором – (а); с эквивалентным неподвижным – (б)

Векторная диаграмма (а) построена в соответствии с уравнением равновесия ЭДС вторичной обмотки

$$0 = \underline{E}_{2s} - \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_{2s} = \underline{E}_{2s} - \underline{I}_2 (R_2 + jX_{2s}) = s\underline{E}_2 - \underline{I}_2 (R_2 + jsX_2), \quad (10.18)$$

в котором вторичные ЭДС и ток имеют частоту скольжения $f_{2s} = f_1 \cdot s$.

Векторная диаграмма (б) построена в соответствии с уравнением равновесия ЭДС вторичной обмотки

$$0 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2 \cdot \underline{Z}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2(R_2/s + jX_2), \quad (10.19)$$

в котором вторичные ЭДС и ток имеют частоту скольжения $f_{2s} = f_1$, то есть такую же частоту f_1 , что и первичные ЭДС и ток.

Как следует из сопоставления (10.18) и (10.19) для записи уравнения ЭДС вторичной цепи двигателя с эквивалентным неподвижным ротором необходимо уравнение ЭДС вторичной цепи двигателя с вращающимся ротором умножить на $1/s$. То есть для перехода к двигателю с эквивалентным неподвижным ротором необходимо, чтобы активное сопротивление его роторной цепи было равно R_2/s . Это означает, что в обмотку ротора должно быть включено добавочное сопротивление $R_d = R_2(1 - s)/s$ [см. выражение (10.16)].

В разд. 3.6. Диаграмма активной мощности двигателя (с. 116) показано, что энергетические соотношения в двигателе с реальным вращающимся ротором и в воображаемом эквивалентном двигателе с неподвижным ротором одинаковы.

3.3. Приведение обмотки ротора двигателя к параметрам обмотки статора

В теории трансформатора осуществляется приведение вторичных величин трансформатора (сопротивления, ЭДС и тока вторичной обмотки и др.) к числу витков первичной обмотки [7, с. 24]. Для приведения реальное число витков вторичной обмотки w_2 заменяется на число витков первичной обмотки w_1 . Такой трансформатор называется приведенным, его коэффициент трансформации $k = w_1/w_2$ равен единице (у реального трансформатора коэффициент трансформации значительно больше, например, у трансформатора с соотношением напряжения обмоток 10/0,4 кВ он практически равен 25-ти). *Приведение обеспечивает эквивалентную замену магнитно-связанных цепей первичной и вторичной обмоток электрически связанными цепями их и делает более удобным изображение векторных диаграмм.* Коэффициент, связывающий реальные вторичные величины с приведенными, называется коэффициентом приведения. Коэффициентом приведения вторичных величин в трансформаторе является коэффициент трансформации реального (приводимого) трансформатора в первой или второй степени [7, с. 24].

Так как в основе принципа действия асинхронного двигателя, как и трансформатора, является взаимоиндуктивная связь между обмотками, посредством, соответственно, вращающегося магнитного поля и пульсирующего магнитного поля, то и в теории асинхронного двигателя осуществляется подобное приведение. Вместе с тем, в двигателе обмотка ротора (это вторичная обмотка) отличается от обмотки статора не только числом витков (что имеет место в трансформаторе), а также числом фаз (в общем случае) и обмоточным коэффициентом.

Поэтому выражение для коэффициента приведения обмотки ротора двигателя будет более сложным, чем у трансформатора. Обозначение приведенных вторичных величин, как и у трансформатора, отличается от обозначения реальных вторичных величин наличием штрихов, «'». Приведенные ЭДС и токи вторичной обмотки рассчитываются так, чтобы энергетические и основные электромагнитные соотношения в двигателе не нарушались. Далее записываются выражения для коэффициентов приведения (их вывод не приводится) [3].

Коэффициент приведения ЭДС и напряжений k_u связывает реальную ЭДС E_2 и приведенную E_2' , то есть $E_2' = k_u E_2$,

$$k_u = w_1 k_{o1} / w_2 k_{o2} k_c.$$

Коэффициент приведения тока k_i связывает реальный ток I_2 и приведенный I_2' , то есть $I_2' = I_2 / k_i$,

$$k_i = m_1 w_1 k_{o1} / m_2 w_2 k_{o2} k_c,$$

где m_1 и m_2 – число фаз соответственно обмотки статора и ротора. У двигателя с фазным ротором $m_2 = m_1$, а у двигателя с беличьей клеткой $m_2 = Z_2$; $w_2 = 1/2$; $k_{o2} = 1$; I_2 – ток в стержне.

Коэффициентом приведения активного R_2 , индуктивного X_2 и полного Z_2 сопротивлений вторичной обмотки к первичной, является произведение коэффициентов $k_u k_i$. Приведенные значения вторичных сопротивлений определяются как

$$R_2' = k_u k_i R_2; \quad X_2' = k_u k_i X_2 \text{ и } Z_2' = k_u k_i Z_2.$$

Выражения для обмоточных коэффициентов k_{o1} , k_{o2} и коэффициента скоса k_c приведены в разд. 8.5. ЭДС пространственно-распределенной обмотки, с. 71, сл.

3.4. Уравнения равновесия ЭДС (напряжений) и МДС двигателя с приведенной вторичной обмоткой

Ротор двигателя заменен эквивалентным неподвижным (см. разд. 3.2), активное сопротивление его вторичной цепи R_2'/s . Уравнения двигателя выводятся также, как и для трансформатора, и имеют качественно практически такой же вид [7, с. 25].

Уравнение равновесия ЭДС (напряжений) для первичной обмотки (статора):

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1(R_1 + jX_1). \quad (10.20)$$

Уравнение равновесия ЭДС для вторичной обмотки (ротора):

$$0 = \underline{E}_2' - \underline{I}_2' \underline{Z}_2' = \underline{E}_2' - \underline{I}_2'(R_2'/s + jX_2'). \quad (10.21)$$

Уравнение равновесия МДС (токов) обмоток двигателя:

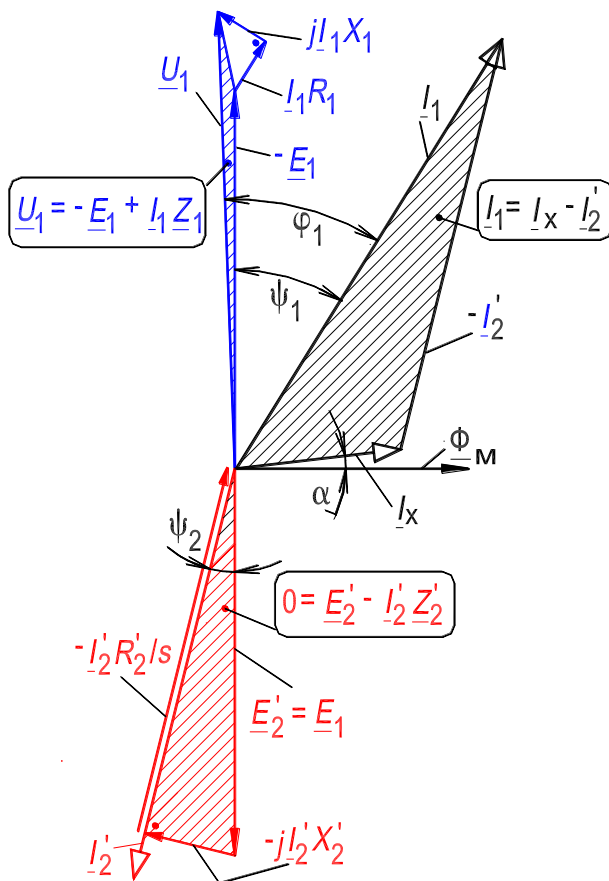
$$\underline{I}_1 = \underline{I}_x + (-\underline{I}_2'). \quad (10.22)$$

Комплексные уравнения (10.20) – (10.22) являются уравнениями равновесия ЭДС (напряжений) и МДС при установившемся симметричном режиме работы двигателя.

Содержание (смысл) этих уравнений и величин входящих в них такой же, как и у трансформатора. Но есть количественные отличия: 1) уравнение (10.21) в левой части содержит ноль, так как обмотка ротора двигателя в рабочем режиме всегда замкнута; 2) ток холостого хода двигателя I_x составляет (25–50) % от номинального первичного тока, а у трансформатора примерно (1–3) %. Такое большое отличие обусловлено тем, что основной магнитный поток двигателя замыкается в магнитопроводе по пути с бóльшим магнитным сопротивлением.

3.5. Векторная диаграмма двигателя с приведенной вторичной обмоткой

Векторная диаграмма строится в соответствии с уравнениями (10.20) – (10.22) так же, как и для трансформатора [7, с. 26]. Диаграмма показана на рис. 10.5, в таблице приведена последовательность изображения векторов. Диаграмма двигателя отличается от диаграммы трансформатора: отсутствием вектора вторичного напряжения; большей длиной вектора тока холостого хода; меньшим углом ψ_2 , так как сопротивление R_2'/s значительно больше сопротивления X_2' .



Последовательность изображения векторов на диаграмме			
№	Вектор	№	Вектор
1	Φ_M	7	$-\underline{E}_1$
2	\underline{I}_x	8	$\underline{I}_1 R_1$
3	$\underline{E}_2' = \underline{E}_1$	9	$j\underline{I}_1 X_1$
4	\underline{I}_2'	10	\underline{U}_1
5	$-\underline{I}_2'$	11	$-\underline{I}_2' X_2'$
6	\underline{I}_1	12	$-\underline{I}_2' R_2'/s$

Рисунок 10.5 – Векторная диаграмма асинхронного двигателя

3.6. Энергетическая диаграмма двигателя с приведенной вторичной обмоткой

3.6.1. Диаграмма активной мощности.

Коэффициент полезного действия

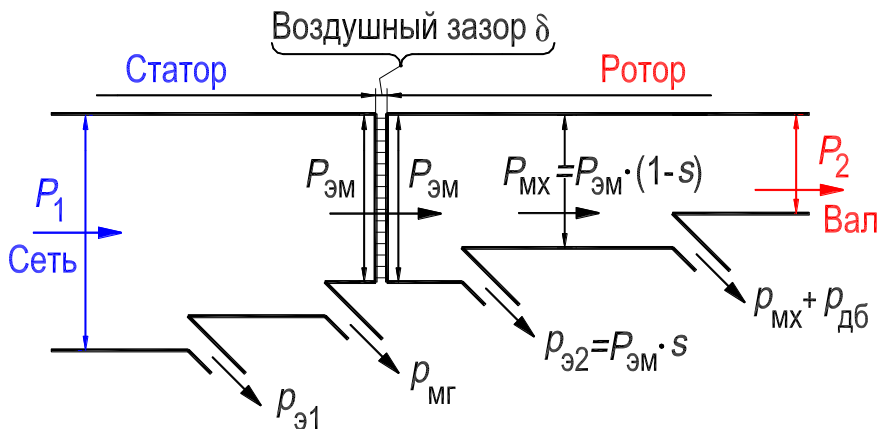


Рисунок 10.6. – Энергетическая диаграмма активной мощности двигателя

Рис. 10.6 иллюстрирует процесс преобразования активной мощности P_1 (это первичная мощность), потребляемой двигателем из электрической сети, в полезную механическую мощность на валу двигателя P_2 (это вторичная мощность). Рассмотрим составляющие мощности, представленные на диаграмме.

Активная мощность, потребляемая трехфазным двигателем ($m_1 = 3$)

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1. \quad (10.23)$$

Мощность электрических потерь в активном сопротивлении R_1 первичной обмотки:

$$p_{\varepsilon 1} = m_1 I_1^2 R_1. \quad (10.24)$$

Электромагнитная мощность, передаваемая посредством вращающегося магнитного поля со статора на ротор

$$P_{\varepsilon \text{м}} = P_1 - p_{\varepsilon 1} - p_{\text{мг}}, \quad (10.25)$$

где $p_{\text{мг}}$ – мощность магнитных потерь в сердечнике статора.

Мощность электрических потерь в активном сопротивлении вторичной обмотки:

$$p_{\varepsilon 2} = m_1 I_2'^2 R_2' = m_2 I_2^2 R_2. \quad (10.26)$$

Механическая мощность $P_{\text{мх}}$, развиваемая на роторе:

$$P_{\text{мх}} = P_{\varepsilon \text{м}} - p_{\varepsilon 2}. \quad (10.27)$$

Магнитные потери в сердечнике ротора при нормальных рабочих режимах обычно очень малы, так как частота перемагничивания вращающимся полем сердечника ротора незначительна (см. разд. 3.1). Они отдельно не учитываются.

Полезная механическая мощность на валу P_2 , или вторичная мощность

$$P_2 = P_{\text{мх}} - p_{\text{мх}} - p_{\text{дб}}, \quad (10.28)$$

где $p_{\text{мх}}$ – мощность механических потерь на трение; $p_{\text{дб}}$ – мощность добавочных потерь в магнитопроводе и в обмотках, они составляют незначительную величину и их принимают равными 0,5 % от подводимой мощности при номинальной нагрузке.

Сумма всех потерь двигателя (это *абсолютная* величина всех потерь в двигателе)

$$\Sigma p = p_{\varepsilon 1} + p_{\text{МГ}} + p_{\varepsilon 2} + p_{\text{МХ}} + p_{\text{дб}}$$

и

$$P_2 = P_1 - \Sigma p. \quad (10.29)$$

КПД двигателя

$$\eta = P_2/P_1 = 1 - \Sigma p/P_1, \quad (10.30)$$

где $\Sigma p/P_1$ – *относительные* потери мощности в двигателе. С увеличением мощности двигателя, его *относительные* потери мощности уменьшаются, а КПД растет.

КПД характеризует какая часть потребляемой активной мощности преобразуется в полезную, так как $P_2 = \eta P_1$.

КПД двигателей мощностью $P_{\text{н}} = 1 \div 1000$ кВт при номинальной нагрузке находится соответственно в пределах $\eta_{\text{н}} = 72 \div 95$ %. Более высокие КПД имеют двигатели большей мощности и с большей скоростью вращения.

Покажем, что в энергетическом отношении вращающийся ротор двигателя и эквивалентный ему неподвижный ротор идентичны (в цепь последнего включено добавочное сопротивление $R_{\text{д}} = R_2(1 - s)/s$). Как следует из выражения (10.27) электромагнитная мощность, передаваемая на вращающийся ротор

$$P_{\text{ЭМ}} = P_{\text{МХ}} + p_{\varepsilon 2}, \quad (10.31)$$

преобразуется в механическую мощность на роторе и в мощность электрических потерь в обмотке вращающегося ротора. Если вращающийся ротор заменен эквивалентным неподвижным, то $P_{\text{МХ}} = 0$, а электрические потери в обмотке ротора $p_{\varepsilon 2}$ представляются, с учетом (10.16) и (10.26), в виде:

$$p_{\varepsilon 2}^* = p_{\varepsilon 2}/s = m_2 I_2^2 R_2/s = m_2 I_2^2 R_2 + m_2 I_2^2 R_2(1 - s)/s. \quad (10.32)$$

Запишем (10.31) для двигателя с эквивалентным неподвижным ротором

$$P_{\text{ЭМ}} = 0 + p_{\varepsilon 2}^* = m_2 I_2^2 R_2(1 - s)/s + m_2 I_2^2 R_2 = P_{\text{д}} + p_{\varepsilon 2}, \quad (10.33)$$

откуда следует, в двигателе с неподвижным ротором вся электромагнитная мощность превращается в электрическую мощность, выделяемую в виде тепла в сопротивлении R_2/s .

Сопоставляя (10.31), (10.32) и (10.33) приходим к выводу, что механическая мощность $P_{\text{МХ}}$ на вращающемся роторе численно равна мощности электрических потерь $P_{\text{д}}$ в сопротивлении $R_{\text{д}} = R_2(1 - s)/s$, включаемом

в цепь обмотки эквивалентного неподвижного ротора, то есть

$$P_{\text{МХ}} = P_{\text{д}} = m_2 I_2^2 R_2 (1 - s) / s = m_1 I_2'^2 R_2' (1 - s) / s = p_{\text{э2}} (1 - s) / s. \quad (10.34)$$

На энергетической диаграмме (рис. 10.6) отражено, что мощность электрических потерь в обмотке ротора и механическая мощность двигателя зависят от скольжения. Покажем это. Сопоставляя (10.31) и (10.34) легко выразить потери электрической мощности в обмотке ротора в зависимости от скольжения

$$p_{\text{э2}} = s P_{\text{эм}}, \quad (10.35)$$

их также называют мощностью скольжения, аналогично названию частоты $f_{2s} = s f_1$ – частота скольжения. Подставляя выражение (10.35) в (10.34), получаем:

$$P_{\text{МХ}} = P_{\text{эм}} (1 - s). \quad (10.36)$$

Из соотношений (10.35) и (10.36) следует, что электромагнитная мощность $P_{\text{эм}}$ подразделяется на составляющие $p_{\text{э2}}$ и $P_{\text{МХ}}$ пропорционально s и $(1 - s)$ и при заданной величине $P_{\text{эм}}$ потери $p_{\text{э2}}$ пропорциональны скольжению s . Поэтому для уменьшения $p_{\text{э2}}$ и получения хорошего КПД необходимо, чтобы s было мало. В асинхронных двигателях общепромышленного назначения при номинальной нагрузке $s_{\text{н}} \approx 0,02 \div 0,05$. Очевидно, что требование малости $s_{\text{н}}$ сопряжено с требованием малости R_2 .

В заключение подчеркнем, что процесс преобразования энергии в асинхронном двигателе с эквивалентным неподвижным ротором, в фазы которого введено дополнительное сопротивление $R_{\text{д}}$, не отличается от процесса преобразования энергии в трансформаторе, к вторичной обмотке которого подключена электрическая нагрузка с сопротивлением $R_{\text{д}}$.

Двигатель с эквивалентным неподвижным ротором, у которого величины во всех цепях обмоток статора и ротора изменяются с частотой f_1 , представляет собой трансформатор с вращающимся полем с синхронной частотой n_1 .

Уравнение ЭДС (напряжений) обмотки ротора такого двигателя ничем не отличается от уравнения ЭДС (напряжений) вторичной обмотки трансформатора [7, с. 25]:

$$\underline{U}_2' = \underline{E}_2' - \underline{I}_2' \underline{Z}_2' = \underline{E}_2' - \underline{I}_2' (R_2' / s + jX_2'), \quad (10.37)$$

где \underline{U}_2' – напряжение на эквивалентной нагрузке с сопротивлением $R_{\text{д}}' = R_2' (1 - s) / s$.

3.6.2. Баланс реактивных мощностей двигателя.

Коэффициент мощности

Выражение для реактивной мощности Q_1 , потребляемой трехфазным двигателем из электрической сети, в которую включена обмотка статора, записывается в виде:

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1. \quad (10.38)$$

Также как и в трансформаторе, реактивная мощность в двигателе расходуется на создание магнитного поля, которое имеет три составляющие: 1) основное вращающееся поле, силовые линии которого замыкаются по статору и по ротору и пересекают радиальный зазор δ ; 2) пульсирующие поля рассеяния обмотки статора; 3) пульсирующие поля рассеяния обмотки ротора. Силовые линии полей рассеяния сцеплены только с создавшими их обмотками, и они не пересекают зазор δ (рис. 8.29, с. 86). Напомним, что активная мощность P_1 , потребляемая двигателем из сети, за вычетом абсолютных потерь мощности Σp в двигателе, преобразуется в полезную механическую мощность P_2 , снимаемую с вала.

На создание полей рассеяния первичной цепи расходуется реактивная мощность

$$q_1 = m_1 I_1^2 X_1. \quad (10.39)$$

Реактивная мощность

$$Q_{12} = m_1 E_1 I_{x.p} = m_1 I_x^2 X_{12} \quad (10.40)$$

расходуется на создание основного вращающегося магнитного поля двигателя, а мощность

$$q_2 = m_1 I_2'^2 X_2' = m_2 I_2^2 X_2 \quad (10.41)$$

– на создание вторичных полей рассеяния. При этом баланс реактивных мощностей

$$Q_1 = q_1 + Q_{12} + q_2. \quad (10.42)$$

В выражении (10.39) величина X_1 – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора; в выражении (10.40) величина X_{12} – сопротивление взаимной индукции между обмотками статора и ротора; в выражении (10.41) величина X_2 – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора; для сравнения индуктивные сопротивления обмоток трансформатора – [7, с. 24, сл.].

Основную часть реактивной мощности составляет мощность Q_{12} , которая из-за наличия воздушного зазора δ и большого намагничивающего тока I_x (ток х. х.) значительно больше, чем в трансформаторах. Большие значения Q_{12} и I_x существенно влияют на коэффициент мощности двигателя и снижают его

$$\cos \varphi_1 = P_1/S_1 = P_1/(P_1^2 + Q_1^2)^{1/2}. \quad (10.43)$$

Коэффициент мощности характеризует, какая часть полной мощности S_1 , потребляемой двигателем из сети, является активной мощностью P_1 , так как $P_1 = S_1 \cos \varphi_1$.

Обычно у асинхронных двигателей $\cos \varphi_{1н} = 0,70 \div 0,95$. Большие значения относятся к мощным двигателям с числом пар полюсов $p = 1$ и 2 . При уменьшении нагрузки двигателя коэффициент значительно уменьшается, до значения $\cos \varphi_x \approx 0,10 \div 0,15$ при холостом ходе.

3.7. Схемы замещения асинхронного двигателя

В соответствии с уравнениями равновесия ЭДС и МДС составляются схемы замещения трансформатора [7, разд. 3.2, с. 24, сл.] и асинхронного двигателя. На основе этих схем определяются аналитически токи и мощности трансформатора и двигателя. Кроме того на основе схемы замещения строится круговая диаграмма асинхронного двигателя по которой определяются графоаналитически ряд важных характеристик двигателя (см. разд. 3.12, с. 155, сл.).

3.7.1. Т-образная схема замещения двигателя

Уравнениям (10.20), (10.21) и (10.22) соответствует Т-образная схема замещения двигателя (рис. 10.7,а) с эквивалентным неподвижным ротором. Она отличается от Т-образной схемы замещения трансформатора [7, рис. 1.2,а] наличием сопротивления $R_2'(1-s)/s$ [см. формулу (10.16)], которое соответствует механической мощности, развиваемой на роторе двигателя [см. формулу (10.34)].

Ветвь схемы А-1 с током I_1 и сопротивлениями R_1 и X_1 представляет обмотку статора [см. уравнение (10.20)]. Индуктивное сопротивление X_1 обмотки обусловлено ее потоками рассеяния.

Ветвь схемы а-1 с током $-I_2'$ и сопротивлениями R_2' и X_2' представляет обмотку ротора [см. уравнение (10.21)]. Индуктивное сопротивление X_2' обмотки обусловлено ее потоками рассеяния.

Ветвь схемы 1-2 с током I_x и сопротивлениями R_M и X_M представляет намагничивающий контур [см. уравнение (10.22)]. Индуктивное сопротивление взаимной индукции X_M обусловлено основным магнитным потоком. Сопротивление R_M фиктивное, его численное значение, как и в трансформаторе, определяется величиной потерь в стали магнитопровода.

Сопротивление намагничивающего контура схемы замещения двигателя существенно меньше, чем у трансформатора. Это объясняется наличием у двигателя воздушного зазора между статором и ротором и относительным увеличением магнитного сопротивления пути основного магнитного потока. Поэтому ток холостого хода двигателя существенно больше, чем у трансформатора и составляет $(0,25-0,5)I_{1н}$.

3.7.2. Г-образная схема замещения двигателя

При изменении тока статора I_1 в Т-образной схеме замещения двигателя (рис. 10.7,а) изменяется ЭДС $-E_1$ на намагничивающем контуре и ток I_x в нем [см. уравнение (10.20)]. Это создает неудобство при анализе двигателя на основе Т-образной схемы, которое может быть устранено, если намагничивающий контур вынести на зажимы А-Х, к которым приложено напряжение сети \underline{U}_1 . В этом случае получается Г-образная схема замещения двигателя. Г-образная схема получена в результате эквивалентного преобразования Т-образной схемы и показана на рис. 10.7,б (это преобразование не рассматривается) [3, 4].

Коэффициент приведения σ для двигателей мощностью в несколько киловатт может быть приближенно определен из выражения:

$$\sigma \approx 1 + x_1/x_M \approx 1,02 \div 1,05.$$

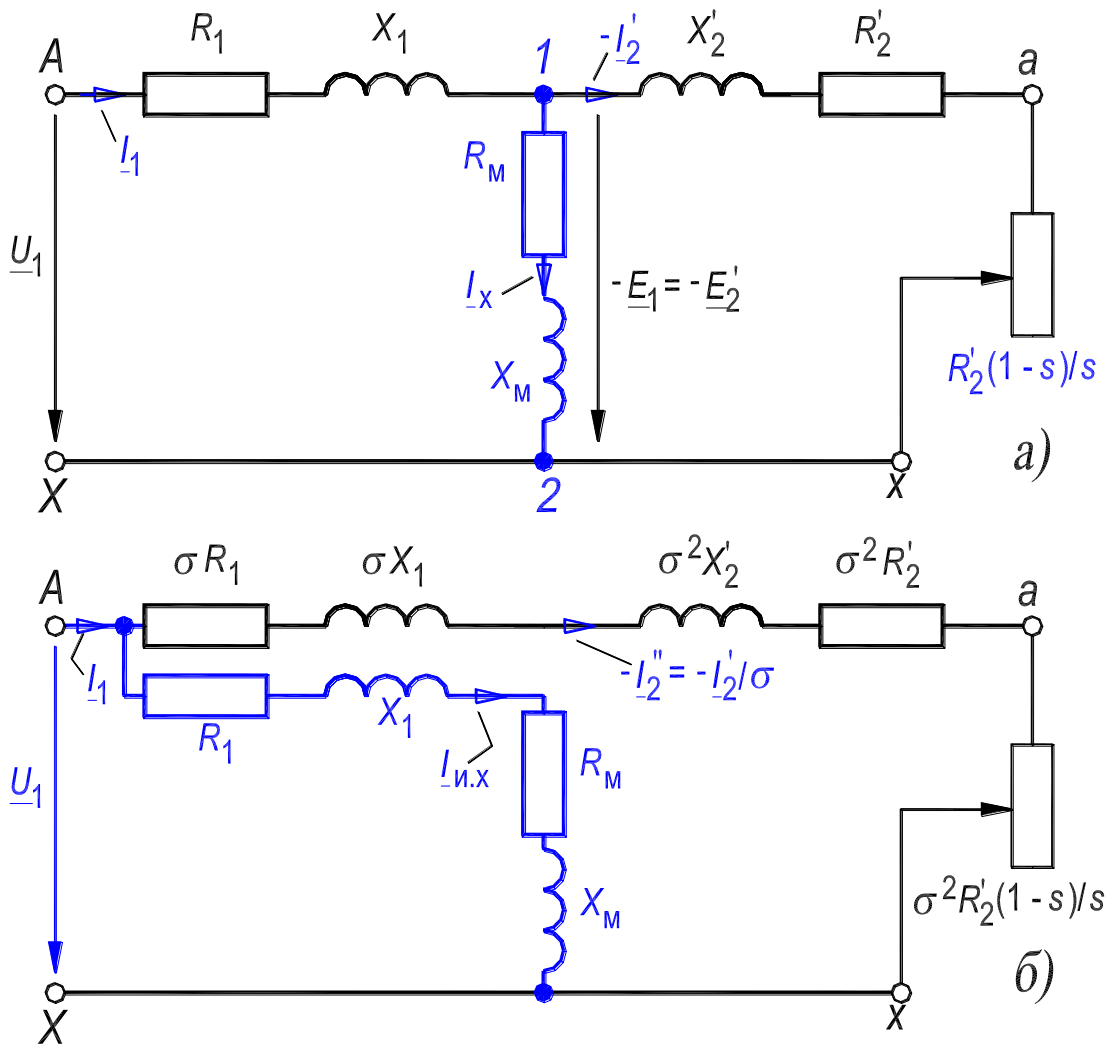


Рисунок 10.7. – Схемы замещения двигателя:

Т-образная схема – (а); Г-образная схема – (б)

При более строгом анализе необходимо учитывать, что коэффициент приведения является комплексным числом. В схеме рис. 10.7,б ток $I_{и.х}$ является током идеального холостого хода двигателя, он не зависит от скольжения и определяется при скольжении $s = 0$. Поэтому токи I_1 и I_2' рассчитываются при различных значениях скольжения проще, чем на основе Т-образной схемы.

При скольжении $s = 0$ (идеальный х. х.) ротор вращается с той же скоростью, что и основной магнитный поток, поэтому вторичные ЭДС и ток равны нулю. При этом двигатель не развивает вращающий момент и, следовательно, самостоятельно двигатель не может достичь синхронной скорости вращения.

При реальном х. х. двигателя скольжение весьма незначительно больше нуля, а скорость ротора чуть меньше скорости поля.

3.8. Вращающий момент асинхронного двигателя

В разд. 3.1 приведена формула (10.1) для электромагнитного момента, отражающая связь момента M со следующими величинами, зависящими от скольжения: потоком Φ , активной составляющей тока ротора I_{2a} и углом сдвига ψ_2 тока относительно ЭДС обмотки ротора. На основе этой формулы рассмотрена природа возникновения момента. Однако эта формула не отражает важную прямую связь момента со скольжением и, соответственно, со скоростью ротора. В следующем разделе момент M выражен через приложенное фазное напряжение U_1 , параметры двигателя и скольжение s .

3.8.1. Электромагнитный момент и его зависимость от скольжения

Электромагнитный момент M , развиваемый электромагнитными силами на роторе асинхронного двигателя, определяется равенствами

$$M = P_{\text{мх}}/2\pi n = P_{\text{мх}}/\Omega, \quad (10.44)$$

или

$$M = P_{\text{эм}}/2\pi n_1 = P_{\text{эм}}/\Omega_1, \quad (10.45)$$

где $P_{\text{мх}}$ – механическая мощность на роторе, выражение (10.34); n – скорость вращения ротора, Ω – его угловая скорость; $P_{\text{эм}}$ – электромагнитная мощность, передаваемая посредством магнитного поля со статора на ротор, и распределяемая на электрические потери в обмотке ротора $p_{\text{э2}} = sP_{\text{эм}}$ (10.35) и механическую мощность на роторе $P_{\text{мх}} = P_{\text{эм}}(1 - s)$ (10.36); n_1 – синхронная скорость вращения поля, Ω_1 – его угловая скорость.

Для вывода зависимости электромагнитного момента M от скольжения s , воспользуемся выражением (10.44), которое с учетом (10.34) и (10.4) представим в виде:

$$M = m_1 I_2'^2 R_2' (1 - s) / s 2\pi n = m_1 I_2'^2 R_2' / s 2\pi n_1 = p m_1 I_2'^2 R_2' / s 2\pi f_1. \quad (10.46)$$

На основе Г-образной схемы запишем выражение для приведенного тока ротора

$$I_2' = \sigma I_2'' = \sigma U_1 / [(\sigma R_1 + \sigma^2 R_2' / s)^2 + (\sigma X_1 + \sigma^2 X_2')^2]^{1/2}. \quad (10.47)$$

На основании равенств (10.46) и (10.47) искомая зависимость момента M от скольжения s имеет вид:

$$M = (p m_1 U_1^2 R_2' / s) / 2\pi f_1 [(R_1 + \sigma R_2' / s)^2 + (X_1 + \sigma X_2')^2] = f(s). \quad (10.48)$$

При пользовании единицами системы СИ момент M в формулах (10.1), (10.46) и (10.48) выражается в Ньютон·метрах, Н·м.

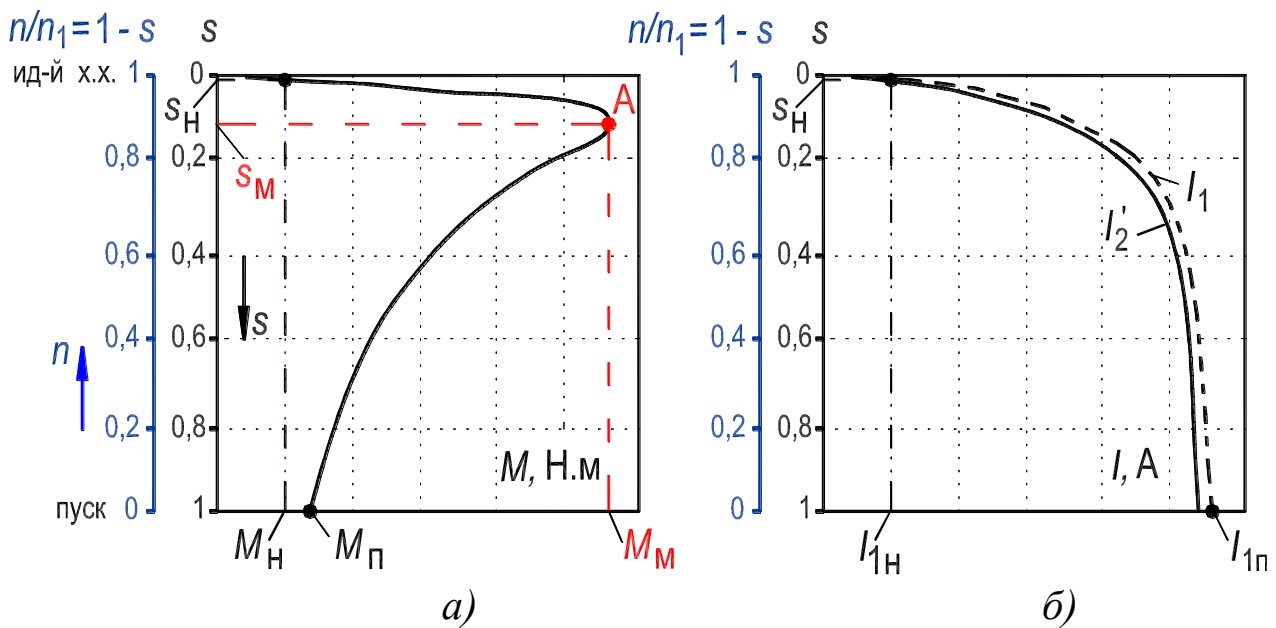


Рисунок 10.8. – Кривые электромагнитного момента – (а) и токов асинхронного двигателя – (б)

Согласно выражению (10.48), электромагнитный момент при любом заданном значении скольжения s пропорционален квадрату приложенного напряжения U_1 (то есть двигатель чувствителен к колебаниям напряжения) и тем меньше, чем больше R_1 и индуктивные сопротивления рассеяния X_1 и X_2' двигателя. В соответствии с формулой (10.46) при любом заданном s величина M пропорциональна также квадрату тока обмотки ротора.

Зависимость $M = f(s)$ при $U_1 = \text{const}$ и постоянных параметрах двигателя, построенная по соотношению (10.48), показана на рис. 10.8,а. Для удобства анализа, кроме оси скольжения s , также изображена ось относительной скорости ротора $n/n_1 = 1 - s$. На рис. 10.8,б показана кривая тока I_2' , построенная по соотношению (10.47), и кривая первичного тока I_1 .

При увеличении скольжения от $s = 0$ до $s = s_M$ момент M растет вместе с увеличением s , а при дальнейшем увеличении скольжения момент M уменьшается, несмотря на увеличение I_2' . Такой ход кривой $M = f(s)$ объясняется тем, что с увеличением s ток I_2' становится все более индуктивным (увеличивается частота скольжения $f_{2s} = s \cdot f_1$). Поэтому активная составляющая тока I_2' , которая определяет величину M (см. разд. 3.1), при увеличении s , сначала растет вместе с I_2' , а затем начинает уменьшаться, несмотря на увеличение I_2' . Следует также учитывать, что с увеличением I_1 падение напряжения в первичной цепи увеличивается, а соответственно этому ЭДС E_1 и поток Φ , во взаимодействии с кото-

рым создается момент, несколько уменьшаются [см. уравнение (10.20) и формулу (8.41)].

На статор двигателя действует такой же вращающий момент, как и на ротор, но направленный в противоположную сторону (ср. на векторной диаграмме рис. 10.5 фазы тока статора и ротора). Момент, действующий на статор, воспринимается деталями и узлами, крепящими машину к фундаменту.

3.8.2. Максимальный электромагнитный момент

Решая уравнение (вывод не приводится) [1–4]

$$dM/ds = 0, \quad (10.49)$$

предполагая в выражении (10.48) постоянными величины U_1 , f_1 , а также параметры двигателя, найдем выражение для скольжения s_M , называемого критическим, и соответствующее ему выражение для максимального момента M_M ,

Выражение для критического скольжения s_M двигателя

$$s_M = \sigma R_2' / [R_1^2 + (X_1 + \sigma X_2')^2]^{1/2}. \quad (10.50)$$

Выражение для максимального момента M_M двигателя

$$M_M = (pt_1 U_1^2) / 2\pi f_1 \sigma \{R_1 + [R_1^2 + (X_1 + \sigma X_2')^2]^{1/2}\}. \quad (10.51)$$

Для асинхронных двигателей общепромышленного применения слагаемые с R_1 в выражениях (10.50) и (10.51) малы по сравнению с остальными. Принимая $R_1 = 0$, получим

$$s_M \approx \sigma R_2' / (X_1 + \sigma X_2'), \quad (10.52)$$

$$M_M \approx (pt_1 U_1^2) / 2\pi f_1 \sigma (X_1 + \sigma X_2'). \quad (10.53)$$

Соотношения (10.52) и (10.53) позволяют сделать вывод, что значение максимального момента, во-первых, не зависит от активного сопротивления роторной цепи; во-вторых, пропорционально квадрату напряжения U_1 ; в-третьих, с большой точностью обратно пропорционально индуктивным сопротивлениям рассеяния обмоток. Так как напряжение U_1 пропорционально произведению $f_1 \Phi$ [см. уравнение (10.20) и формулу (8.41)], то из выражения (10.53) можно сделать также вывод, что максимальный момент пропорционален квадрату магнитного потока машины.

Существенным является тот факт, что, хотя максимальный момент M_M не зависит от активного сопротивления роторной цепи, но значение критического скольжения s_M , которому соответствует этот момент, изменяется

пропорционально этому сопротивлению [см. выражения (10.52) и (10.53)]. Этот факт принят во внимание при осуществлении пуска двигателя с фазным ротором (см. разд. 3.1 в Л. Р. №2).

У асинхронных двигателей общепромышленного применения кратность максимального момента при номинальном напряжении

$$k_M = M_M/M_H \approx 1,7 \div 3,0,$$

а значение критического скольжения составляет

$$s_M \approx 0,06 \div 0,15.$$

Более высокие k_M имеют двигатели с малым числом полюсов.

3.8.3. Начальный пусковой электромагнитный момент

Начальный пусковой электромагнитный момент M_{Π} соответствует значению электромагнитного момента в начальный момент пуска двигателя, т. е. при $s = 1$ ($n = 0$). Согласно выражению (10.48),

$$M_{\Pi} = (pm_1 U_1^2 R_2') / 2\pi f_1 [(R_1 + \sigma R_2')^2 + (X_1 + \sigma X_2')^2]. \quad (10.54)$$

Пусковой момент при постоянстве параметров двигателя также пропорционален квадрату приложенного напряжения U_1 .

Из выражения (10.54) следует, что с увеличением R_2' момент M_{Π} растет. Но только до тех пор, пока при $s_M = 1$ пусковой момент не станет равным максимальному моменту, то есть $M_{\Pi} = M_M$. При этом, согласно равенству (10.50)

$$R_2' = [R_1^2 + (X_1 + \sigma X_2')^2]^{1/2} / \sigma. \quad (10.55)$$

При дальнейшем увеличении R_2' момент M_{Π} будет снова уменьшаться.

В то же время значение пускового тока $I_{2\Pi}'$ в обмотке ротора (оно имеет место при $s = 1$) при увеличении R_2' согласно выражению (10.47), непрерывно уменьшается. Увеличение M_{Π} , несмотря на уменьшение I_2' при увеличении R_2' до значения, определяемого равенством (10.55), объясняется тем, что при этом уменьшается угол сдвига ψ_2 между током I_2' и ЭДС E_2' и, соответственно, возрастает активная составляющая тока ротора.

Момент, как показано выше в разд. 3.1, обусловлен взаимодействием магнитного потока двигателя именно с активной составляющей тока ротора. Данный вопрос будет проанализирован более подробно при рассмотрении пуска двигателя с фазным ротором (разд. 3.1 в Л.Р. №2).

У асинхронных двигателей общепромышленного применения кратность начального пускового момента при номинальном напряжении

$$k_{\Pi} = M_{\Pi}/M_{\text{H}} \approx 0,8 \div 1,7,$$

а значение кратности пускового тока

$$k_i = I_{1\Pi}/I_{1\text{H}} \approx 4,5 \div 7,0.$$

3.8.4. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Полезный вращающий момент на валу двигателя M_2 меньше электромагнитного момента M на величину момента холостого хода

$$M_{\text{X}} = (p_{\text{MX}} + p_{\text{д}})/2\pi n = (p_{\text{MX}} + p_{\text{д}})/\Omega, \quad (10.56)$$

который соответствует механическим p_{MX} и добавочным потерям $p_{\text{д}}$, покрываемым за счет механической мощности P_{MX} на роторе. Поэтому

$$M_2 = M - M_{\text{X}}. \quad (10.57)$$

Механическая характеристика двигателя представляет собой зависимость скорости вращения n от развиваемого момента на валу M_2 при $U_1 = \text{const}$ и $f_1 = \text{const}$:

$$n = f(M_2) \text{ или } M_2 = f(n).$$

Так как при нагрузке момент M_{X} мал по сравнению с M и M_2 , то можно положить $M_{\text{X}} \approx 0$ или включить M_{X} в значение статического тормозного момента $M_{\text{ст}}$, который развивается механизмом, приводимым во вращение асинхронным двигателем. Поэтому далее в качестве механической характеристики двигателя будем рассматривать зависимость между n (или s) и электромагнитным моментом M :

$$n = f(M) \text{ или } M = f(n). \quad (10.58)$$

Изображенная на рис. 10.8,а кривая момента M при указанных условиях представляет собой механическую характеристику асинхронного двигателя с постоянными параметрами.

Очевидно, что вид механической характеристики существенно зависит от значения вторичного активного сопротивления, так как от этого сопротивления зависит s_{M} и не зависит M_{M} (см. разд. 3.8.2).

3.8.5. Статическая устойчивость работы агрегата

«асинхронный двигатель – производственный механизм»

Характер зависимостей $M = f(n)$ двигателя и $M_{\text{ст}} = f(n)$ производ-

ственного механизма существенно влияет на статическую устойчивость работы всего агрегата.

На рис. 10.9 показана механическая характеристика $M = f(n)$ асинхронного двигателя и механическая характеристика $M_{ст} = f(n)$ производственного механизма, приводимого во вращение двигателем. Такой характеристикой обладают, например, некоторые токарные, расточные, фрезерные и другие металлообрабатывающие станки. В качестве электропривода для них служит асинхронный двигатель.

Уравнение моментов агрегата «двигатель – производственный механизм» при переменной скорости вращения $n = \text{var}$ имеет вид

$$M = M_{ст} + M_{дин}, \quad (10.59)$$

где

$$M_{дин} = 2\pi J dn/dt \quad (10.60)$$

представляет собой динамический вращающий момент агрегата, пропорциональный моменту его инерции J .

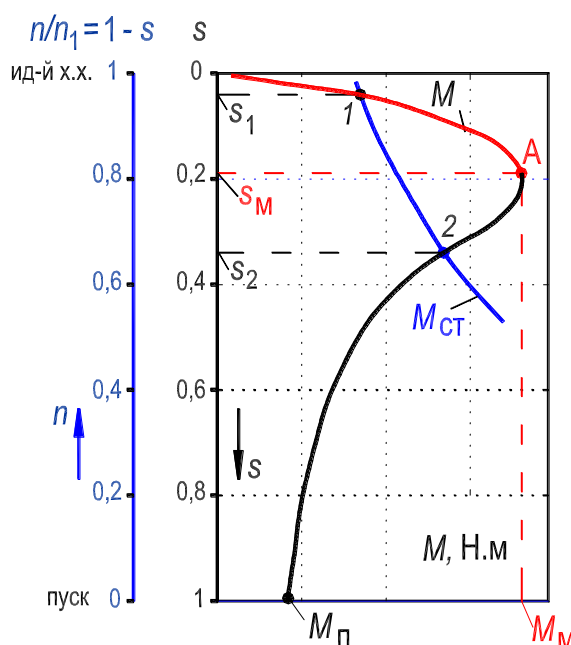


Рисунок 10.9. – Определение статической устойчивости работы агрегата «АД–ПМ»

Установившийся режим работы агрегата имеет место при постоянстве скорости $n = \text{const}$, когда $M_{дин} = 0$, а уравнение равновесия моментов принимает вид

$$M = M_{ст}. \quad (10.61)$$

В точках пересечения 1 и 2 кривых моментов M и $M_{ст}$ имеет место установившийся режим, то есть выполняется равенство (10.61). В устано-

вившемся режиме работы в условиях эксплуатации возможны возмущения режима, вызываемые изменением $M_{ст}$ или M . Возмущения предполагаются слабыми и быстро проходящими. В результате таких нарушений установившийся режим нарушается, и агрегат уходит из точек 1 и 2 (см. рис. 10.9). Если после прекращения возмущения агрегат самостоятельно восстанавливает равенство (10.61), то есть возвращается в исходное состояние, соответствующее точке 1 или 2, то агрегат представляет собой статически устойчивую систему.

В точке 1 агрегат работает в статически устойчивом режиме, так как при всяком увеличении/уменьшении скорости возникает избыточный момент, который уменьшает/увеличивает скорость до тех пор, пока агрегат не вернется в точку 1, то есть не восстановится равенство (10.61).

В точке 1 и на всем участке малых скольжений $0 < s < s_m$ агрегат работает в статически устойчивой режиме. Этот участок называется рабочей частью характеристики. На этой же части находятся точки, соответствующие номинальным данным двигателя: M_n, I_{1n}, n_n, s_n . На рабочей части характеристики и токи невелики и КПД имеет приемлемое значение.

Критерий статической устойчивости агрегата

$$dM/ds > dM_{ст}/ds. \quad (10.62)$$

В точке 2 агрегат статически неустойчив, так как при каждом нарушении установившегося режима также возникает избыточный момент, но он приводит к дальнейшему нарушению равенства (10.61). Установившийся режим не восстанавливается.

Критерий статической неустойчивости агрегата

$$dM/ds < dM_{ст}/ds. \quad (10.63)$$

В точке 2 и на всем участке скольжений $s > s_m$ агрегат работает в статически неустойчивом режиме. Этот участок неприемлем для работы еще и потому, что при больших скольжениях велика частота тока в роторе и поэтому велики электрические и магнитные потери в роторе, двигатель перегревается, а КПД низок.

3.8.6. Формула Клосса для относительного вращающего момента двигателя

При практических расчетах, связанных с исследованием двигателя,

иногда бывает удобно выражать вращающий момент M в долях максимального момента M_M , то есть использовать зависимость $M/M_M = f(s)$.

Если выражение (10.48) разделить на (10.51), то после ряда преобразований и упрощений получаем формулу, которая впервые была выведена М. Клоссом и носит его имя:

$$M/M_M \approx 2/(s/s_M + s_M/s). \quad (10.64)$$

Формула (10.64) позволяет определить M_M и s_M , если известны M и s для каких-либо двух режимов работы, например, для номинального (M_H, s_H) и пускового ($M_{п}, s_{п} = 1$) [то есть известны координаты двух точек на искомой кривой $M = f(s)$]. После определения значений M_M и s_M , задаваясь текущим значением скольжения в диапазоне $0 < s \leq 1$, легко построить кривую $M = f(s)$ для двигателя с постоянными параметрами. Формула Клосса очень удобна для расчетов в тех случаях, когда не требуется большая точность.

3.8.7. Сопоставление асинхронного и синхронного моментов

Асинхронный момент, действующий на ротор асинхронного двигателя обусловлен взаимодействием результирующего магнитного поля вращающегося с синхронной скоростью n_1 , созданного совместным действием МДС обмотки статора и МДС обмотки ротора, с активной составляющей тока ротора. Причем ток ротора возникает в результате индуктивной связи этого поля с обмоткой ротора, он имеет переменную частоту скольжения, $f_{2s} = f_1 \cdot s$. Асинхронный момент возникает только при несинхронной скорости вращения ротора $n < n_1$, $n = n_1(1 - s)$. Если ротор и поле имеют одинаковую скорость, $n = n_1$, то асинхронный момент не возникает, так как в обмотке ротора не протекает ток. Необходимо отметить, что при подаче напряжения на обмотку статора, ротор сразу же берет с места, то есть начинает вращаться. Это свидетельствует о том, что у асинхронного двигателя существует начальный момент, который приводит ротор во вращение.

Синхронный момент, действующий на ротор синхронного двигателя обусловлен взаимодействием магнитного поля вращающегося с синхронной скоростью n_1 , созданного МДС обмотки статора, и магнитного поля вращающегося также с синхронной скоростью n_1 , но созданного МДС обмотки возбуждения ротора [8, стр. 168, рис. 4.4, 4.5]. Обмотка статора и обмотка возбуждения ротора синхронного двигателя питаются от независимых источников (в отличие от асинхронного). Частота тока в обмотке статора $f_1 = 50$ Гц, а в обмотке возбуждения ротора протекает постоянный ток. Очевидно, что для того чтобы поля статора и ротора синхронного двигателя вращались с равной скоростью (а это является обязательным условием однонаправленного процесса преобразования мощности) ротор синхронного двигателя должен вращаться со строго с синхронной скоростью, $n = n_1$. Только в этом случае поля обмотки статора и обмотки возбуждения ротора вступают в постоянное магнитное взаимодействие (притяжение) и поле статора, вращаясь с синхронной скоростью, увлекает за собой ротор, который также будет вращаться с синхронной скоростью. Необходимо отметить, что при подаче питания на обмотки, в момент пуска, ротор остается неподвижным, то есть у синхронного двигателя средний за один оборот поля (принимая $p = 1$) начальный момент равен нулю, и с места синхронный двигатель не возьмет. Это объясняется тем, что в одну половину оборота поля на ротор действует, например, ускоряющий момент (притягивающий), а другую половину оборота поля тормозящий (отталкивающий). Для пуска синхронного двигателя принимают специальные меры [8, разд. 3.6, с. 166].

3.8.8. Паразитные моменты двигателя. Краткая характеристика

Выше рассмотрен электромагнитный процесс, обусловленный основной (то есть первой гармоникой) магнитного поля. Первая гармоника выполняет главную роль в процессе преобразования энергии. Однако наряду с первой гармоникой существуют высшие гармоники, которые обуславливают в асинхронном двигателе асинхронные и синхронные паразитные моменты, а также вибрационные моменты и шум, отрицательно влияющие на его работу.

Как правило, распределение индукции на полюсном делении в воздушном зазоре асинхронного двигателя, получается несинусоидальным. Высшие гармонические в кривой индукции обусловлены следующими основными причинами:

1. Наличием зубцов на статоре и роторе, в результате чего кривая индукции приобретает зубчатый пилообразный характер (рис. 10.10). При вращении ротора происходит относительное перемещение зубцов статора и ротора и зубчатость кривой периодически меняется.

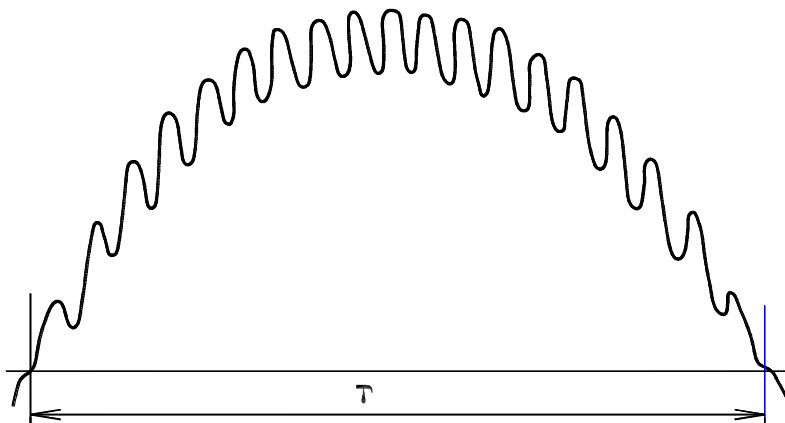


Рисунок 10.10. – Пилообразное распределение индукции в воздушном зазоре, обусловленное наличием зубцов на статоре и роторе

2. Несинусоидальное распределение МДС вдоль полюсного деления τ и периодические изменения этого распределения также порождают пульсации индукции в воздушном зазоре (см. разд. 8, рис. 8.19). Кроме первой гармоники в кривой МДС содержатся гармоники порядка $\mu = 6 \cdot k + 1$, $k = 1, 2, 3, \dots$. Эти гармоники МДС вращаются со скоростями $n_\mu = n_1/\mu$ в том же направлении, что и первая гармоника и называются прямыми. Также в кривой МДС содержатся гармоники порядка $\mu = 6 \cdot k - 1$, $k = 1, 2, 3, \dots$. Эти гармоники МДС вращаются со скоростями $n_\mu = -n_1/\mu$ в обратном направлении по отношению к первой гармонике и называются обратными. И прямые и обратные гармоники МДС имеют число пар полюсов в μ раз большее, чем первая гармоника, $p_\mu = \mu \cdot p_1$. Поэтому эти гармоники индуцируют в создавшей их обмотке, например, в обмотке статора, ЭДС одной и той частоты f_1 , так как $n_\mu \cdot p_\mu = n_1 \cdot p_1 = f_1$. На момент двигателя наибольшее отрицательное влияние оказывает 5-я, обратная, и 7-я, прямая, гармоники МДС (рис. 10.12).

3. Вследствие неодинакового насыщения зубцового слоя и ярм статора и ротора первая гармоника МДС создает сдеформированную (несинусоидальную) кривую распределения магнитного поля вдоль полюсного деления. Если превалирует влияние насыщения зубцового слоя, кривая индук-

ции притупляется (рис. 10.11,*a*); если преобладает насыщение ярма статора или ротора, кривая индукции заостряется (рис. 10.11,*б*). Особенность v -х гармоник, обусловленных насыщением, состоит в том, что их скорость равна скорости первой гармоники, то есть $n_v = n_1$. Вместе с тем число пар полюсов v -й гармоники в v раз больше, чем у первой, то есть $p_v = v \cdot p_1$. Эта особенность гармоник насыщения позволяет изготовить удвоители и утроители частоты, так как $n_v \cdot p_v = v \cdot n_1 p_1 = v \cdot f_1$, обладающие приемлемыми показателями [12].

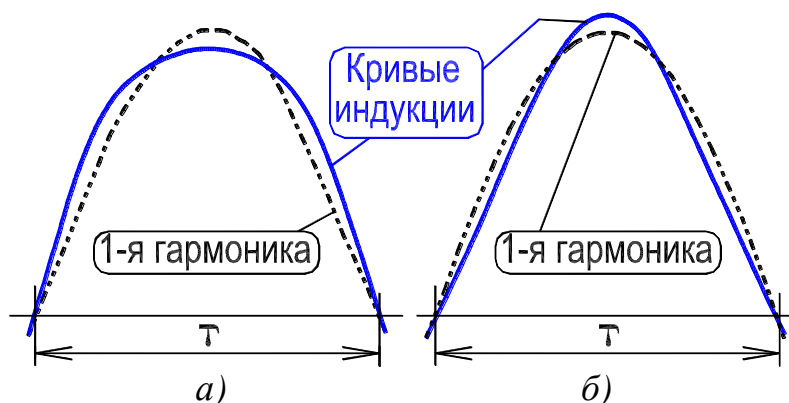


Рисунок 10.11. – Деформация распределения индукции в воздушном зазоре, обусловленная насыщением зубцового слоя – (а) и насыщением ярм статора и ротора – (б)

При изложении основных положений теории будем и в дальнейшем предполагать, что индукция вдоль полюсного деления асинхронного двигателя распределяется синусоидально и что потокосцепление с обмотками изменяется во времени также по синусоидальному закону. Такое допущение позволяет выявить с достаточной точностью основные связи, характеризующие работу асинхронной машины. Но в разд. 3.8.8 кратко рассмотрим влияние высших гармоник на работу двигателя.

3.8.8.1. Паразитные асинхронные моменты

Можно показать, что в кривой МДС трехфазной обмотки кроме первой гармоники, содержатся наиболее ярко выраженные 5 и 7-я гармоники. Пятая гармоника вращается со своей синхронной скоростью $n_5 = -n_1/5$ навстречу 1-й гармонике МДС (она называется обратной). Седьмая гармоника вращается со своей синхронной скоростью $n_7 = n_1/7$ в том же направлении, что и 1-я гармоника МДС (она называется прямой). Если скорость ротора в процессе его вращения становится равной одной из указанных синхронных скоростей высших гармоник, то момент от этой гармоники будет равен нулю: $M_5 = 0$

при $s = 6/5 = 1,2$ или $M_7 = 0$ при $s = 6/7 \approx 0,857$. При скольжении ротора $s > 0,857$ паразитный асинхронный момент M_7 будет двигательным, то есть действовать в направлении вращения ротора. При $s < 0,857$ паразитный асинхронный момент M_7 будет генераторным (о генераторном асинхронном моменте см. описание Л. Р. №4), то есть действовать навстречу вращения ротора. Подобная ситуация, обусловленная 5-й гармоникой, возникает при вращении ротора в зоне скольжения 1,2.

Наложение на кривую момента 1-й гармоники кривых моментов 5 и 7-й гармоник ($M = M_1 + M_5 + M_7$) может сильно исказить кривую результирующего момента M , создать в ней *провалы* левее кривой момента $M_{ст}$ производственного механизма (см. рис. 10.12), в результате чего ротор при пуске в ход не сможет достигнуть номинальной скорости вращения (и s_H) и будет вращаться со значительным скольжением ($s \approx 0,857$, точка **a**) в зоне больших токов ротора и статора.

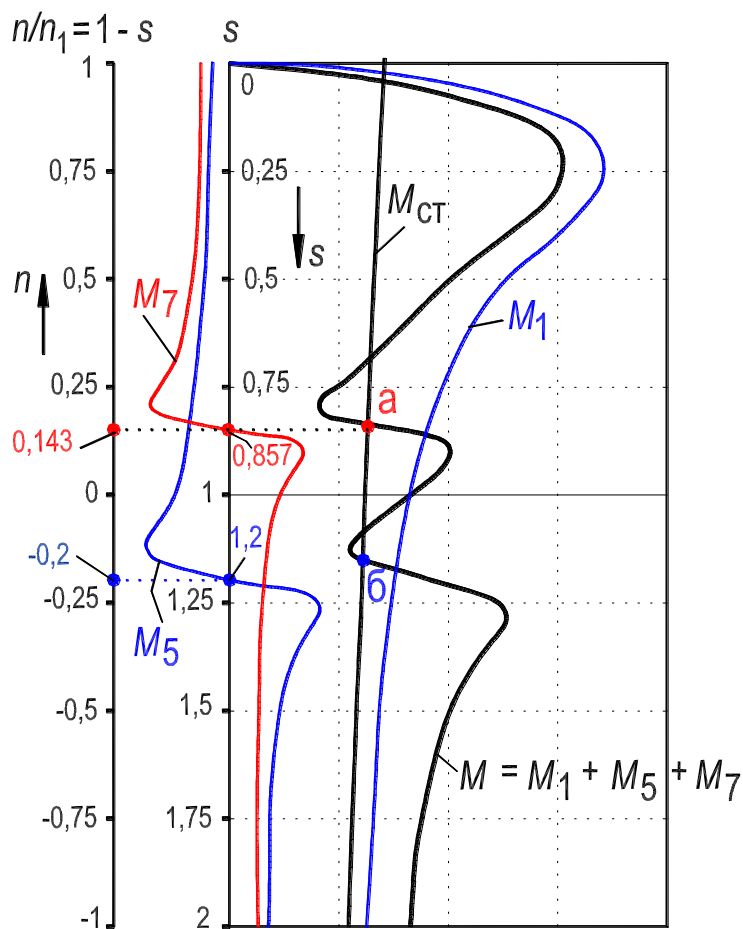


Рисунок 10.12. – Искажение кривой момента M двигателя моментами от 5 и 7-й гармоник поля

При фазной обмотке ротора искажение кривой момента двигателя незначительно. Реальную опасность моменты высших гармоник вызывают в случае короткозамкнутой обмотки ротора (типа «беличья клетка»).

Асинхронные вращающиеся моменты, обусловленные высшими гармониками магнитного поля, могут быть снижены за счет рационального размещения в пазовом слое обмоток статора и ротора, обеспечивающего синусоидальность кривых МДС и максимальное снижение зубцовых гармоник. Значительное влияние на уменьшение 5 и 7-й гармоник момента обеспечивает выполнение обмотки с укороченным шагом $y = (4/5 \div 6/7)\tau$, а также увеличение числа пазов q на полюс и фазу. Целесообразно принимать $Z_2 < Z_1$ (см. разд. 8.3 и 8.5).

Рассмотренные выше моменты высших гармоник называются асинхронными, так как они по своей природе совершенно одинаковы с основным электромагнитным моментом асинхронного двигателя.

3.8.8.2. Паразитные синхронные моменты

Не все высшие гармонические магнитного поля, созданные статором и ротором, сцепляются с обеими обмотками и образуют асинхронные вращающиеся моменты. Это особенно характерно для зубцовых высших гармонических магнитных полей. *При определенных скоростях вращения ротора* отдельные гармонические зубцового поля статора могут двигаться синхронно с соответствующими гармоническими зубцового поля ротора. Под действием магнитных сил в этом случае возникает механическое взаимодействие между статором и ротором и *образуется вращающийся момент, который может быть назван синхронным*. При опережении зубцовым полем статора поля ротора возникает двигательный момент, при отставании и той же скорости вращения ротора – тормозной.

Если поэтому на кривую асинхронного момента в функции скольжения нанести синхронный момент, то он будет представлять собой горизонтальную линию **а-б**, пересекающую кривую асинхронного момента (рис. 10.13) при скольжении, соответствующем синхронному вращению рассматриваемых гармонических поля. Правый отрезок линии является синхронным двигательным моментом, левый – тормозным.

Если тормозной синхронный момент велик и пересекает кривую момента $M_{ст}$ (рис. 10.13), то двигатель при пуске в ход сможет достигнуть номинальной скорости вращения только в тех случаях, когда накопленная

ротором в процессе разбега кинетическая энергия и обусловленный ею вращающий момент будут достаточны для преодоления тормозного синхронного момента.

Можно показать, что синхронный момент будет особенно резко проявляться при $Z_1 = Z_2$ или при $Z_1 = Z_2 \pm 2p$. В первом случае будет иметь место *прилипание* ротора к статору, т. е. стремление ротора расположиться по отношению к статору по линии наименьшего магнитного сопротивления, когда оси зубцов статора и ротора совпадают. Это препятствует вращению ротора при пуске в ход двигателя.

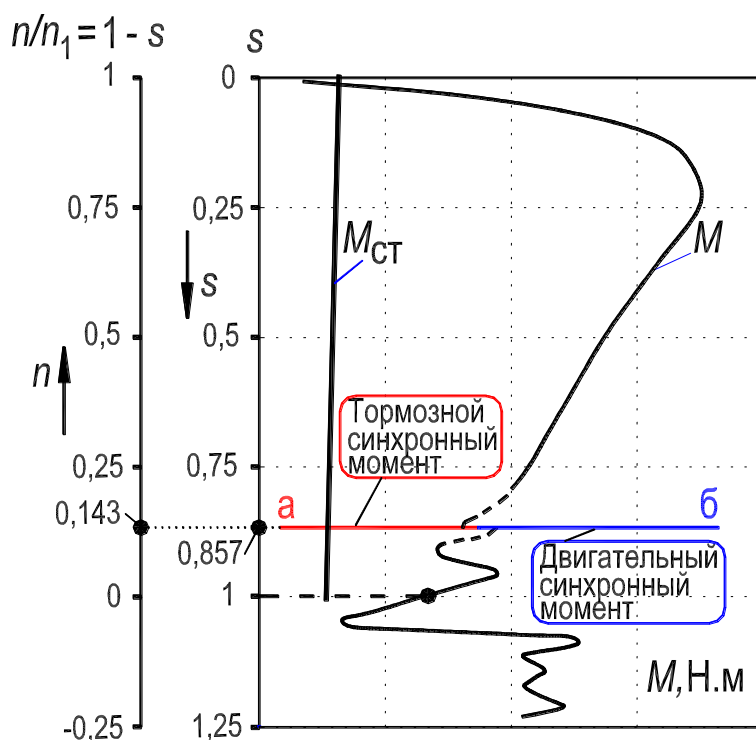


Рисунок 10.13. – Наложение синхронного вращающегося момента на асинхронный

Вблизи скоростей вращения, при которых проявляется действие *значительного* синхронного момента, обычно возникает неустойчивый режим асинхронного вращения, при котором ротор подтягивается к синхронной скорости вращения соответствующих гармонических полей статора и ротора. На рис. 10.13 это явление имеет место при скольжении $s = 0,857$. Поэтому кривая момента вблизи $s = 0,857$ показана пунктиром.

Синхронные моменты могут быть почти полностью устранены путем скоса пазов и правильного выбора соотношения чисел зубцов на статоре и роторе (см. разд. 8.5.1). Поэтому скос пазов иногда применяется в короткозамкнутых двигателях мощностью до 20 кВт и более.

3.8.8.3. Вибрационные силы и вращающие моменты

Зубцовые и другие магнитные поля статора и ротора, образующие синхронные вращающие моменты, проявляются не только при взаимно синхронном их вращении, но и при любых других скоростях вращения. В этом случае они образуют периодически меняющиеся вращающие моменты, которые в течение одного полупериода направлены в сторону вращения ротора, а в течение последующего полупериода – в обратном направлении. Такие периодически меняющиеся моменты могут создавать вибрации ротора и отдельных частей машины, которые становятся особенно заметными при наличии резонансных явлений. При неблагоприятном соотношении чисел зубцов статора и ротора могут возникать не только тангенциальные, но также и радиальные магнитные силы тяжения, действующие на статор и ротор и перемещающиеся вдоль окружности воздушного зазора при вращении ротора. Эти силы также могут вызывать вибрацию машины.

Анализ этих процессов показывает, что вибрационные силы и вращающие моменты проявляются особенно сильно, если

$$Z_1 - Z_2 = \pm 1 \pm 2p$$

или

$$Z_1 - Z_2 = \pm 2 \pm 2p.$$

3.8.8.4. Шумы при работе асинхронной машины

В ряде случаев работа асинхронной машины сопровождается значительным шумом. Этот шум возникает вследствие механических и магнитных колебаний. Он распространяется как непосредственно через воздух, так и через пол (фундамент). Механические причины шума зависят главным образом от балансировки ротора, состояния подшипников и колебаний вентилирующего воздуха в каналах и щелях. В машинах малой мощности шум, вызванный этими причинами, бывает невелик.

Более неприятным является шум, вызванный магнитными явлениями, связанными с наличием высших гармонических магнитного поля. Стальные листы и отдельные ферромагнитные части машины, попадая в переменное магнитное поле звуковой частоты, начинают колебаться. Колебания вызывают шум, который часто усиливается из-за явления резонанса. Этот шум распространяется главным образом через пол и фундамент. При неблагоприятном соотношении чисел пазов статора и ротора зубцовые

поля вызывают радиальное смещение ротора, направление которого изменяется при вращении ротора. В результате возникновения неуравновешенных радиальных сил ротор и статор испытывают вибрацию, которая является одной из основных причин шумов.

Шумы могут быть ослаблены путем эластичной установки машины, однако наиболее радикальным способом устранения шумов является ослабление высших гармонических магнитного поля, порождающих эти шумы. Раздражающие слух частоты магнитных шумов лежат в пределах от 100 до 4000 Гц. Уровень интенсивности шума измеряется в условных единицах, называемых децибелами. Нормальная интенсивность шума асинхронных машин лежит обычно в пределах нескольких десятков децибел. Интенсивность шума измеряется специальными приборами – шумомерами.

3.8.8.5. Выбор рационального соотношения чисел зубцов статора и ротора

Как отмечалось выше, зубчатая дискретная структура пазового слоя и воздушного зазора машины порождает высшие гармонические магнитного поля, которые создают дополнительные асинхронные, синхронные и вибрационные вращающие моменты и радиальные силы. Дополнительные вращающие моменты, накладываясь на вращающий момент, созданный основной гармонической поля, при некоторых значениях скольжения ротора могут сильно снизить полезный момент, развиваемый двигателем, препятствуя работе последнего. Кроме того, высшие гармонические магнитного поля могут явиться причиной повышенного уровня шумов машины и источником ее вибраций.

Для устранения всех этих явлений при проектировании асинхронных машин приходится накладывать ряд ограничений на выбор числа пазов статора и ротора, на радиальный размер воздушного зазора, а также на раскрытие и скос пазов.

Связанные с этим вопросы явились предметом многочисленных теоретических и экспериментальных исследований, на основе которых можно сделать следующие рекомендации [2–4].

При размещении обмоток в пазах необходимо, прежде всего, обеспечивать максимальную синусоидальность кривой МДС. По этой причине следует избегать применения в асинхронных двигателях обмоток с малым и дробным числом q пазов на полюс и фазу.

Для устранения значительных асинхронных моментов, обусловленных зубцовыми магнитными полями, необходимо соблюдать условие, чтобы

$$Z_2 \leq 1,25(Z_1 \pm p).$$

Эффективной мерой для снижения влияния зубцовых магнитных полей является скос пазов ротора (или статора) на одно зубцовое деление $t_{z1} = \pi D_a / Z_1$ (см. рис. 8.26,а). В этом случае зубцовые гармонические, имеющие пространственный период, близкий к t_{z1} будут в значительной мере ослаблены. Если преобладающее влияние имеют зубцовые гармонические с другим пространственным периодом, то скос пазов должен быть соответственно изменен.

При отсутствии скоса пазов на роторе или статоре рекомендуется соблюдение определенных условий, которые учитываются в заводских таблицах рекомендуемых сочетаний чисел пазов ротора и статора при наличии и отсутствии скоса пазов с учетом применяемой формы паза и радиальных размеров воздушного зазора.

Основным критерием при проектировании пазовой зоны машины является эксперимент, позволяющий наиболее надежно выявить наличие значительных асинхронных и синхронных вращающихся моментов, а также установить уровень шумов и размеры тангенциальных и радиальных вибраций.

3.9. Способы пуска трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

При пуске в ход асинхронных двигателей учитываются следующие положения: 1) двигатель должен развивать достаточно большой пусковой момент $M_{п}$, больший статического момента сопротивления на валу $M_{ст}$; 2) пусковой ток $I_{п}$ в обмотке статора должен быть ограничен таким значением, чтобы не происходило повреждения двигателя и нарушения нормального режима работы сети (то есть не было в ней большого падения напряжения); 3) схема пуска должна быть по возможности простой.

3.9.1. Способы пуска трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором классического исполнения

Короткозамкнутый ротор классического исполнения имеет пазы круглого сечения или неглубокие пазы овального сечения (см. рис. 8.11,в,г на с. 43)

На практике используют два способа пуска трехфазного двигателя

с короткозамкнутым ротором (обмотка типа «беличья клетка») общепромышленного применения:

1. Прямой пуск, когда обмотка статора сразу же включается на номинальное напряжение двигателя;

2. Пуск при пониженном напряжении, подаваемом на обмотку статора на период пуска. После завершения пуска напряжение поднимается до номинального значения.

Прямой пуск. Наиболее простым способом пуска двигателя с короткозамкнутым ротором является включение обмотки его статора непосредственно в сеть, на номинальное напряжение обмотки $U_{1н}$ (рис. 10.14). При этом пусковой ток двигателя $I_{1п} = (4\div 7)I_{1н}$.

Современные асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором проектируются с таким расчетом, чтобы они по значению возникающих при пуске электродинамических усилий, действующих на обмотки, и по условиям нагрева обмоток допускали прямой пуск. Поэтому прямой пуск всегда возможен, когда сеть достаточно мощная и пусковые токи двигателей не вызывают недопустимо больших падений напряжения в сети (не более 10–15 %). Современные энергетические системы, сети и сетевые трансформаторные подстанции обычно имеют такие мощности, что в подавляющем большинстве случаев возможен прямой пуск асинхронных двигателей.

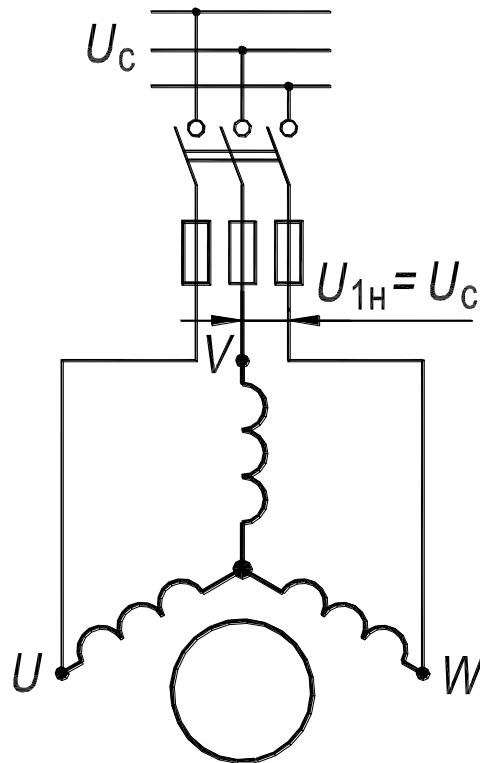


Рисунок 10.14. – Схема прямого пуска двигателя с короткозамкнутым ротором

Нормальным способом пуска двигателей с короткозамкнутым ротором, поэтому является прямой пуск. *Нередко осуществляется прямой пуск двигателей мощностью в тысячи киловатт.*

Пуск при пониженном напряжении. Если пусковой ток вызывает падение напряжения в сети больше, чем 10–15 %, что отрицательно сказывается на других электропотребителях, то применяются различные способы пуска двигателя при пониженном напряжении (рис. 10.15,а,б). Однако при этом пропорционально квадрату напряжения на зажимах обмотки статора или квадрату пускового тока двигателя понижается также пусковой момент, что является недостатком пуска при пониженном напряжении [см. формулы (10.47), (10.48) и (10.54)].

Поэтому способы пуска *при пониженном напряжении* применимы, когда возможен пуск двигателя на холостом ходу или под неполной нагрузкой. *Необходимость пуска при пониженном напряжении $U_1 < U_{1H}$ встречается чаще всего у мощных высоковольтных двигателей.*

Понижение напряжения, подаваемого на обмотку статора на период пуска, осуществляется тремя способами: 1) с помощью реактора (рис. 10.15,а); 2) с помощью автотрансформатора (рис. 10.15,б); 3) пере-

ключением схемы соединения фаз обмотки статора на период пуска с «треугольника» на «звезду» (рис. 10.16).

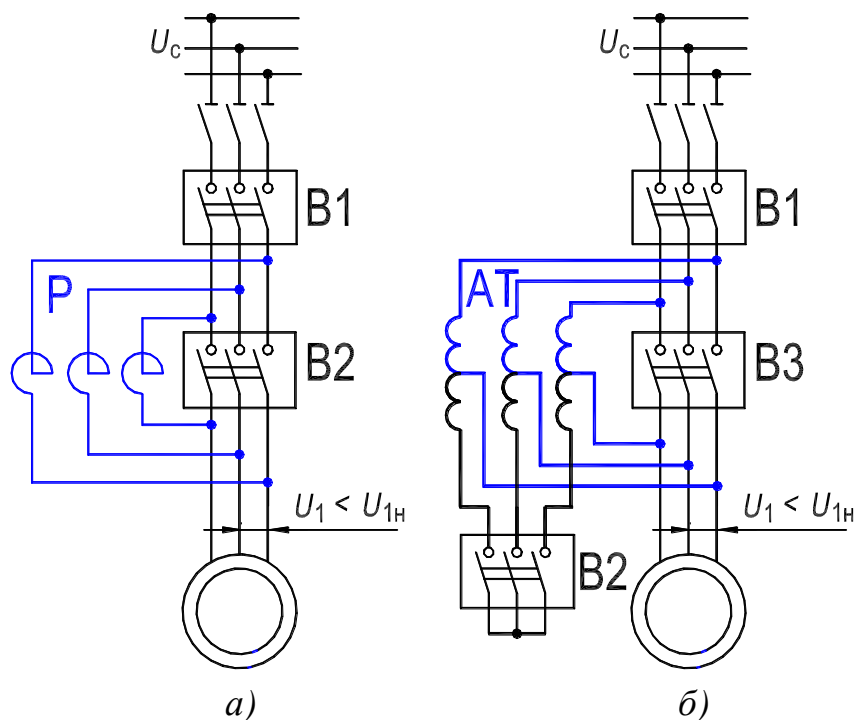


Рисунок 10.15. – Схемы пуска в ход двигателей с короткозамкнутым ротором при пониженном напряжении: реакторный – (а); автотрансформаторный – (б)

Реакторный пуск осуществляется согласно схеме рис. 10.15,а в следующей последовательности. 1) Включается выключатель В1, и двигатель получает питание через трехфазный реактор Р, сопротивление которого X_p ограничивает значение пускового тока; 2) По достижении нормальной скорости вращения включается выключатель В2, который шунтирует реактор, в результате чего на двигатель подается номинальное напряжение $U_{1н}$.

Автотрансформаторный пуск осуществляется по схеме рис. 10.15,б в следующем порядке. 1) Включаются выключатели В1 и В2, и на двигатель через автотрансформатор АТ подается пониженное напряжение; 2) После достижения двигателем определенной скорости выключатель В2 отключается, и двигатель получает питание через часть обмотки автотрансформатора АТ, который в этом случае работает как реактор; 3) Включается выключатель В3, в результате чего двигатель получает номинальное напряжение $U_{1н}$.

Пуск переключением «звезда – треугольник» (рис. 10.16) может применяться в случаях, когда выведены все шесть концов обмотки статора и двигатель нормально работает с соединением обмотки статора в «треугольник», например, когда двигатель на 380/220 В и с соединением обмоток Y/Δ работает от сети 220 В. В этом случае при пуске обмотка статора включается в «звезду» (нижнее положение переключателя П на рис. 10.16), а при достижении нормальной скорости вращения переключается в «треугольник» (верхнее положение переключателя П на рис. 10.16). При таком способе пуска по сравнению с прямым пуском (при соединении обмотки в «треугольник») напряжение фаз обмоток уменьшается в $\sqrt{3}$ раза, пусковой момент уменьшается приблизительно в 3 раза, пусковой ток в фазах обмотки уменьшается в $\sim\sqrt{3}$ раза, а в сети – в ~ 3 раза.

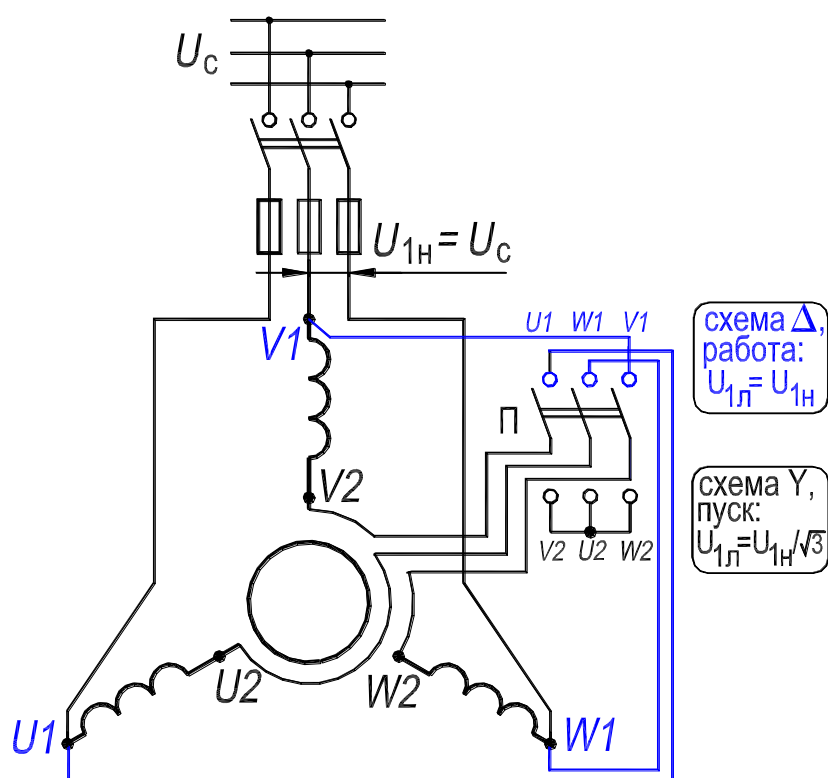


Рисунок 10.16. – Схема пуска двигателя с короткозамкнутым ротором с переключением со «звезды» на «треугольник»

Недостатком этого способа пуска по сравнению с реакторным и автотрансформаторным является то, что при переключениях цепь обмотки статора двигателя разрывается переключателем Π , что связано с возникновением коммутационных перенапряжений. Этот способ ранее широко при-

менялся при пуске низковольтных двигателей, однако с увеличением мощности сетей потерял свое прежнее значение и в настоящее время используется сравнительно редко.

Пуск трехфазных асинхронных двигателей с фазным ротором рассмотрен в Л. Р. №2, разд. 3.1.

3.9.2. Пуск трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором специального исполнения

Под короткозамкнутым ротором специального исполнения имеются в виду ротор с глубокими пазами (см. рис. 8.11,а,б, с. 43) и ротор с двойной беличьей клеткой (рис. 8.11д,е).

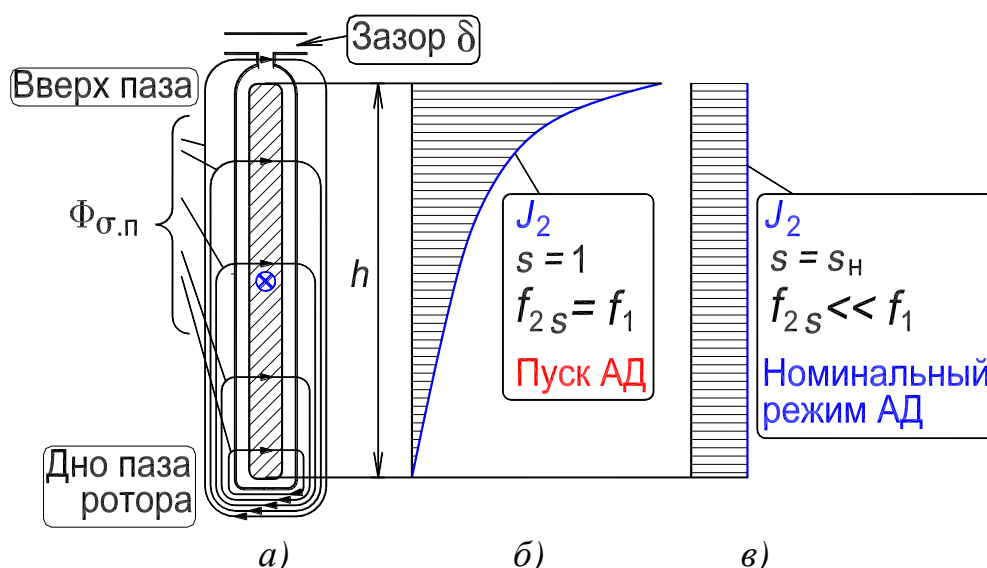


Рисунок 10.17. – Форма паза ротора глубокопазного двигателя – (а);
распределение плотности тока в стержне при пуске – (б);
распределение плотности тока при номинальном режиме – (в)

Пуск двигателя с глубокими пазами на роторе. Одной из разновидностей таких двигателей являются двигатели с глубокими пазами на роторе (рис. 10.17,а) и высокими ($h = 30 \div 60$ мм) стержнями беличьей клетки. Вытеснение тока в стержнях клетки происходит в результате действия ЭДС, индуцируемых пазовыми потоками рассеяния $\Phi_{\sigma.п}$. Можно представить, что стержень (рис. 10.17,а) состоит из множества волокон, включенных параллельно. Волокна, расположенные ближе к дну паза (нижняя часть паза), охватываются большим, а волокна, расположенные ближе к открытию паза (верхняя часть паза) – меньшим числом линий потока $\Phi_{\sigma.п}$. При пуске, когда частота тока в роторе велика ($f_{2s} \approx f_1$), в нижних волокнах стержня

индуцируется ЭДС самоиндукции бóльшая, чем в верхних, и плотность тока J_2 распределяется по высоте проводника весьма неравномерно (рис. 10.17,б). Это объясняется тем, что нижние волокна охватываются бóльшим количеством силовых линий магнитного поля пазового рассеяния, поэтому их индуктивное сопротивление будет больше, чем у верхних волокон, охваченных меньшим количеством линий поля пазового рассеяния. Таким образом, ток в стержне вытесняется по направлению к воздушному зазору δ , что, в сущности, и есть проявление поверхностного эффекта в проводниках, утопленных в ферромагнитную среду.

Под влиянием вытеснения тока, или поверхностного эффекта, активное сопротивление стержня при пуске двигателя становится большим примерно в 3–4 раза.

Упрощенно можно представить себе, что при пуске работает только верхняя часть стержня и, следовательно, его рабочее сечение уменьшается. Одновременно при вытеснении тока уменьшается также индуктивное сопротивление рассеяния стержня примерно на 30–40 %, так как поток $\Phi_{\sigma,л}$ в нижней части стержня вследствие уменьшения в ней тока ослабляется. В результате увеличения при пуске активного сопротивления стержня $R_{ст}$ и уменьшения его индуктивного сопротивления рассеяния $X_{ст}$ уменьшается угол сдвига фаз ψ_2 между ЭДС стержня, индуцируемой вращающимся полем, и током стержня (см. рис. 10.3,а), что и приводит к увеличению пускового момента.

По мере разбега двигателя при его пуске частота тока в роторе уменьшается и по достижении номинальной скорости вращения становится весьма малой ($f_{2s} = sf_1 \leq 1 \div 3$ Гц). При этом ЭДС, индуцируемые потоком $\Phi_{\sigma,л}$, становятся малыми, явление вытеснения тока практически исчезает и ток распределяется равномерно по сечению стержня (рис. 10.17,в). Активное сопротивление стержня при этом становится малым, и двигатель работает с хорошим КПД. Пуск двигателя с глубоким пазом на роторе завершен.

Двигатели с глубокими или углубленными пазами почти полностью вытеснили двигатели с беличьей клеткой круглого сечения и являются нормальным исполнением короткозамкнутых асинхронных двигателей.

Вместе с тем в двигателе с глубоким пазом за счет повышенного рассеяния роторной обмотки несколько снижены $\cos \varphi_1$ и перегрузочная способность $k_M = M_M/M_H$.

Пуск двигателя с двойной беличьей клеткой на роторе. Двухклеточные двигатели имеют на роторе две короткозамкнутые беличьи клетки, одна из которых представляет собой пусковую обмотку, а вторая – рабочую. Рабочая обмотка выполняется из медных стержней и размещается в нижних частях пазов, а пусковая обмотка изготавливается из латунных или бронзовых стержней и располагается в верхних частях пазов, ближе к воздушному зазору (рис. 10.18). Сечение стержней пусковой обмотки может быть несколько меньше, чем у рабочей обмотки. Однако сечение и теплоемкость стержней пусковой обмотки должны быть достаточно велики, чтобы предотвратить чрезмерный нагрев этой обмотки при пуске. Иногда рабочую и пусковую обмотки размещают в отдельных пазах. В связи со сказанным активное сопротивление пусковой обмотки $R_{п}$ обычно в 2–4 раза больше активного сопротивления $R_{р}$ рабочей обмотки. Наоборот, индуктивное сопротивление рассеяния пусковой обмотки $X_{\sigma,п}$ в несколько раз меньше, чем $x_{\sigma,р}$ рабочей обмотки, поскольку последняя утоплена глубоко в стали сердечника ротора. Вращающееся магнитное поле двигателя индуцирует в обеих обмотках ротора одинаковые ЭДС.

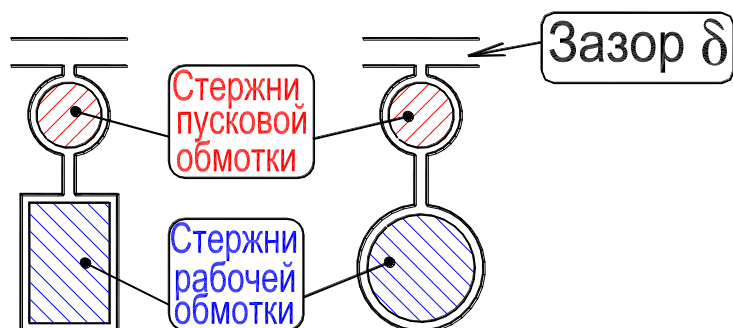


Рисунок 10.18. – Пазы ротора двухклеточного двигателя

При пуске вследствие большой частоты тока ротора индуктивное сопротивление рабочей обмотки относительно велико и значительно больше полного сопротивления пусковой обмотки. Поэтому при пуске нагружена током в основном только пусковая обмотка, и ввиду большого ее активного сопротивления двигатель развивает большой пусковой момент. При разбеге двигателя частота тока ротора уменьшается, и при нормальной скорости вращения ($s = 0,02 \div 0,05$) индуктивные сопротивления рассеяния обмоток ротора будут в 20–50 раз меньше, чем при пуске. Поэтому в рабочем режиме активные сопротивления обмоток ротора значительно больше

индуктивных и полные сопротивления обмотки определяются значениями активных сопротивлений. Вследствие этого при работе двигателя полное сопротивление рабочей обмотки значительно меньше, чем полное сопротивление пусковой, и током нагружена главным образом рабочая обмотка. Ввиду малости активного сопротивления этой обмотки двигатель имеет хороший КПД.

Таким образом, в двухклеточном двигателе при пуске происходит вытеснение тока ротора по направлению к воздушному зазору δ , как и в глубокопазном двигателе.

3.9.3. Самозапуск асинхронных двигателей

При коротких замыканиях в сети напряжение на зажимах, присоединенных к этой сети асинхронных двигателей, падает, причем уровень снижения напряжения в отдельных точках сети может быть различным.

Вращающий момент асинхронного двигателя при заданном скольжении пропорционален квадрату напряжения; поэтому при снижении напряжения в результате короткого замыкания в сети момент резко падает и если он становится меньше момента сопротивления на валу, то двигатель останавливается. Остановка будет продолжаться до тех пор, пока короткое замыкание не будет отключено и напряжение сети не начнет восстанавливаться. Если двигатель имеет короткозамкнутый ротор, то продолжительность его повторного пуска будет зависеть от скорости восстановления напряжения сети. При этом следует учитывать, что после отключения короткого замыкания одновременно начнут вращаться все остановившиеся двигатели и сеть будет перегружена пусковыми токами, что может сильно замедлить процесс восстановления напряжения.

Если остановившийся двигатель имел фазной ротор с реостатным пуском, то при повторном запуске без реостата он не сможет развернуться, и поэтому такие двигатели должны быть автоматически отключены при снижении напряжения сети в результате короткого замыкания. Автоматическое отключение всех двигателей при значительных снижениях напряжения при коротких замыканиях в сети может обеспечить наиболее быстрое восстановление напряжения после отключения короткого замыкания. Однако это нарушает непрерывность работы электропривода, питаемого от сети. Поэтому применяется самозапуск двигателей при кратковременных аварийных снижениях напряжений сети. В этом случае при снижении

напряжения сети ниже установленного предела автоматически отключаются только некоторые двигатели, работающие в менее ответственных установках, а также те двигатели, самозапуск которых невозможен или неэкономичен. При этих условиях восстановление напряжения и самозапуск остальных двигателей облегчаются, что, в конечном счете, снижает время аварийных простоев оборудования в промышленных установках.

3.10. Способы регулирования скорости трехфазных асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором

Скорость вращения ротора асинхронного двигателя равна

$$n = n_1 \cdot (1 - s) = f_1 \cdot (1 - s) / p. \quad (10.65)$$

Из этого равенства видно, что скорость вращения n двигателя при заданном вращающем моменте можно регулировать следующим образом: 1) изменяя частоту f_1 подводимого напряжения, скорость регулируется плавно; 2) переключая число пар полюсов p обмотки статора, скорость регулируется дискретно; 3) изменяя скольжение s за счет изменения первичного напряжения U_1 . И в 1 и во 2-м случаях регулируется синхронная скорость поля $n_1 = f_1 / p$. Ниже эти способы регулирования будут рассмотрены более подробно.

При регулировании скорости вращения асинхронного двигателя необходимо учитывать, что с изменением скорости вращения меняются условия охлаждения статора и ротора. Это проявляется особенно сильно в самовентилируемых двигателях, длительная мощность которых заметно снижается при уменьшении скорости вращения.

3.10.1. Регулирование скорости вращения двигателя изменением частоты первичной сети

Изменение частоты f_1 возможно при питании двигателя от специального синхронного генератора с переменной скоростью вращения или от статического полупроводникового преобразователя частоты.

При регулировании необходимо стремиться к тому, чтобы с изменением частоты не ухудшались рабочие характеристики двигателя. Этого можно достигнуть путем регулирования напряжения U_1 одновременно с изменением частоты f_1 , с тем чтобы насыщение магнитной системы заметно не изменялось.

Если пренебречь относительно небольшим падением напряжения в первичной цепи асинхронного двигателя, то

$$U_{1н} \approx E_1 = 4,44 \cdot f_1 w_1 \Phi_m k_{o1} = \text{const.} \quad (10.66)$$

Существенное изменение потока Φ при регулировании n за счет изменения частоты f_1 нежелательно, так как увеличение Φ против нормального вызывает увеличение насыщения магнитной цепи и сильное увеличение намагничивающего тока, а уменьшение Φ вызывает недоиспользование двигателя, уменьшение перегрузочной способности и увеличение тока I_2 при том же значении M [см. формулу (10.1)]. Поэтому в большинстве случаев целесообразно поддерживать $\Phi = \text{const.}$ При этом из соотношения (10.66) следует, что одновременно с регулированием частоты пропорционально ей необходимо изменять также напряжение, т. е. поддерживать.

$$U_1/f_1 \equiv \Phi. \quad (10.67)$$

К недостаткам частотного плавного регулирования скорости относятся громоздкость и высокая стоимость питающей установки.

3.10.2. Регулирование скорости вращения двигателя изменением числа пар полюсов

Этот способ регулирования скорости вращения асинхронных двигателей в отличие от предыдущего позволяет осуществлять изменение скорости вращения не плавно, а дискретно, только ступенями.

Синхронные скорости вращения n_1 основной гармоники поля в зависимости от числа пар полюсов p при $f_1 = 50$ Гц для выпускаемых двигателей приведены в табл. В.1 (с. 8).

Изменять p можно двумя способами: 1) применением на статоре двух обмоток, которые уложены в общих пазах и имеют разные числа пар полюсов p . Это позволяет увеличить пределы и число ступеней регулирования, но понижает использование машины, поскольку на каждой ступени регулирования к сети подключена только одна из двух обмоток, размещенных в пазах статора; 2) применением обмотки специального типа, которая позволяет получить различные значения p путем изменения (переключения) схемы соединений обмотки.

Посредством переключения обмотки статора можно осуществить переход от одной синхронной скорости вращения, указанной в табл. В.1, к другой. Обмотку ротора удобнее выполнять в этом случае в виде беличьей клетки, поскольку беличья клетка не требует каких-либо переключений (в отличие от фазной обмотки ротора).

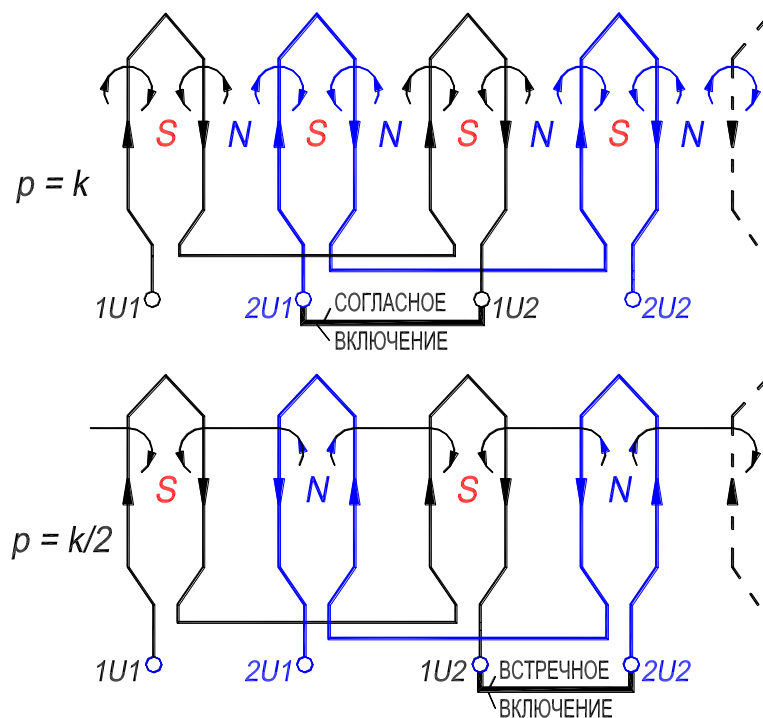


Рисунок 10.19. – Принципиальная схема переключения обмотки для изменения числа полюсов в 2 раза: k – любое целое четное число

На рис. 10.19. приведена принципиальная схема переключения обмотки для изменения числа пар полюсов в 2 раза. Обмотка каждой фазы делится на две части (например, фаза U – на $1U$ и $2U$), которые соединяются или *согласно*, тогда число пар полюсов p равно k ($p = k$), или *навстречу* друг другу ($p = k/2$), где k – любое целое число.

Обычно регулируемые асинхронные двигатели выполняются с двумя, тремя или четырьмя ступенями синхронных скоростей вращения. Большое количество ступеней приводит к слишком сложным схемам обмотки и сложным переключающим контактным аппаратам.

Масса и стоимость многоскоростных двигателей несколько больше, чем у нормальных асинхронных двигателей такой же мощности.

3.10.3. Регулирование скорости вращения двигателя уменьшением первичного напряжения

При уменьшении первичного напряжения U_1 момент двигателя изменяется пропорционально U_1^2 [выражение (10.48)] и соответственно изменяются механические характеристики двигателя $M = f(s)$ (см. рис. 10.20), в результате чего увеличиваются значения рабочих скольжений s_1, s_2, s_3, \dots , при данном виде зависимости момента производственного механизма $M_{ст} = f(s)$, а скорость ротора n уменьшается. Регулирование скольжения s в этом случае возможно в узких пределах $0 < s < s_M$ (рис. 10.20,а).

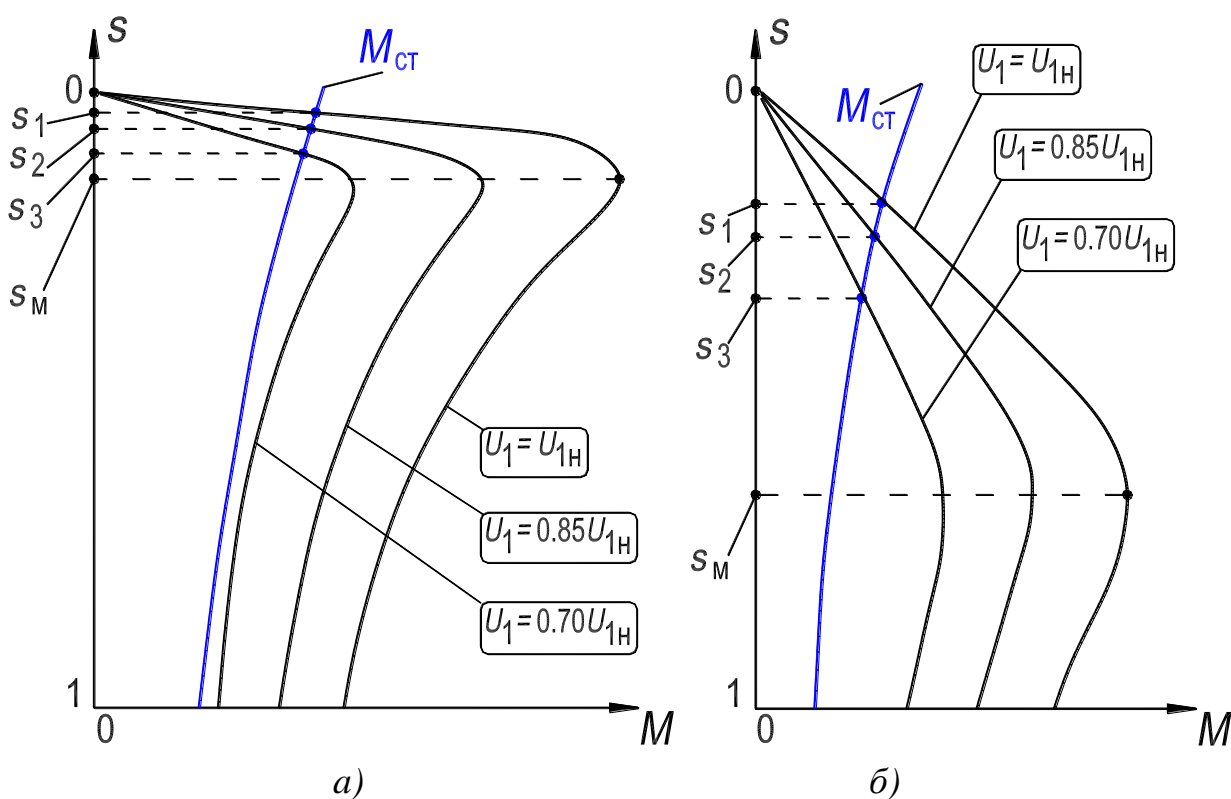


Рисунок 10.20. – Механические характеристики асинхронных двигателей при различных значениях первичного напряжения U_1

Для получения достаточно большого диапазона регулирования скорости необходимо, чтобы активное сопротивление цепи ротора и соответственно s_M были достаточно велики (рис. 10.20,б).

Следует учитывать, что с увеличением скольжения во вторичной цепи возрастают потери, вызывающие повышенный нагрев ротора.

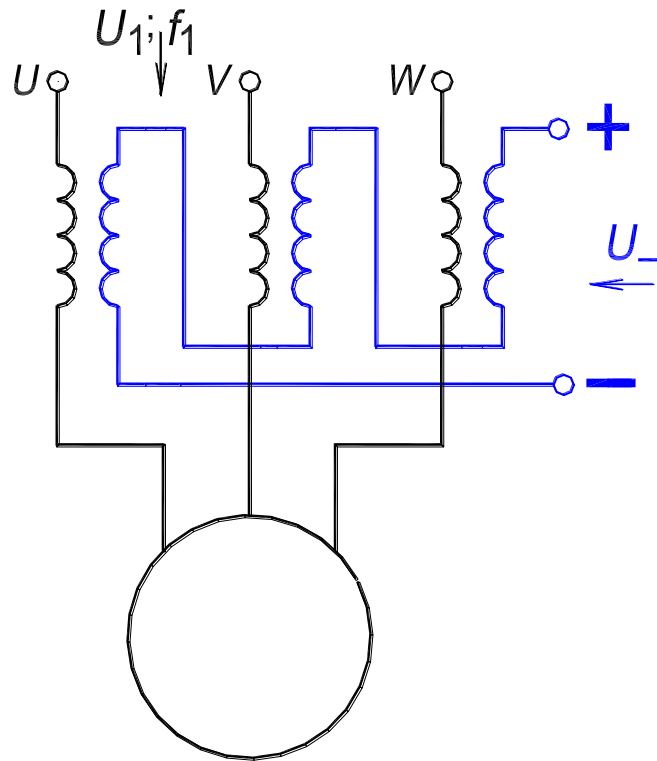


Рисунок 10.21. – Схема регулирования скорости асинхронного двигателя с помощью реактора с подмагничиванием постоянным током

В связи с пониженным КПД и трудностями регулирования напряжения рассматриваемый метод применяется только для двигателей малой мощности. При этом для регулирования U_1 можно использовать регулируемые автотрансформаторы или сопротивления, включенные последовательно в первичную цепь. Для этой цели также применяют (рис. 10.21) управляемые реакторы, регулируемые путем подмагничивания постоянным током [12]. При изменении значения постоянного тока подмагничивания индуктивное сопротивление реактора изменяется, что приводит к изменению напряжения на зажимах двигателя.

3.11. Электрическое торможение асинхронных двигателей

В ряде случаев требуется быстрая и плавная остановка двигателя. Если с этой целью двигатель просто отключить от сети, то при наличии значительного момента инерции вращающихся масс выбег, т. е. процесс остановки ротора двигателя, может продолжаться достаточно долго. Торможение двигателя требуется также в подъемных и транспортных установках для ограничения скорости спуска грузов или их движения.

Для торможения асинхронных двигателей чисто электрическим путем используют обычно три метода:

1. *Торможение противовключением*, при котором переключают две фазы статора (рис. 10.22), вследствие чего ротор двигателя начинает вращаться против направления движения поля. Двигатель при этом работает в режиме электромагнитного тормоза (см. Введение, с. 9 и рис.13.2 в Л. Р. №4).

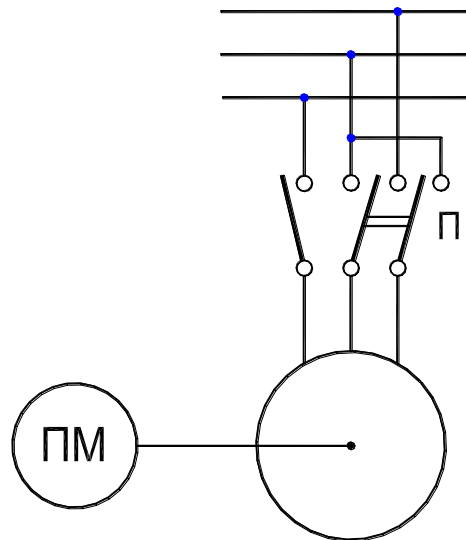


Рисунок 10.22. – Схема переключения для изменения направления вращения магнитного поля асинхронного двигателя

2. *Рекуперативное торможение*, при котором двигатель переводят в генераторный режим и энергию вращающихся или движущихся масс преобразуют в электрическую энергию, отдаваемую в сеть (см. Л. Р. №4).

3. *Динамическое торможение*, при котором асинхронный двигатель переводят в режим синхронного генератора [8], работающего автономно за счет кинетической энергии вращающихся или движущихся масс.

Торможение двигателя по методу противовключения. При этом методе торможения изменяют направление вращения магнитного поля и заставляют ротор машины вращаться в направлении, обратном движению магнитного поля, т. е. при скольжениях $s = (n_1 + n)/n_1 > 1$.

Изменение направления вращения поля осуществляется переключателем, принципиальная схема которого показана на рис. 10.22.

Процесс торможения методом противовключения связан со значительным увеличением токов в обмотках статора и ротора. В ряде случаев при торможении обмотку статора переключают с треугольника на звезду, что также снижает токи, но одновременно уменьшает тормозной момент приблизительно в 3 раза.

Все последовательные операции торможения противовключением обычно автоматизируются. При неавтоматизированном торможении необходимо следить за тем, чтобы двигатель в момент, когда скорость его вращения станет равной нулю, был отключен от сети, так как в противном случае он начнет ускоряться в обратном направлении.

Рекуперативное торможение асинхронного двигателя. Для осуществления этого метода торможения асинхронную машину необходимо перевести из двигательного в генераторный режим (см. Л. Р. №4). Эта возможность возникает, например, в случае повышения механической скорости вращаемого двигателем механизма за счет появления отрицательного момента сопротивления, возникающего в подъемных устройствах при спуске груза, в транспортных – при движении под уклон и т. п.

Перевод двигателя в генераторный режим при скоростях ниже синхронной возможен при увеличении числа полюсов обмотки статора путем соответствующего ее переключения.

Для повышения тормозного момента в генераторном режиме возможно переключение обмотки статора со звезды на треугольник. В этом случае тормозной момент возрастает примерно в 3 раза.

Динамическое торможение асинхронного двигателя. При этом методе торможения статор двигателя с фазным ротором отключают от сети переменного тока и присоединяют к источнику постоянного тока. К кольцам ротора присоединяют трехфазное нагрузочное активное сопротивление, в качестве которого в некоторых случаях может быть использовано пусковое сопротивление двигателя. Машина, вращаясь по инерции, переходит в режим автономного синхронного генератора, за счет чего и осуществляется торможение агрегата [8]. Все последующие операции динамического торможения обычно автоматизируются.

3.12. Построение рабочих характеристик двигателя по данным опытов холостого хода и короткого замыкания

3.12.1. Назначение круговой диаграммы трехфазной асинхронной машины

В трансформаторах эксплуатационные характеристики, к которым относятся внешняя характеристика и зависимость КПД, определяют по данным опытов холостого хода и короткого замыкания [7, с. 31, сл.]. Для определения этих характеристик достаточно располагать одной точкой опыта

х. х., которая соответствует номинальному фазному напряжению, и одной точкой опыта к. з., пересчитанной на номинальное фазное напряжение. Такое определение эксплуатационных характеристик особенно важно для трансформаторов большой мощности, так как в условиях завода-изготовителя провести испытание трансформаторов при их номинальной нагрузке затруднительно.

Рабочие характеристики двигателей [термин 21] также можно определить по данным опытов х. х. и к. з., но не непосредственно, как в трансформаторе. Предварительно по данным опытов х. х. и к. з. двигателя строится круговая диаграмма. А далее по круговой диаграмме находятся рабочие (эксплуатационные) характеристики двигателя.

Круговой диаграммой асинхронной машины называется [термин 23] геометрическое место концов векторов (годограф) токов статора и ротора вращающейся машины при ее работе в разных режимах: двигателя, генератора и электромагнитного тормоза (см. с. 9). Если принять, что параметры машины постоянны (неизменны активные и индуктивные сопротивления), то геометрическим местом концов векторов является окружность.

В случае асинхронного двигателя рабочие характеристики дают возможность судить об изменениях скорости вращения ротора n , вращающего момента M , тока статора I_1 , $\cos \varphi_1$ и КПД η в зависимости от полезной мощности двигателя P_2 . Для оценки двигателя необходимо знать также его перегрузочную способность (отношение максимального момента двигателя к номинальному) и ряд других свойств. Рабочие характеристики можно получить путем непосредственного испытания (нагрузки) машины и измерения всех интересующих величин (рис. 10.23).

Однако для машин значительной мощности непосредственная нагрузка представляет достаточно сложную, дорогостоящую и часто даже невыполнимую операцию в условиях испытания машины.

Более просто, как упомянуто выше, характеристики асинхронной машины могут быть получены из круговой диаграммы, которая строится на основании двух опытов: холостого хода и короткого замыкания. Эти опыты достаточно просты, они выполняются относительно быстро при малом расходе энергии (см. с. 173, сл.). Результаты исследования, полученные из круговой диаграммы, обычно мало отличаются от результатов непосредственного опыта. Точность этого метода в большинстве случаев вполне достаточна для целей практики.

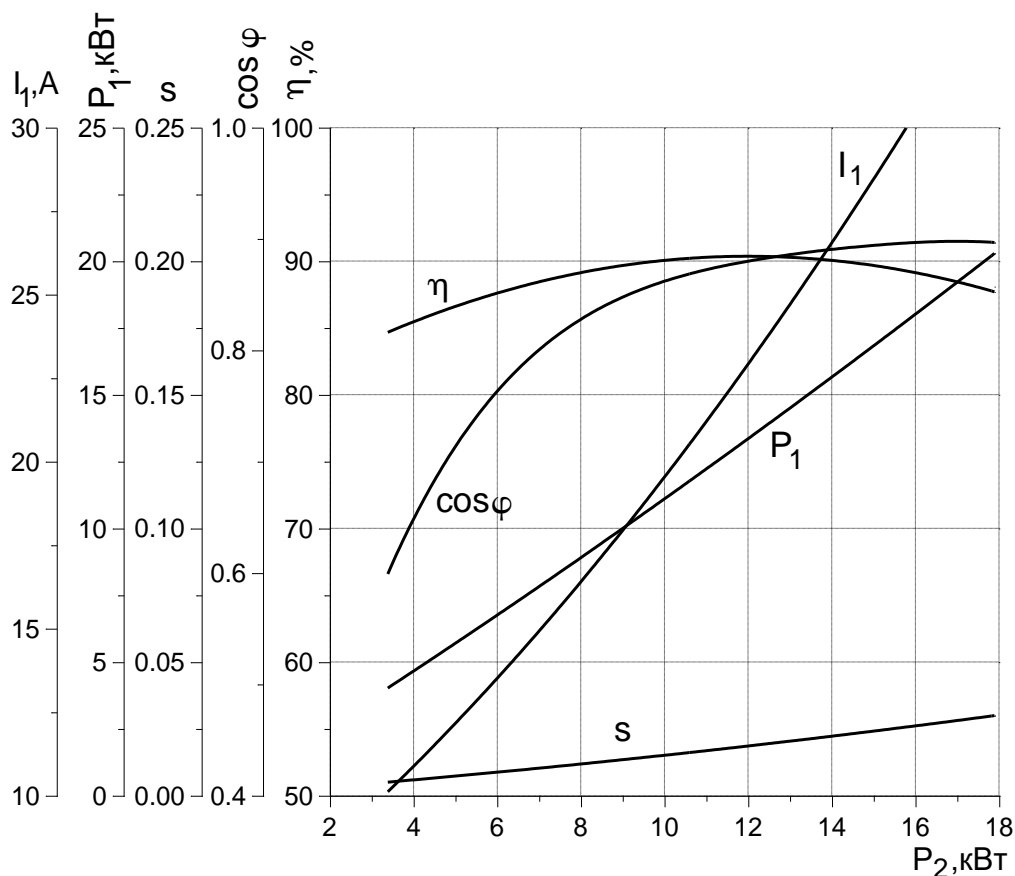


Рисунок 10.23. – Рабочие характеристики асинхронного двигателя мощностью 15 кВт

Для двигателей с мощностью $P_H \leq 100$ кВт ГОСТ 7217–87 предписывает определение рабочих характеристик непосредственно из соответствующих опытов нагрузки двигателя, а для машин с $P_H > 100$ кВт допускается определение характеристик с помощью круговых диаграмм.

3.12.2. Опыты холостого хода и короткого замыкания двигателя

Возможно построение круговой диаграммы по *расчетным данным*, так как при проектировании машины находятся также ее параметры, определяющие вид круговой диаграммы, ее положение относительно осей и ее характерные точки, диаметр D_k , угол γ , определяющий направление диаметра, и значения первичных токов $I_{и.х.}$, I_k , I_∞ , соответствующих скольжениям $s = 0, 1, \infty$ (см. разд. 3.12.3).

Построение круговой диаграммы по *опытным данным* производится на основе опытов холостого хода и короткого замыкания.

Опыт холостого хода. Ротор двигателя вращается без механической нагрузки на валу. Скольжение ротора в режиме *реального холостого хода* незначительно больше нуля, $s > 0$. В процессе опыта измеряется первичная

мощность холостого хода P_x и ток холостого хода I_x при различных значениях приложенного к обмотке статора напряжения U_1 (имеются в виду фазные значения U_1 и I_x). По этим данным рассчитывается коэффициент мощности двигателя

$$\cos \varphi_x = P_x / m_1 I_x U_1$$

и строятся характеристики холостого хода P_x , I_x , $\cos \varphi_x = f(U_1)$ (рис. 10.24).

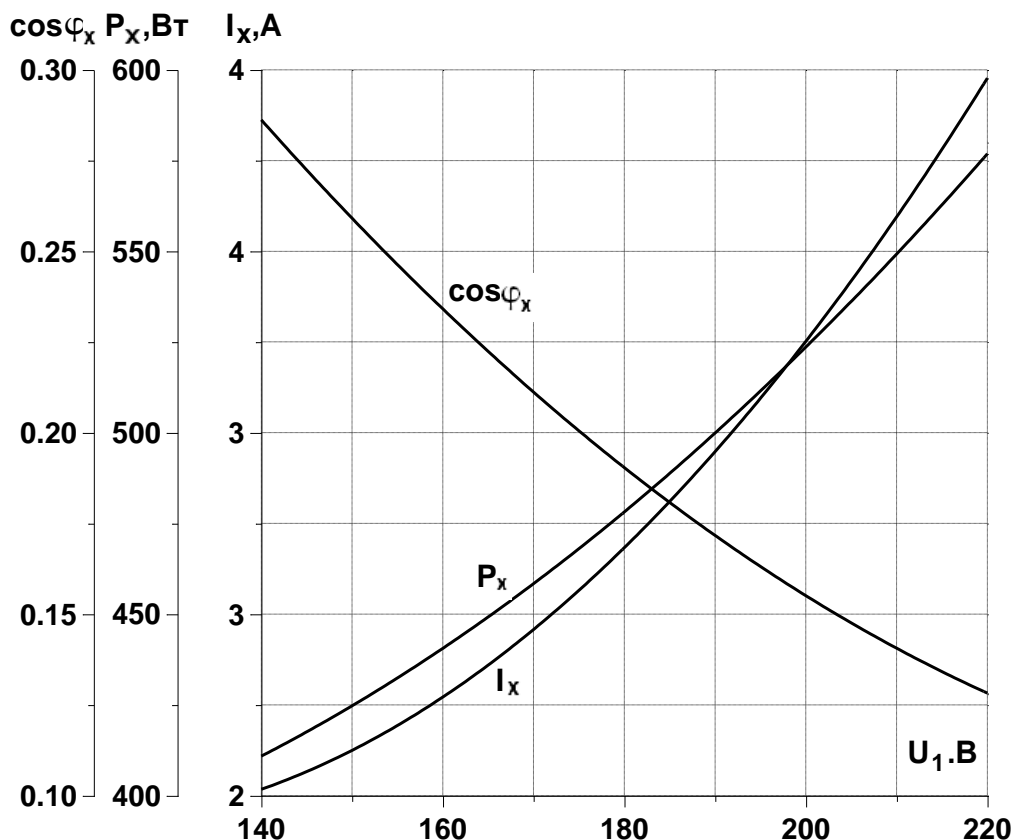


Рисунок 10.24. – Характеристики холостого хода двигателя

Заметим, что трансформатор имеет такие же качественно характеристики холостого хода, но есть количественные отличия [7, с. 31]. У нормальных серийных асинхронных двигателей при $U_1 = U_{1H}$ ток $I_x = (0,25 \div 0,5)I_{1H}$ и $\cos \varphi_x = 0,09 \div 0,18$.

Также рассчитываются сопротивления двигателя при холостом ходе (см. разд. 4, с. 169).

Для построения круговой диаграммы требуется найти точку *идеального холостого хода* при котором скольжение ротора $s = 0$. Эта точка также называется *точкой синхронизма*, так как при идеальном холостом ходе ро-

тор вращается с той же скоростью, что и поле, то есть $n = n_1$ (табл. 10.1, с. 103). Ротор двигателя не может самостоятельно достичь скорости поля n_1 , поэтому к ротору необходимо приложить внешний момент. С целью нахождения точки идеального холостого хода (точки синхронизма) осуществляется следующее.

Вычитая из P_x электрические потери в первичной обмотке $p_{\varepsilon 1}$ для каждого значения U_1 , находим сумму магнитных $p_{\text{МГ}}$ и механических потерь $p_{\text{МХ}}$

$$p_{\text{МГ}} + p_{\text{МХ}} = P_x - p_{\varepsilon 1} = P_x - m_1 I_x^2 R_1.$$

В условиях опыта скорость ротора $n \approx \text{const}$, и поэтому $p_{\text{МХ}}$ можно принять постоянными, в то время как величина $p_{\text{МГ}}$ изменяется пропорциональна U_1^2 .

Построив зависимость (рис. 10.25)

$$p_{\text{МГ}} + p_{\text{МХ}} = f(U_1^2),$$

которая вследствие изложенного должна представлять собой прямую линию, и продолжив ее до оси ординат, определим $p_{\text{МХ}}$ и $p_{\text{МГ}}$ для $U_1 = U_{1\text{н}}$. По величине $P_x - p_{\text{МХ}}$, выраженной в масштабе мощности, на круговой диаграмме определяют точку идеального, или синхронного, холостого хода ($s = 0$) (см. рис. 10.27,а, точка O).

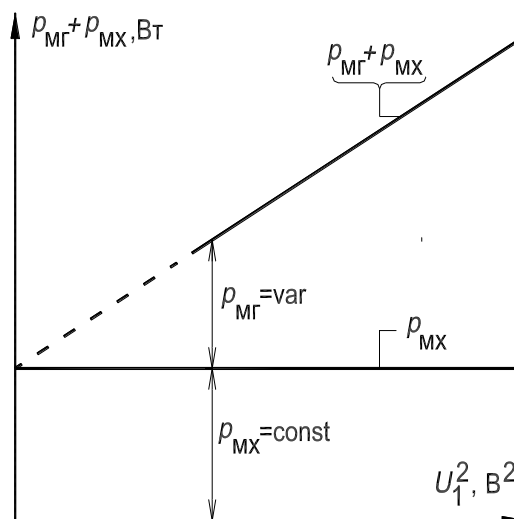


Рисунок 10.25. – Разделение магнитных и механических потерь асинхронного двигателя

При холостом ходе сдвиг фаз между ЭДС E_1 и током I_x приближенно составляет 90° . Поэтому из анализа векторной диаграммы, соответствующей режиму холостого хода двигателя, приближенно следует [3, рис. 24-8]

$$\sin \gamma \approx I_x r_1 / U_1$$

и

$$\sin 2\gamma \approx 2I_x r_1 / U_1. \quad (10.68)$$

На угол γ сдвинуты векторы $-\underline{E}_1$ и \underline{U}_1 .

Соотношение (10.68) позволяет определить направление диаметра круговой диаграммы D_k . Если углом γ пренебречь, что допустимо для двигателей мощностью более 10 кВт, то строится *упрощенная* круговая диаграмма и диаметр диаграммы занимает горизонтальное положение (см. рис. 10.27,а). Если угол учитывать, то строится *точная* диаграмма. О точности построения диаграммы – см. разд. 3.12.8.

Опыт короткого замыкания. Для реализации короткого замыкания двигателя его ротор должен быть неподвижен ($s = 1$), для чего вал ротора закрепляется с целью предотвращения его вращения. В процессе опыта измеряются, для нескольких значений первичного напряжения U_1 , первичная мощность P_k и первичный фазный ток I_k . При *постоянных параметрах* двигателя зависимость $I_k = f(U_1)$ представляет собой прямую, зависимость $P_k = f(U_1)$ – квадратичную параболу, а $\cos \varphi_k \approx \text{const}$ (рис. 10.26).

Во избежание возникновения больших токов и перегрева обмоток опыт короткого замыкания обычно проводится при пониженном напряжении, так что $I_k \leq (1,0 \div 1,2) I_{1H}$. Значения тока I_k и мощности короткого замыкания P_k , определенные из эксперимента, пересчитывают на номинальное напряжение по формулам:

$$I_{k.H} = I_k U_{1H} / U_1; \quad (10.69)$$

$$P_{k.H} = P_k U_{1H}^2 / U_1^2 = P_k I_{k.H}^2 / I_k^2,$$

где I_k , P_k и U_1 соответствуют одному из произведенных замеров или одной из точек характеристик $I_k = f(U_1)$, $P_k = f(U_1)$.

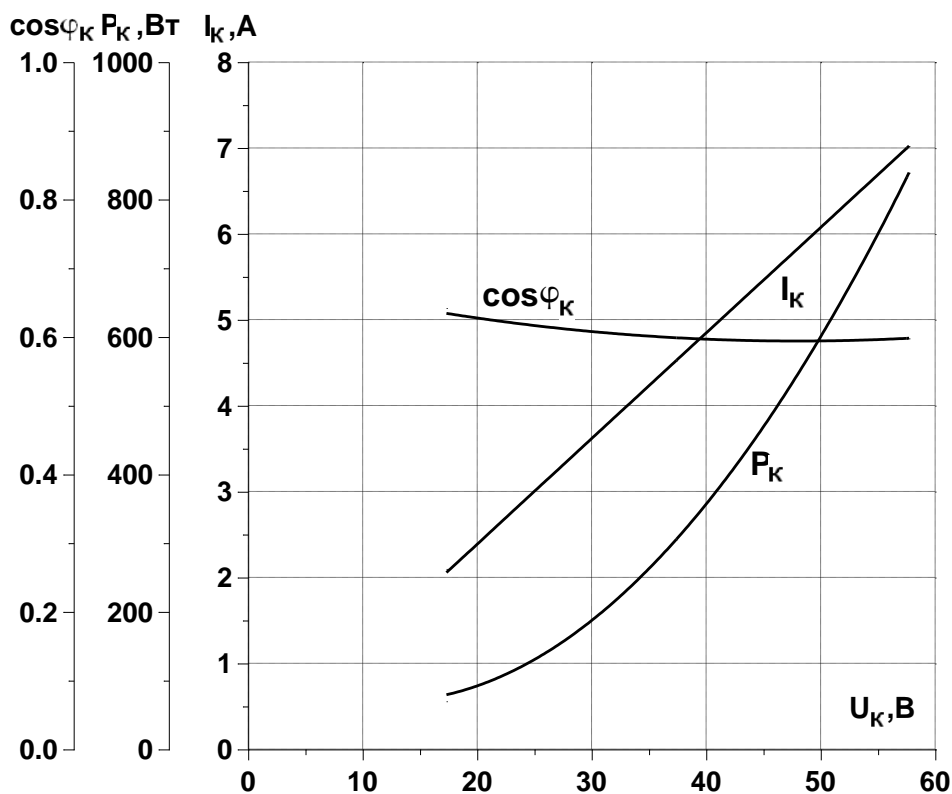


Рисунок 10.26. – Характеристики короткого замыкания двигателя

При проведении опыта короткого замыкания следует иметь в виду, что значение сопротивления Z_K несколько меняется при изменении тока в обмотках статора и ротора, так как с увеличением тока I_K сопротивление X_K вначале уменьшается, а затем остается практически постоянным. Это приводит к тому, что зависимость тока I_K от напряжения U_1 в некоторых случаях заметно отклоняется от прямолинейной.

Характеристику короткого замыкания $I_K = f(U_1)$ можно рассматривать как магнитную характеристику зоны полей рассеяния. Поэтому при насыщении этой зоны и в первую очередь зубцовой зоны характеристика, $I_K = f(U_1)$ начинает отклоняться от прямой.

3.12.3. Построение упрощенной круговой диаграммы.

В описании Л. Р. №2, разд. 4.8 построение круговой диаграммы выполнено детально по данным экспериментального исследования двигателя в режимах холостого хода и короткого замыкания. В настоящем разделе 3.12.3 показано только построение окружности токов круговой диаграммы, то есть геометрического места концов векторов (годографа) токов статора и ротора двигателя, генератора и электромагнитного тормоза. Принимаем параметры машины постоянными.

Построение годографа токов асинхронного двигателя. Последовательность построения годографа следующая (рис. 10.27,а) (обоснование построения не приводится [1–4]).

1) Из точки O_1 проводят оси абсцисс и ординат. Ось ординат соответствует фазному напряжению U_1 обмотки статора;

2) Выбирают масштаб тока m_i (рекомендации см. на с. 205, Л. Р. №2);

3) Определяют масштабы мощности $m_p = 3U_1 \cdot m_i$ и момента $m_m = m_p / \Omega_1$, (рекомендации см. с. 205 и 209, Л. Р. №2);

4) Точка идеального холостого хода O ($s = 0$) определяется по току $I_{и.х}$ (отрезок O_1O) и потерям $P_x - p_{мх}$ (отрезок $O'O$). Считаем, что ток $I_{и.х}$ приближенно равен измеренному значению тока холостого хода I_x при номинальном напряжении $U_{1н}$). Для построения проводят прямую OD параллельно оси абсцисс на расстоянии $O'O$ от оси. Затем из точки O_1 раствором циркуля O_1O отсекают эту прямую в точке O , которая и является точкой идеального холостого хода. Проводят линию O_1O , которую считают соответствующей току идеального холостого хода $I_{и.х}$ (см. рис. 10.7,б);

5) Точка короткого замыкания K ($s = 1$) определяется по фазному току $I_{к.н}$ (отрезок O_1K) и потерям $P_{к.н}$ (отрезок KH). Для построения проводят прямую параллельно оси абсцисс на расстоянии KH от этой оси. Затем из точки O_1 раствором циркуля O_1K отсекают эту прямую в точке K , которая и является точкой короткого замыкания. Проводят линию O_1K ;

6) Проводят отрезок OK , который соответствует току $-I''_{2к.н}$ в Г-образной схеме замещения при скольжении $s = 1$ (см. рис. 10.7,б). Из середины отрезка OK восстанавливают перпендикуляр (пунктирная линия) до пересечения с линией OD в точке C . Через точки O и K проводят окружность с центром в точке C , которая и является годографом векторов тока статора \underline{I}_1 и ротора $-\underline{I}''_2$;

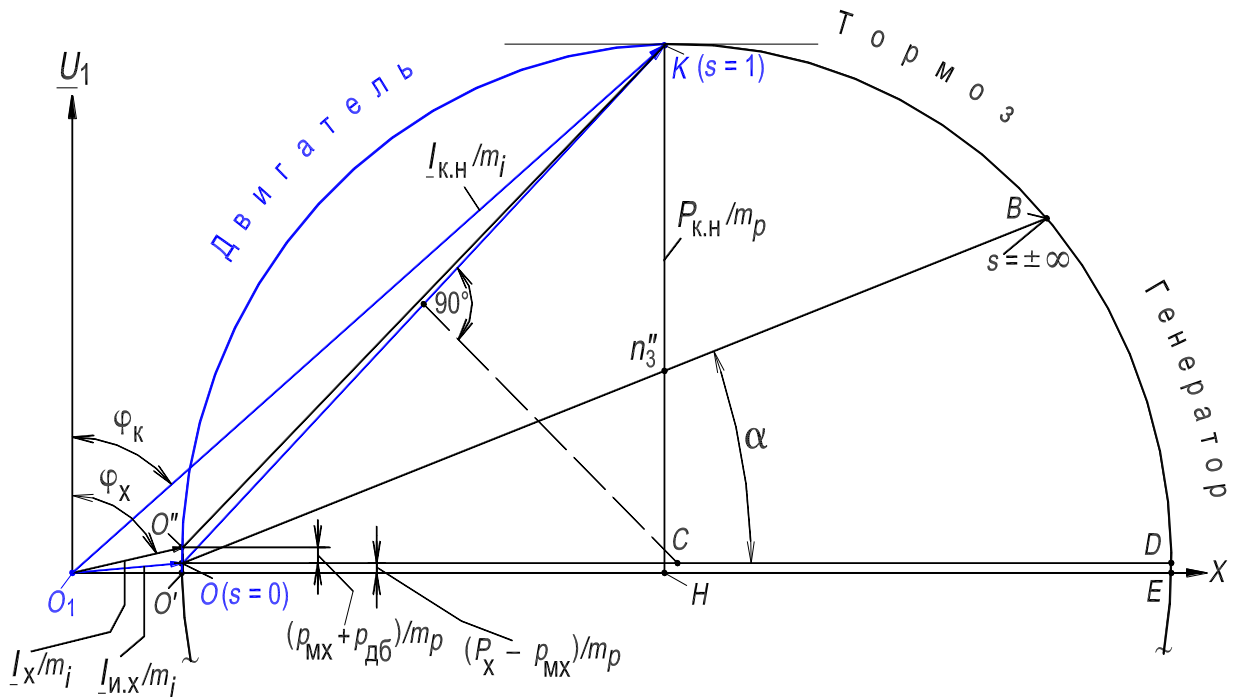


Рисунок 10.27,а. – Годограф токов (круговая диаграмма) асинхронного двигателя

7) Строят точку реального холостого хода O'' по потерям $p_{мх} + p_{дб}$ (отрезок $O'O''$). Точка O'' расположена на одной вертикали с точкой идеального холостого хода O выше оси абсцисс O_1X на величину отрезка $O'O''$. Проводят линию O_1O'' , которая соответствует току реального холостого хода I_x . Проводят линию $O''K$;

8) Проводят под углом α прямую OB , точка B соответствует скольжению $s = \pm\infty$ [формулу для определения угла α см. Л. Р. №2, с. 206, пункт 8)]. Отрезки этой прямой Kn_3'' и $n_3''H$ относятся как R_2' к R_1 ;

9) Верхняя дуга OK соответствует режиму двигателя ($0 < s \leq 1$); меньшая дуга KB соответствует режиму электромагнитного тормоза ($1 < s \leq +\infty$); дуга BO (показана частично) – режиму асинхронного генератора ($-\infty \leq s < 0$).

Дополним рис. 10.27,а, показав на рис. 10.27,б линии мощностей (см. рис. 10.6) в части круговой диаграммы, соответствующей режиму двигателя.

Линия $O'E$ – линия активной мощности P_1 , подведенной к двигателю из электросети.

Линия OB – линия электромагнитной мощности $P_{эм}$, передаваемой через зазор δ со статора на ротор посредством вращающегося магнитного поля. Она также является линией электромагнитного момента M двигателя;

2) Шкала коэффициента мощности $\cos \varphi_1$:

а) проводят дугу (пунктирная линия) радиусом с центром в точке O_1 до пересечения с осью ординат в точке Y (радиус должен удобно делиться на 100 частей);

б) линия O_1Y является шкалой коэффициента мощности $\cos \varphi_1$.

3) Шкала КПД η :

а) продлевают линию $O''K$ до пересечения с осью абсцисс O_1X в точке t , получена линия th ;

б) через точку t проводят вертикаль, ей соответствуют сумма потерь в двигателе равная нулю, $\Sigma p = 0$, получена линия tq ;

в) проводят горизонталь hq так, чтобы она удобно делилась на 100 частей. Линия hq является шкалой КПД η .

На этом построение круговой диаграммы заканчивается.

3.12.5. Определение мощностей и потерь мощности двигателя по круговой диаграмме

Определение по диаграмме основных величин, характеризующих работу двигателя, показано на рис. 10.27.в.

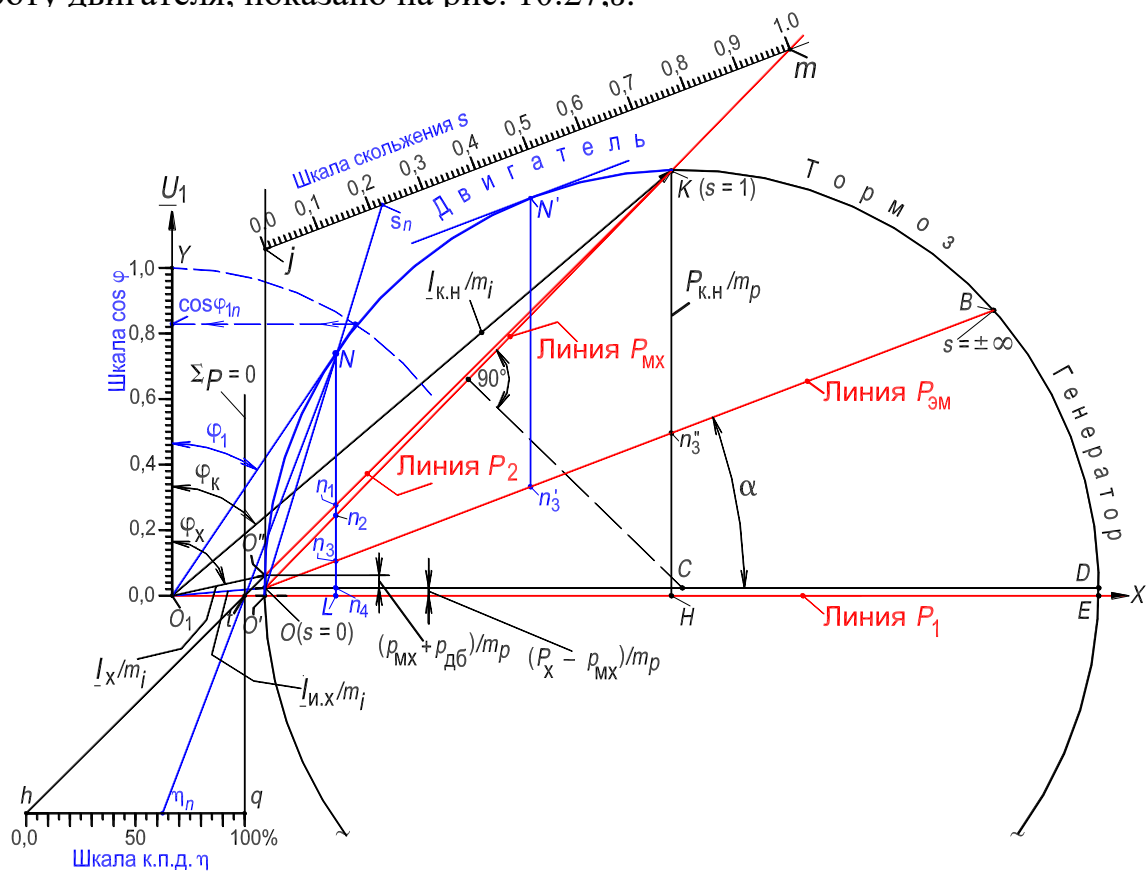


Рисунок 10.27.в. – Определение мощностей двигателя по круговой диаграмме

1) активная мощность P_1 – проводят линию O_1N касательную к годографу в точке N и обозначают угол φ_1 [касательная проведена для удобства анализа; для определения P_1 можно провести любую линию пересекающую годограф между точками O ($s = 0$) и K ($s = 1$)]. Линия O_1N в масштабе токов является током в обмотке статора, $I_1 = O_1N \cdot m_i$. Опускают перпендикуляр NL на ось абсцисс. Линия $NL = O_1N \cdot \cos \varphi_1$, в масштабе мощности, есть мощность $P_1 = NL \cdot m_p$. Мощности и потери мощности двигателя (см. рис. 10.6), соответствуют отрезкам линии NL ;

2) электромагнитная мощность $P_{эм} = Nn_3 \cdot m_p$;

3) механическая мощность на роторе $P_{мх} = Nn_2 \cdot m_p$;

4) полезная механическая мощность на валу $P_2 = Nn_1 \cdot m_p$;

5) электрические потери в обмотке статора $p_{э1} = n_3n_4 \cdot m_p$;

6) электрические потери в обмотке ротора $p_{э2} = n_2n_3 \cdot m_p$;

7) магнитные потери в магнитопроводе $p_{мг}$ и электрические потери в обмотке статора от тока $I_{и.х}$ идеального холостого хода $p_{мг} + p_{и.э1} = n_4L \cdot m_i$;

8) механические и добавочные потери $p_{мх} + p_{дб} = OO'' \cdot m_i$.

3.12.6. Определение скольжения s , КПД η и коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ двигателя по круговой диаграмме

а) Скольжение s – проводя линию ON до пересечения со шкалой скольжения, определяют скольжение, соответствующее точке N , $s_n = 0,22$.

Линия ON , выраженная в масштабе токов, является током ротора, $-I''_2 = ON \cdot m_i$ (см. Г-образную схему замещения на рис. 10.7,б);

б) КПД η – проводя линию Nt до пересечения со шкалой КПД, определяют коэффициент полезного действия, соответствующий точке N , $\eta_n = 62$ %. КПД также можно определить, как отношение отрезка Nn_1 к отрезку NL ;

в) Коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ – продлевая линию O_1N до пересечения с дугой, изображенной пунктирной линией, и опуская перпендикуляр на линию O_1Y , определяют коэффициента мощности, соответствующий точке N , $\cos \varphi_{1n} = 0,815$.

3.12.7. Определение электромагнитных моментов, кратностей моментов и пускового тока двигателя по круговой диаграмме

Линия электромагнитной мощности $P_{эм}$ на круговой диаграмме является также линией электромагнитного момента M , так как

$$M = P_{эм}/\Omega_1 = P_{эм}/2\pi n_1 = p \cdot P_{эм}/2\pi f_1.$$

а) пусковой момент $M_{п}$ – из точки K ($s = 1$) опускают перпендикуляр на диаметр круговой диаграммы DO . Отрезок этого перпендикуляра Kn_3'' , между точкой K и линией OB электромагнитной мощности, выраженный в масштабе момента m_m , соответствует пусковому моменту $M_{п} = Kn_3'' \cdot m_m$;

б) момент соответствующий точке N – определяется отрезком Nn_3 , выраженным в масштабе момента, $M_n = Nn_3 \cdot m_m$;

в) максимальный момент M_M – проводят касательную к годографу в точке N' , параллельную линии электромагнитного момента OB . Из точки касания проводят вертикаль до линии OB . Эта вертикаль $N'n_3'$, выраженная в масштабе момента, соответствует максимальному моменту $M_M = N'n_3' \cdot m_m$;

Кратность максимального момента (перегрузочная способность двигателя) определяется отношением отрезков $N'n_3'$ и Nn_3 , $k_M = N'n_3'/Nn_3$ (если считать, что точка N соответствует номинальному режиму двигателя). А кратность пускового момента, при этом условии, определяется отношением отрезков Kn_3'' и Nn_3 , $k_{п} = Kn_3''/Nn_3$;

г) пусковой ток $I_{1п} - I_{1п} = O_1K m_i$ Кратность пускового тока определяется отношением отрезков O_1K и O_1N , $k_i = O_1K/O_1N$ (предполагается, что отрезок O_1N соответствует номинальному току статора, $I_{1н} = O_1N m_i$).

3.12.8. Точность построения круговой диаграммы

При оценке точности нахождения значений кратностей пускового момента и тока, а также максимального момента, *которые определены без учета насыщения стали магнитопровода*, необходимо принять во внимание, что при больших токах и скольжениях параметры двигателя (сопротивления Г-образной схемы замещения, см. рис. 10.7,б) перестают быть постоянными, поэтому годограф токов будет более сложной линией, чем окружность. Объясняется это следующим образом.

Каждой точке на окружности токов, то есть на годографе векторов тока статора и ротора (см. рис. 10.27,в), соответствует уравнение равновесия МДС асинхронной машины (см. Г-образную схему замещения на рис. 10.7,б)

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{и.х} + (-\underline{I}_2''), \quad (10.70)$$

где \underline{I}_1 – вектор тока статора; $\underline{I}_{и.х}$ – вектор тока статора при идеальном холостом ходе двигателя ($s = 0$); \underline{I}_2'' – вектор приведенного тока ротора.

Для точки N векторам уравнения (10.70) соответствуют отрезки O_1N , O_1O и ON . Для точки короткого замыкания K – отрезки O_1K , O_1O и OK и т. д. Как видно из рис. 10.27,в диаметр годографа токов OD соответствует наибольшему значению приведенного тока ротора, являющемуся реактивным. Длина диаметра OD практически обратно пропорциональна индуктивному сопротивлению короткого замыкания $X_k = X_1 + X_2'$, то есть $I_2'' = U_{1н}/X_k \approx OD \cdot m_j$. С увеличением скольжения вследствие насыщения зубцовой зоны магнитопровода это сопротивление X_k уменьшается, а диаметр круговой диаграммы OD уже по этой причине увеличивается по сравнению с его значением при малых скольжениях и поэтому годограф токов будет более сложной линией, чем окружность.

4. Экспериментальные исследования

Испытания асинхронного двигателя с беличьей клеткой выполняются на лабораторной установке, состоящей из двигателя типа А41/4 и генератора постоянного тока типа ПН-45. На рис. 10.29 приведена схема опыта и номинальные данные исследуемого асинхронного двигателя и генератора.

Посредством генератора создается нагрузка на валу исследуемого двигателя: электромагнитный момент генератора направлен навстречу моменту, развиваемому двигателем.

Значение омического сопротивления фазы обмотки статора:
 $R_1 = 1,33 \text{ Ом}$.

4.1. Пуск двигателя

Пуск двигателя на холостой ход осуществить следующим образом.

1. Установить верхнее значение диапазона измерений вольтметра PVI на 600 В, цена деления – 40 В/дел;
2. Установить верхнее значение диапазона измерений амперметров $PA1$, $PA2$, $PA3$ на 15 А, цена деления – 1 А/дел;
3. Установить верхнее значение диапазона измерений ваттметров по напряжению на 300 В, по току – 5 А, *цена деления* – $K_{вт} = 10 \text{ Вт/дел}$;
4. Установить *рукоятку на шкале* автотрансформатора на напряжение $U_1 \approx 200 \text{ В}$;
5. Включить автомат $QF1$: ротор двигателя начнет вращаться;
6. После того, как токи обмотки статора при $U_1 \approx 200 \text{ В}$ примут установившееся значение, *плавно* увеличить автотрансформатором значение напряжения до номинального, $U_{1н} = 380 \text{ В}$ (вольтметр PVI). При *установившемся* значении токов и скорости *пуск двигателя завершен*.

При напряжении $U_{1н} = 380 \text{ В}$ измерить бесконтактным цифровым тахометром установившуюся частоту вращения ротора n_x (отражающая метка расположена на периферии муфты, сопрягающей валы двигателя и генератора). Показание записать.

Осуществить *реверс двигателя* следующим образом.

1. Отключить автоматом $QF1$ двигатель от электросети;
2. Изменить чередование фаз обмотки статора (поменять местами проводники на началах фаз обмотки U и V);
3. В соответствии с указанной выше последовательностью осуществить пуск еще раз.

Двигатель от электросети не отключать.

4.2. Изменение диапазона измерений амперметров $PA1$, $PA2$, $PA3$ при работающем двигателе

В таблице приведены значения четырех диапазонов измерения и цены деления амперметров $PA1$, $PA2$ и $PA3$ (см. обозначения этих амперметров на рис. 10.29).

Диапазон измерений, А	15	7,5	3	1,5
Цена деления $K_{ам}$, А/дел	1	0,5	0,2	0,1

1) На рис.10.28, б из синего гнезда « c^* » выходят два проводника:

1-й, **черный**, он соединяет на рис. 10.29 гнезда « c^* » и « c »;

2-й, **красный**, он в опытах «висит» из гнезда « c^* » (см. рис. 10.29);

2) На рис. 10.28, б из гнезда «15 А» выходит один проводник: он соединяет на рис. 10.29 гнезда «15 А» и «*» (см. ваттметр $PW3$); именно этот проводник необходимо переставить из гнезда «15 А» в гнездо «3 А» (или в гнездо: «7,5 А»; «1,5 А») не разрывая цепь с током;

3) Последовательность перехода:

а) «висящий» конец **красного** проводника (рис. 10.29) вставить в гнездо « W » (это начало фазы W двигателя): амперметр $PA3$ зашунтирован, стрелка прибора находится на нуле;

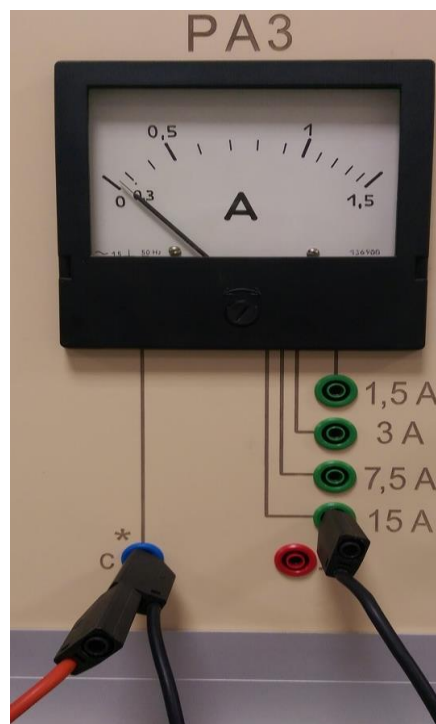
б) вынуть проводник из гнезда «15 А» и вставить в гнездо «3 А» [рис. 10.29 и 10.28,б и в];

в) вынуть конец **красного** проводника из гнезда « W » и оставить его «висящим».

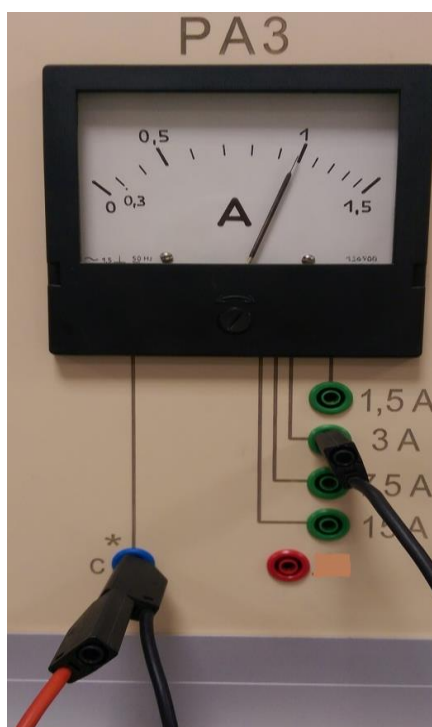
На этом процесс перехода на диапазон измерений токов 3 А завершен. Аналогично совершается переход на диапазон измерений токов 3 А в фазах U и V .



a)



б)



в)

Рисунок 10.28. – К иллюстрации перехода с диапазона измерений токов «15 А» на диапазон измерений токов «3 А»
 (на примере амперметра PA3 в фазе W обмотки статора)

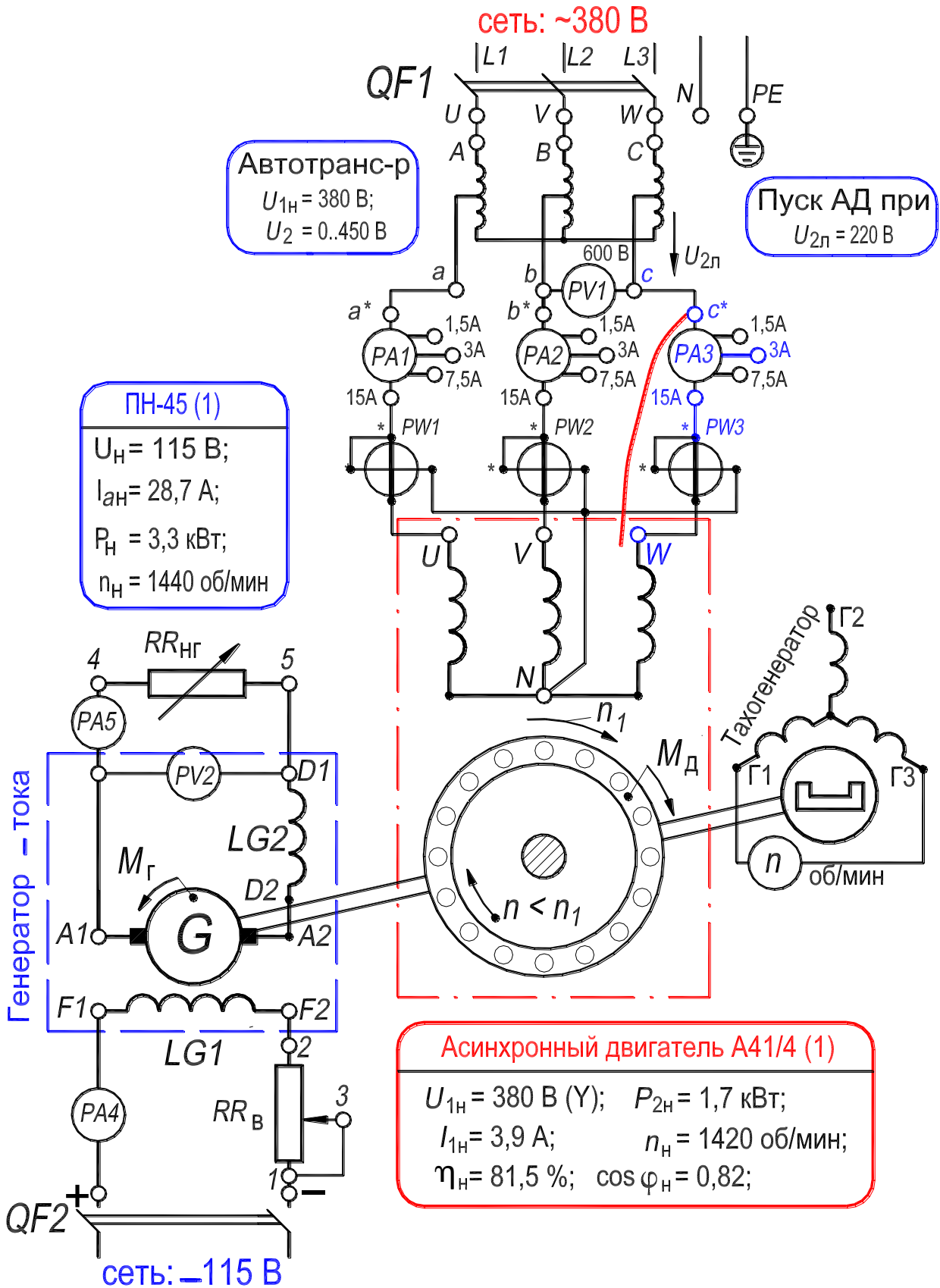


Рисунок 10.29. – Схема лабораторной установки для исследования асинхронного двигателя с беличьей клеткой

4.3. Опыт холостого хода

В опыте холостого хода двигателя обмотка статора подключена к напряжению электросети, а на валу отсутствует механическая нагрузка (см. разд. 3.12.2). В процессе опыта холостого хода, при значении тока обмотки статора *менее* 3 А, целесообразно установить верхнее значение диапазона измерений амперметров PA1, PA2, PA3 на 3 А (последовательность перехода на другой диапазон, см. рис. 10.28).

В процессе всех опытов записывать значения коэффициентов: $K_{ам}$ – цена деления амперметров PA1, PA2, PA3; $K_{вт}$ – цена деления ваттметров PW1, PW2, PW3.

Опыт холостого хода осуществить в следующей последовательности.

1. Линейное напряжение на зажимах обмотки статора установить равным $U_x = 1,1 \cdot U_{1н} \approx 400$ В (вольтметра PVI), а затем уменьшать до величины 120 В с шагом примерно 20–40 В.
2. Записывать в табл. 10.2 показания приборов в цепи обмотки статора двигателя при каждом дискретном значении напряжения (одно из измерений произвести при $U_{1н} = 380$ В).
3. При последнем, *меньшем*, значении напряжения измерить и записать частоту вращения ротора n_x .

Асинхронный двигатель отключить от электросети

По данным опыта построить характеристики холостого хода $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_x)$ и зависимость $p_{мг} + p_{мх} = f(U_x^2)$ [см. ниже в разд. 3) пп. а), б), в)].

Таблица 10.2. – Измерение и расчет характеристик холостого хода

Измерение							Расчет							
U_x	I_{U_x}	I_{V_x}	I_{W_x}	P_{U_x}	P_{V_x}	P_{W_x}	I_x	P_x	$\cos \varphi_x$	$p_{э1}$	U_x^2	$p_{мг} + p_{мх}$	$p_{мг}$	$p_{мх}$
В	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	А	Вт	–	Вт	В ²	Вт	Вт	Вт

Расчетные величины определить в следующем порядке.

1) Ток холостого хода I_x по формуле

$$I_x = I_{л.х} = I_{ф.х} = K_{ам} \cdot (I_{U_x} + I_{V_x} + I_{W_x}) / 3; \quad (10.71)$$

2) Потери холостого хода и коэффициент мощности по формулам:

$$P_x = K_{вт} \cdot (P_{U_x} + P_{V_x} + P_{W_x}), \text{ Вт}; \quad (10.72)$$

$$\cos \varphi_x = P_x / \sqrt{3} U_x I_x; \quad (10.73)$$

3) Разделение потерь холостого хода P_x (определение магнитных $p_{мг}$ и механических $p_{мх}$ потерь) произвести следующим образом:

а) Определить электрические потери в обмотке статора

$$p_{э1} = 3 \cdot I_x^2 R_{1(75^\circ)}, \quad (10.74)$$

где $R_{1(75^\circ)}$ – сопротивление фазы обмотки статора, приведенное к расчетной рабочей температуре двигателя, составляющей 75°C .

$$R_{1(75^\circ)} = R_{1(t)} (235^\circ + 75^\circ) / (235^\circ + t),$$

где t – температура окружающей среды, при которой производится измерение сопротивления $R_{1(t)}$. Величина сопротивления $R_{1(t)}$ приводится в паспорте двигателя ($R_{1(t)} = 1,33 \text{ Ом}$), а значение температуры t можно приближенно принять равным 20°C ;

б) Определить сумму магнитных и механических потерь:

$$p_{мг} + p_{мх} = P_x - p_{э1}; \quad (10.75)$$

в) Построить зависимость $p_{мг} + p_{мх} = f(U_x^2)$, которая должна представлять собой прямую линию. Провести между опытными точками указанной зависимости прямую линию до пересечения с осью ординат. Значение механических потерь равно отрезку, отсекаемому этой прямой на оси ординат. Все ординаты выше горизонтальной линии механических потерь [разность $(p_{мг} + p_{мх}) - p_{мх}$], соответствуют магнитным потерям (в стали).

Результаты расчетов, полученные в пп. 1), 2), 3), записать в табл. 10.2.

4.4. Опыт короткого замыкания

Разъединить муфту, сопрягающую валы двигателя и генератора. Затормозить ротор двигателя рычагом. К обмотке статора в процессе опыта подводить *пониженное* напряжение $U_k \leq 125 \text{ В}$, при котором токи в обмотке статора не превышают значение $1,3 \cdot I_{1н} = 1,3 \cdot 3,9 \approx 5 \text{ А}$ (см. разд. 3.12.2).

В процессе опыта короткого замыкания измерять следующие величины: линейное напряжение (вольтметр $PV1$, установить верхнее значение диапазона измерений на 150 В, цена деления – 10 В/дел); ток статора (амперметры $PA1$, $PA2$, $PA3$, установить верхнее значение диапазона измерений на 7,5 А, цена деления – 0,5 А/дел); активную мощность (ваттметры $PW1$, $PW2$, $PW3$, установить верхнее значение диапазона измерений по напряжению на 150 В, по току на 5 А, цена деления – 5 Вт/дел).

При значении тока обмотки статора менее 3 А, целесообразно установить верхнее значение диапазона измерений амперметров $PA1$, $PA2$, $PA3$ на 3 А (последовательность перехода на другой диапазон, см. рис. 10.28).

Опыт короткого замыкания осуществить в следующей последовательности.

1. Установить рукоятку на шкале автотрансформатора на напряжение 0,0 В.
2. Включить автомат $QF1$: обмотка статора подключена к электросети;
3. Плавно увеличить автотрансформатором напряжение на обмотке статора двигателя до такого пониженного значения U_k (примерно 125 В) при котором линейный ток короткого замыкания I_k составит примерно $1,3 \cdot I_{1H} \approx 5$ А (амперметры $PA1$, $PA2$, $PA3$);
4. Уменьшать ток с шагом примерно 0,5—1 А и записывать в табл. 10.3 показания приборов при каждом дискретном значении тока (одно из измерений произвести при токе $I_k = I_{1H} = 3,9$ А). Измерения производить до тех пор, пока возможно фиксировать величину пониженного напряжения $U_k \approx 30$ В.

Асинхронный двигатель отключить от электросети

По данным опыта построить характеристики короткого замыкания I_k , P_k , $\cos \varphi_k = f(U_k)$.

Таблица 10.3. – Измерение и расчет характеристик короткого замыкания

Измерение							Расчет		
U_k	I_{Uk}	I_{Vk}	I_{Wk}	P_{Uk}	P_{Vk}	P_{Wk}	I_k	P_k	$\cos \varphi_k$
В	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	А	Вт	–

Расчетные величины определять в следующем порядке.

1) Ток короткого замыкания I_k (линейное/фазное значение) по формуле

$$I_k = I_{лк} = I_{фк} = K_{ам} \cdot (I_{Ux} + I_{Vx} + I_{Wx})/3, \text{ А}; \quad (10.76)$$

2) Потери короткого замыкания и коэффициент мощности по формулам:

$$P_k = K_{вт} \cdot (P_{Ux} + P_{Vx} + P_{Wx}), \text{ Вт}; \quad (10.77)$$

$$\cos \varphi_k = P_k / \sqrt{3} U_k I_k. \quad (10.78)$$

Результаты расчетов, полученные в пп. 1), 2), записать в табл. 10.3.

4.5. Опыт нагрузки. Рабочие характеристики

В процессе опыта поддерживать автотрансформатором напряжение, подведенное к обмотке статора двигателя, неизменным и равным номинальному значению, $U_{1н} = 380 \text{ В}$. Измерение частоты вращения ротора n осуществлять бесконтактным цифровым тахометром.

Опыт нагрузки осуществить в следующей последовательности (см. разд. 3.12.1).

1. Устранить затормаживание ротора; соединить муфту, сопрягающую валы двигателя и генератора;
2. Запустить двигатель на холостой ход так, как указано в разд. 4.1, пп. 1–6;
3. Автоматом $QF2$ подключить обмотку возбуждения $LG1$ генератора постоянного тока к источнику постоянного тока (рис. 10.29) и реостатом RR_B установить ток в этой обмотке примерно равным 0,4 А (амперметр $PA4$);
4. Установить пакетные выключатели нагрузочного реостата $RR_{нг}$ (он включен в цепь обмотки якоря генератора) в положение «Включено»;

5. Реостатами $RR_{\text{нг}}$ и $RR_{\text{в}}$ отрегулировать электромагнитный момент генератора (это момент нагрузки на валу двигателя) так, чтобы двигатель потреблял из электросети ток, примерно равный $1,3 \cdot I_{1\text{н}} = 1,3 \cdot 3,9 \approx 5 \text{ А}$ (амперметры $PA1, PA2, PA3$);

6. Затем разгружая двигатель *вплоть до холостого хода*, уменьшать ток в обмотке статора двигателя с шагом примерно $0,5 \text{ А}$ и записывать в табл. 10.4, при каждом дискретном значении тока, показания измерительных приборов, включенных в цепь обмотки статора двигателя, а также показания амперметра $PA5$ (одно из измерений произвести при номинальном токе $I_{1\text{н}} = 3,9 \text{ А}$).

По данным опыта построить рабочие характеристики $I_1, P_1, M, \cos \varphi_1, \eta, s = f(P_2)$.

Таблица 10.4. Измерение и расчет рабочих характеристик

Измерение								Расчет						
I_U	I_V	I_W	P_U	P_V	P_W	I_a	n	s	I_1	P_1	M	P_2	η	$\cos \varphi_1$
дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	А	об/мин	–	А	Вт	Н·м	Вт	%	–

Расчетные величины определить в следующем порядке:

1) Скольжение ротора двигателя по формуле

$$s = (n_1 - n)/n_1, \tag{10.79}$$

где $n_1 = 60 \cdot f_1/p = 60 \cdot 50/2 = 1500 \text{ об/мин}$ – синхронная частота вращения первой гармоники магнитного поля;

2) Ток обмотки статора по формуле

$$I_1 = K_{\text{ам}} \cdot (I_U + I_V + I_W)/3; \tag{10.80}$$

3) Активная мощность, потребляемая двигателем из сети по формуле

$$P_1 = K_{\text{вТ}} \cdot (P_U + P_V + P_W); \quad (10.81)$$

4) По зависимости $M = f(I_a)$ (см. Прил., с. 179) определить значения момента нагрузки на валу двигателя для соответствующих значений тока якоря I_a генератора;

5) Полезная механическая мощность на валу двигателя:

$$P_2 = 0,1047 \cdot M \cdot n, \text{ Вт}; \quad (10.82)$$

6) Коэффициент полезного действия двигателя:

$$\eta = 100 \cdot P_2 / P_1, \%; \quad (10.83)$$

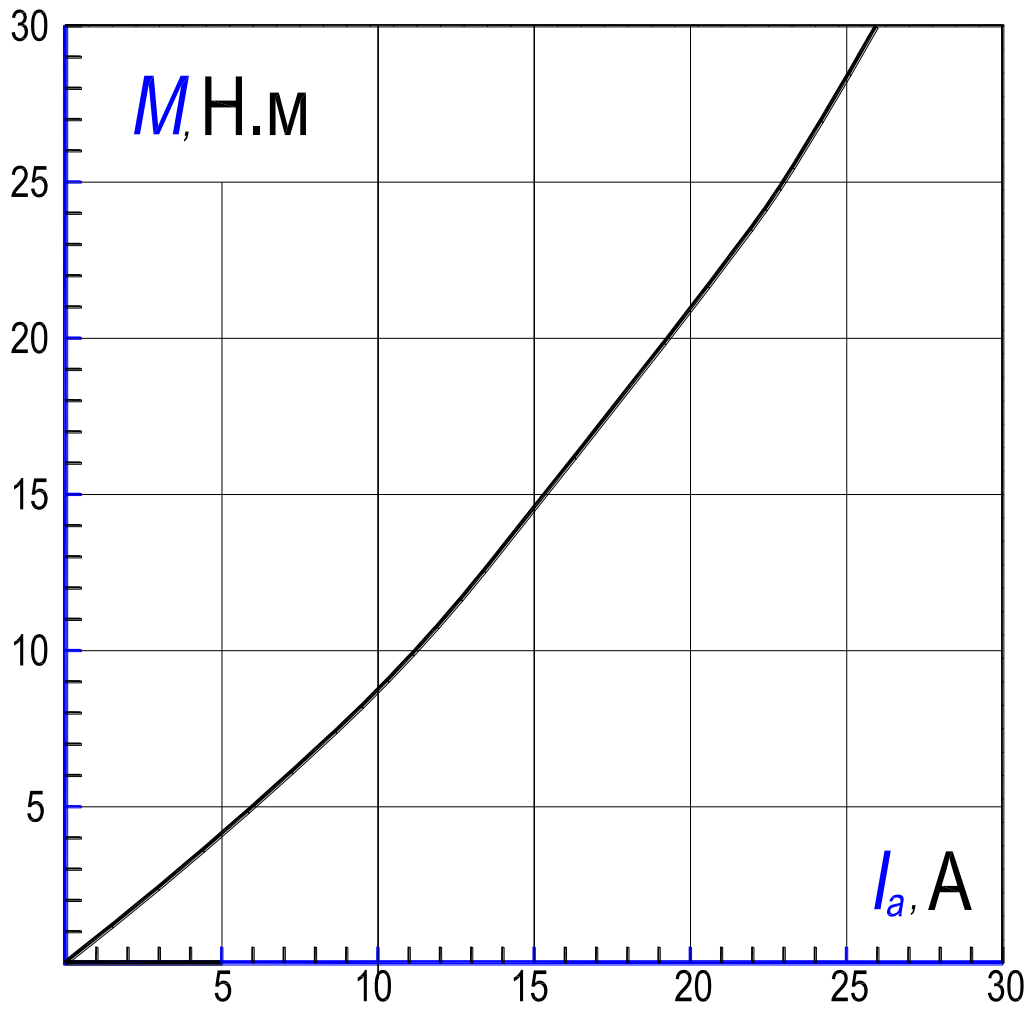
7) Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_1 = P_1 / \sqrt{3} U_{1\text{н}} I_1. \quad (10.84)$$

Приложение

График зависимости электромагнитного момента M
генератора постоянного тока от тока якоря I_a .

(M – момент нагрузки на валу двигателя)



5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы.
4. Номинальные данные асинхронного двигателя.
5. Номинальные данные генератора постоянного тока.
6. Схему испытаний.
7. Результаты опытов и расчетов, представленных в таблицах 10.2–10.4; ниже каждой таблицы приводятся формулы для расчета величин. Затем размещаются графические зависимости (пп. 8.1–8.4), соответствующие таблице.

8. Экспериментальные и расчетные графические зависимости:

- 8.1. $p_{\text{МГ}} + p_{\text{МХ}} = f(U_{\text{X}}^2)$ – график разделения потерь мощности;
- 8.2. $I_{\text{X}}, P_{\text{X}}, \cos \varphi_{\text{X}} = f(U_{\text{X}})$ – характеристики холостого хода;
- 8.3. $I_{\text{K}}, P_{\text{K}}, \cos \varphi_{\text{K}} = f(U_{\text{K}})$ – характеристики короткого замыкания;
- 8.4. $I_1, P_1, M, \cos \varphi_1, \eta, s = f(P_2)$ – рабочие характеристики;

Текст отчета оформить в текстовом процессоре *MS Word* (шрифт *Times New Roman*, 12 пт.). Графики строить в интерактивном графическом пакете *Grapher*. Схему опыта вычертить в интерактивном графическом пакете *AutoCAD*. Отчет подшить в простую папку-скоросшиватель. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

6. Контрольные вопросы

1. Перечислить условия создания вращающегося магнитного поля трехфазной распределенной обмоткой.
2. Устройство асинхронного двигателя с беличьей клеткой.
3. Объяснить принцип действия асинхронного двигателя.
4. Перечислить и объяснить способы пуска двигателя с беличьей клеткой.
5. Перечислить и объяснить способы регулирования скорости двигателя с беличьей клеткой.
6. Нарисовать и объяснить энергетическую диаграмму двигателя.
7. Изобразить и объяснить форму механической $n = f(M)$ и скоростной $n = f(I_1)$ характеристик двигателя.

8. Изобразить Г-образную схему замещения двигателя и объяснить физический смысл всех ее параметров.

9. Как изменить направление вращения ротора двигателя?

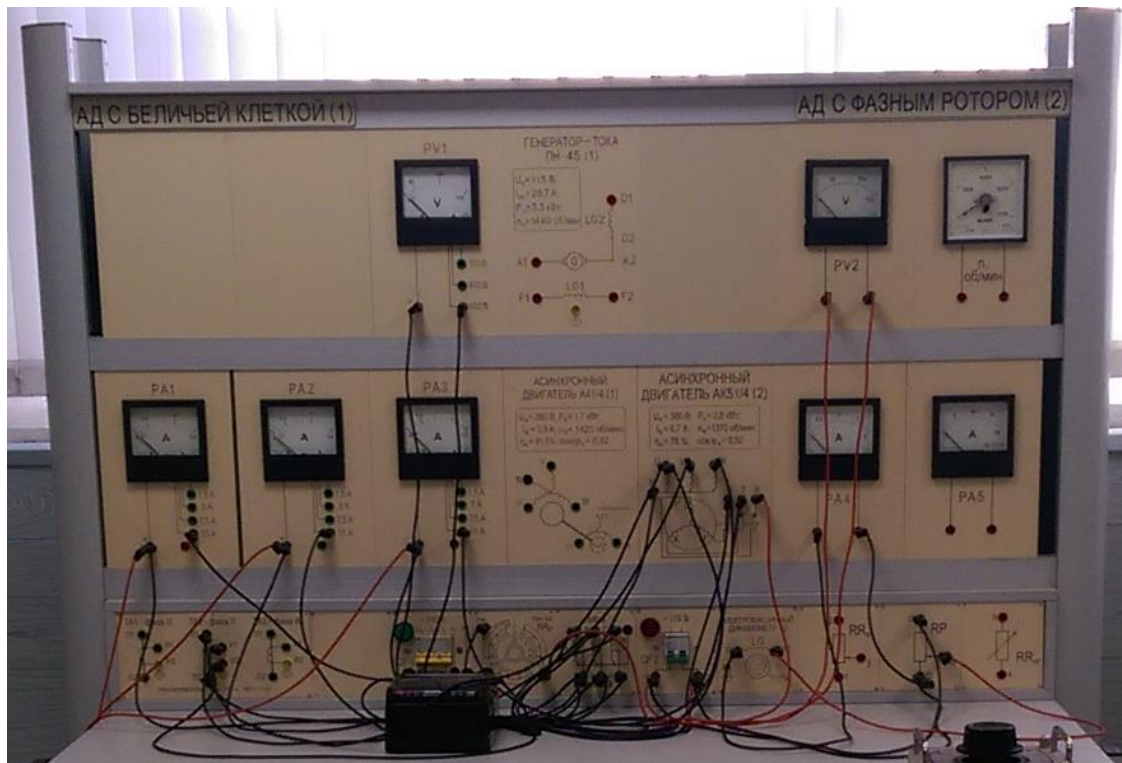


Рисунок 10.30. – Фотография приборной панели лабораторного стенда для исследования трехфазного асинхронного двигателя с беличьей клеткой

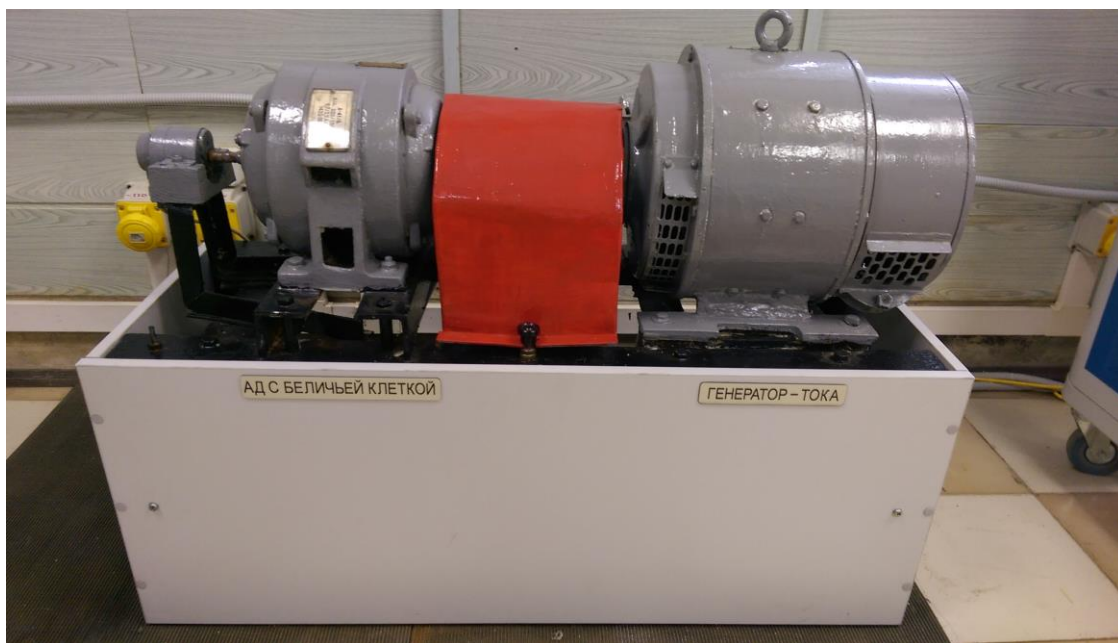


Рисунок 10.31. – Фотография исследуемого агрегата «Трехфазный асинхронный двигатель с беличьей клеткой – генератор постоянного тока» (номинальные данные – см. рис. 10.29)

11. РАБОТА № 2

ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

Оглавление

1. Цель работы	184
2. Программа работы	184
3. Основы теории	185
3.1. Пуск двигателя с фазным ротором	185
3.2. Регулирование скорости двигателя с фазным ротором	190
3.2.1. Регулирование частоты вращения с помощью реостата в цепи ротора.....	190
3.2.2. Регулирование частоты вращения двигателя введением добавочной ЭДС во вторичную цепь двигателя	191
4. Экспериментальное исследование	193
4.1. Определение коэффициента трансформации	193
4.2. Пуск двигателя	194
4.3. Изменение диапазона измерений амперметров $PA1$, $PA2$, $PA3$ при работающем двигателе	195
4.4. Опыт холостого хода	196
4.5. Опыт короткого замыкания	199
4.6. Опыт нагрузки. Рабочие характеристики	200
4.7. Пуск двигателя при несимметрии цепи обмотки ротора	202
4.8. Построение круговой диаграммы по данным опытов холостого хода и короткого замыкания	203
4.8.1. Перечень необходимых данных для построения	203
4.8.2. Последовательность построения упрощенной диаграммы	204
4.8.3. Определение по круговой диаграмме номинальной точки, мощностей и потерь мощности двигателя	207
4.8.4. Определение по круговой диаграмме значений коэффициента мощности, коэффициента полезного действия и скольжения...	208
4.8.5. Определение по круговой диаграмме максимального электромагнитного момента, характеристик $s = f(M_{эм})$, $s = f(I_1)$ и кратностей пускового момента и пускового тока	209
4.8.6. Оценка точности построения круговой диаграммы	212

5. Содержание и оформление отчета	213
6. Контрольные вопросы	213
Приложение 1. Электромашинный динамометр	215
Приложение 2.	
П2.1. Работа трехфазных асинхронных двигателей при ненормальных условиях	217
П2.1.1. Изменение частоты	217
П2.1.2. Изменение напряжения	218
П2.1.3. Переключение обмоток слабо нагруженных асинхронных двигателей с треугольника на звезду ...	218
П2.2. Несимметричные режимы работы асинхронных двигателей .	219
П2.2.1. Работа асинхронного двигателя при несимметрии приложенных напряжений	221
П2.2.2. Влияние несимметрии цепи ротора на работу асинхронной машины	223
Рис. 11.1. Схема пуска асинхронного двигателя с помощью трехступенчатого пускового реостата	187
Рис. 11.2. Последовательные изменения вращающего момента (<i>a</i>) и тока ротора (<i>b</i>) при реостатном пуске асинхронного двигателя	189
Рис. 11.3. Схема лабораторной установки для исследования АД с фазным ротором.....	194
Рис. 11.4. Изменение диапазона измерений амперметров <i>PA1</i> , <i>PA2</i> , <i>PA3</i> при работающем двигателе	196
Рис. 11.5. Упрощенная круговая диаграмма асинхронной машины	205
Рис. 11.6. Фотография приборной панели лабораторного стенда для исследования трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором	214
Рис. 11.7. Фотография исследуемого агрегата «Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором – электромашинный динамометр»	214
Рис. П1.1. Электромашинный динамометр	215
Рис. П2.1. Рабочие характеристики асинхронного двигателя при соединениях обмотки статора в треугольник («Δ») и в звезду («Y») и при напряжении сети, равном номинальному фазному напряжению двигателя	219
Рис. П2.2. Моменты прямой (M_1) и обратной (M_2) последовательности и результирующий момент (M) асинхронной машины в функции скольжения .	222
Рис. П2.3. Кривые вращающих моментов при несимметрии фаз роторной цепи	225
Рис. П2.4. Зависимость вращающего момента M от скольжения трехфазного асинхронного двигателя с однофазным ротором	226

1. Цель работы

Ознакомиться с устройством асинхронного двигателя с фазным ротором, уяснить принцип действия, пуск и реверсирование. Овладеть техникой и методикой снятия характеристик, освоить построение круговой диаграммы асинхронного двигателя по экспериментальным данным и определение по ней основных величин, характеризующих работу двигателя.

2. Программа работы

2.1. Определить коэффициент трансформации двигателя.

2.2. Осуществить пуск асинхронного двигателя.

2.3. Провести опыт холостого хода и построить зависимости $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_x)$. Произвести разделение потерь мощности холостого хода P_x на электрические потери в обмотке статора $p_{э1}$, магнитные потери $p_{мг}$ в магнитопроводе и механические $p_{мх}$.

2.4. Провести опыт короткого замыкания и построить зависимости $I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_k)$.

2.5. Провести опыт нагрузки двигателя и построить рабочие характеристики $I_1, P_1, M, \cos \varphi_1, \eta, s = f(P_2)$, где P_2 – механическая вторичная мощность на валу двигателя [термин 21].

2.6. Осуществить пуск двигателя при несимметрии цепи обмотки ротора.

2.7. По данным опытов (п.п. 2.3 и 2.4) построить круговую диаграмму и пользуясь ею определить значения величин, характеризующих работу асинхронного двигателя (см. разд. 4.8.3, 4.8.4, 4.8.5). По круговой диаграмме определить и построить зависимости: $s, n/n_1 = f(M_{эм})$; $s, n/n_1 = f(I_1)$, где $n/n_1 = 1 - s$.

3. Основы теории

Устройство двигателя с фазным ротором рассмотрено в разд. 8.1 (с. 36, сл.). Вопросы теории асинхронного двигателя изложены в разд. 3 описания Л. Р. №1 (с. 100, сл.). Описание устройства электромашинного динамометра, предназначенного для измерения момента асинхронного двигателя, приведено в Прил. 1 (с. 215, сл.).

Далее приводится описание процессов пуска и регулирования скорости двигателя с фазным ротором; его трехфазная обмотка выведена на три контактных кольца, на которые наложены неподвижные щетки.

3.1. Пуск двигателя с фазным ротором

Двигатели с фазным ротором применяются значительно реже двигателей с короткозамкнутым ротором (имеющими на роторе обмотку типа беличья клетка). Они используются в случае, если статический момент сопротивления на валу при пуске $M_{ст}$ велик и поэтому асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором с пуском при пониженном напряжении неприемлем, а прямой пуск такого двигателя недопустим по условиям воздействия больших пусковых токов на сеть и др.

При пуске асинхронного двигателя стремятся улучшить его пусковые характеристики, а именно: уменьшить начальный пусковой ток двигателя и увеличить начальный пусковой момент, которые имеют место при скольжении ротора $s = 1$ и, соответственно, скорости $n = 0$.

В разд. 3.8.2. (см. Л. Р. №1, с. 126, сл.) при рассмотрении максимального момента, найдены выражения для скольжения s_M , называемого критическим (10.50), и соответствующего ему выражения для максимального момента M_M (10.51).

Для асинхронных двигателей общепромышленного применения слагаемые с R_1 в выражениях (10.50) и (10.51) малы по сравнению с остальными. Принимая $R_1 = 0$, получим

$$s_M \approx \sigma R_2' / (X_1 + \sigma X_2'); \quad (11.1)$$

$$M_M \approx (pt_1 U_1^2) / 2\pi f_1 \sigma (X_1 + \sigma X_2'). \quad (11.2)$$

Существенным является тот факт, что, хотя максимальный момент M_M не зависит от активного сопротивления роторной цепи R_2' , но значение критического скольжения s_M , которому соответствует момент M_M , изменя-

ется пропорционально этому сопротивлению [см. выражения (11.1) и (11.2)]. Этот факт принят во внимание при осуществлении пуска двигателя с фазным ротором.

Таким образом, при изменении вторичного активного сопротивления изменяется лишь скольжение s_M при котором момент имеет максимальное значение M_M , а величина этого момента остается неизменной. Отсюда следует, что, если ввести в цепь обмотки ротора такое добавочное сопротивление R_d , при котором

$$s_M \approx (\sigma R_2' + \sigma R_d') / (X_1 + \sigma X_2') = 1, \quad (11.3)$$

то тогда пусковой момент достигнет своего максимального значения, $M_{II} = M_M$ (рис. 11.2,а). Кратность пускового момента будет равна отношению $k_{II} = k_M = M_M / M_H$.

Одновременно с повышением пускового момента происходит снижение величины пускового тока от величины I_{II} до величины I_1 в связи с увеличением активного сопротивления цепи обмотки ротора на величину R_d (рис. 11.2,б).

Включение добавочного сопротивления выполнимо в случае асинхронного двигателя с контактными кольцами, к которым подведены начала фаз трехфазной обмотки ротора. Оно присоединяется к неподвижным щеткам, наложенным на кольца (рис. 11.1).

Пуск в ход асинхронного двигателя с контактными кольцами на холостой ход (без механической нагрузки на валу) осуществляется в такой последовательности: 1) подвижные контакты (они соединены звездой, на рис. 11.1 заштрихованы) добавочного сопротивления в цепи ротора R_d в виде пускового реостата находятся в положении «Пуск АД» (цепь обмотки ротора разомкнута); 2) обмотка статора присоединяется к сети на номинальное напряжение U_{1H} (ротор неподвижен, $n = 0$); 3) подвижные контакты переводятся в направлении по часовой стрелке на неподвижные контакты 3 (в цепь обмотки ротора включены все три ступени пускового реостата), ротор начинает вращаться; 4) постепенно переводят подвижные контакты на неподвижный контакт 0 («Ход АД»), все ступени пускового реостата выведены и обмотка ротора замкнута накоротко, ротор вращается в режиме холостого хода с максимальной скоростью $n = n_x$. В процессе пуска поочередно осуществляется переход с одной регулировочной ступени на другую либо вручную или автоматически.

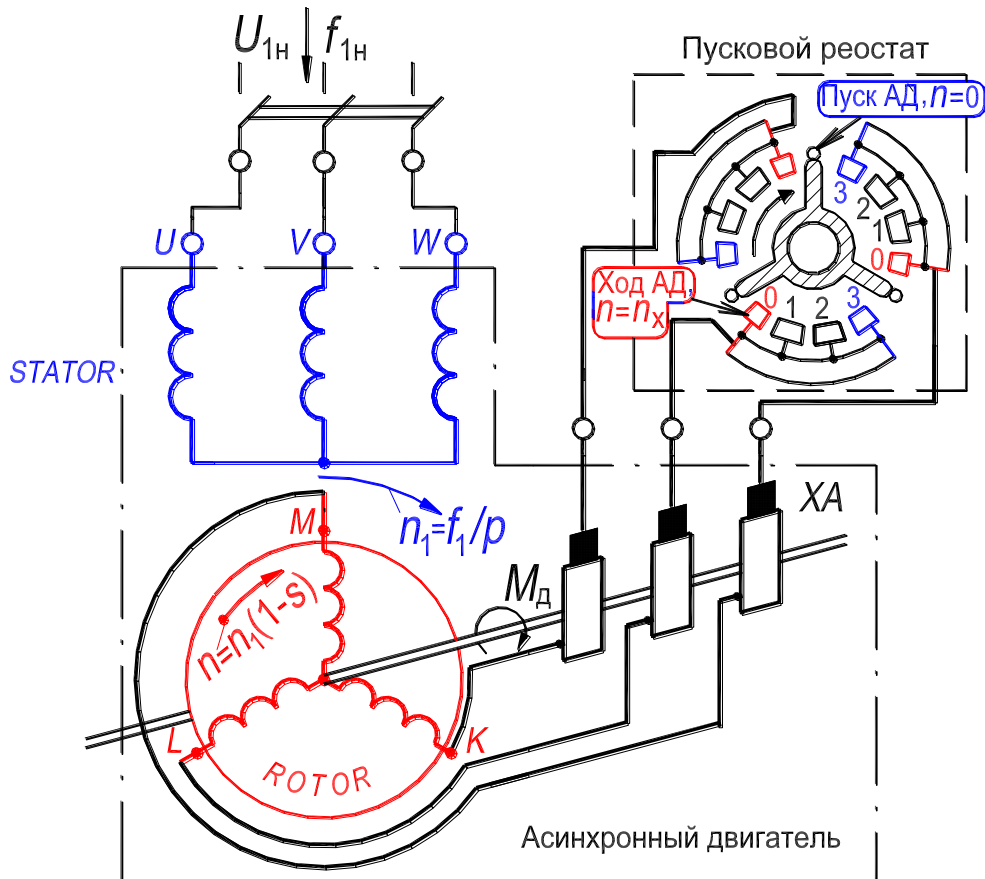


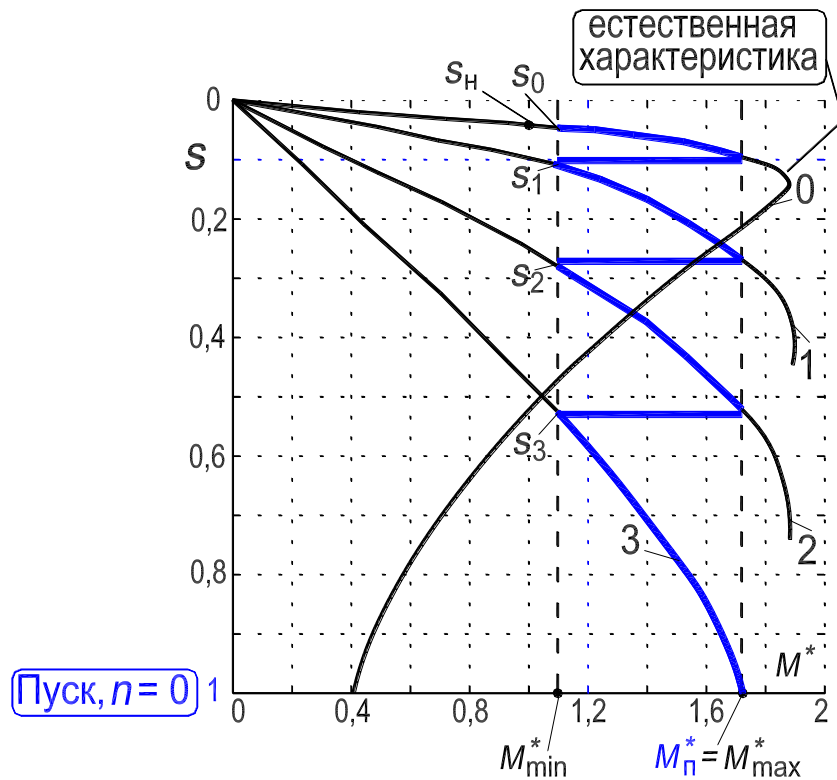
Рисунок 11.1. – Схема пуска асинхронного двигателя с помощью трехступенчатого пускового реостата

Характеристики вращающего момента двигателя $M = f(s)$ и вторичного тока $I_2 = f(s)$ при работе на трех разных ступенях реостата изображены на рис. 11.2. Предположим, что сопротивления ступеней пускового реостата и интервалы времени переключения ступеней подобраны так, что момент двигателя M при пуске меняется в пределах от некоторого M_{\max} до некоторого M_{\min} и при включении в сеть $M_{\Pi} = M_{\max} > M_{\text{ст}}$ (кривая 3 на рис. 11.2,а; $M_{\text{ст}}$ – момент нагрузки). В начале пуска двигатель работает по характеристике 3, ротор приходит во вращение, скольжение s начинает уменьшаться, и при $s = s_3$, когда $M = M_{\min}$, производится переключение реостата на вторую ступень (**подвижный контакт находится на неподвижном контакте 2**, см. рис. 11.1). При этом двигатель будет работать по характеристике 2, и при дальнейшем разбеге двигателя скольжение уменьшится от $s = s_3$ до $s = s_2$, а момент – от значения $M = M_{\max}$ до $M = M_{\min}$. Затем производится переключение на первую ступень (**подвижный контакт находится на неподвижном контакте 1**). После выключения последней

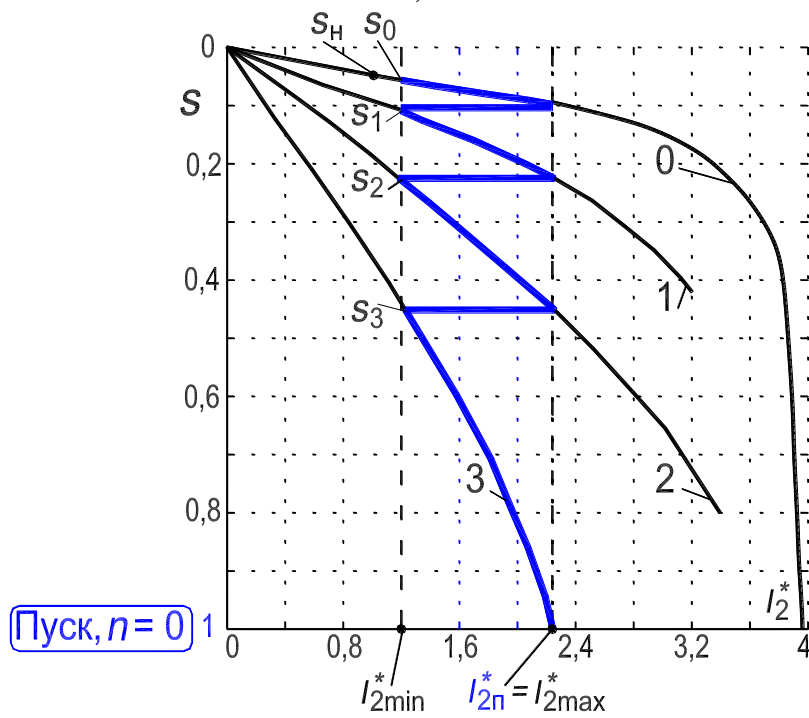
ступени реостата двигатель переходит на работу по *естественной* характеристике 0 и достигает установившейся скорости.

Аналогичные переходы происходят и на кривых тока ротора $I_2 = f(s)$ с характеристики 3-й на 2-ю, затем на 1-ю и далее на 0-ю, *естественную* (рис. 11.2,б). Ток обмотки ротора двигателя I_2 при пуске меняется от некоторого $I_{2\max}$ до некоторого $I_{2\min}$.

При наличии у двигателя короткозамыкающего механизма после окончания пуска щетки с помощью этого механизма поднимаются с контактных колец и кольца замыкаются накоротко, а реостат возвращается в положение «Пуск». Тем самым пусковая аппаратура приводится в готовность к следующему пуску. Однако дистанционное управление короткозамыкающим механизмом колец сложно осуществить; это затрудняет автоматическое управление двигателем. Поэтому фазные асинхронные двигатели строятся без таких механизмов. При этом щетки постоянно налегают на кольца, что несколько увеличивает потери двигателя и износ щеток. Число ступеней пускового реостата с целью упрощения схемы пуска и удешевления аппаратуры в автоматизированных установках выбирается небольшим (*обычно две или три ступени*).



a)



б)

Рисунок 11.2. – Последовательные изменения вращающего момента – (a) и тока ротора – (б) при реостатном пуске асинхронного двигателя:

момент и ток выражены в относительных единицах: $M^* = M/M_H$, $I_2^* = I_2/I_{2H}$

Пусковые характеристики асинхронного двигателя при реостатном пуске наиболее благоприятны, так как высокие значения моментов достигаются при невысоких значениях пусковых токов в обмотках статора и ротора.

3.2. Регулирование скорости двигателя с фазным ротором

Для двигателей с фазным ротором можно, в принципе, использовать те же способы регулирования частоты вращения, что и для короткозамкнутых двигателей (с обмоткой типа беличья клетка).

Однако на практике применяется иногда только способ регулирования частоты вращения с помощью реакторов насыщения (рис. 10.21, с. 153), которые по своему устройству аналогичны трансформаторам. На магнитопроводе управляемого электромагнитного реактора расположены две обмотки: обмотка переменного тока и обмотка постоянного тока. Индуктивное сопротивление обмотки переменного тока регулируется посредством подмагничивания постоянным током магнитопровода [12]. При изменении значения постоянного тока подмагничивания индуктивное сопротивление реактора изменяется, что приводит к изменению напряжения на зажимах двигателя и, соответственно, к изменению скорости.

Далее рассмотрим способы регулирования частоты вращения, которые специфичны для двигателей с фазным ротором и в которых используется возможность включения регулирующих устройств во вторичную цепь.

3.2.1. Регулирование частоты вращения с помощью реостата в цепи ротора

Регулирование производится по той же схеме, что и реостатный пуск двигателя с трехфазной обмоткой на роторе (рис. 11.1), но реостат при этом должен быть рассчитан на длительную работу. При увеличении активного сопротивления вторичной цепи вид механической характеристики двигателя изменяется (рис. 11.2,а); характеристика становится более мягкой и скольжение двигателя при том же моменте нагрузки $M_{ст}$ увеличивается, а скорость ротора соответственно уменьшается

При $M_{ст} = const$ рабочее скольжение s с большой точностью пропорционально s_M и, следовательно, активному сопротивлению цепи ротора R_2 . Поэтому скольжения s и s' , соответствующие случаям R_d равно нулю и R_d не равно нулю, находятся в соотношении

$$s'/s = (R_d + R_2)/R_2,$$

откуда значение R_d , необходимое для получения скольжения s' и, соответствующей ему скорости ротора $n' = n_1 \cdot (1 - s')$,

$$R_d = (s'/s - 1)/R_2. \quad (11.4)$$

Рассматриваемый способ регулирования частоты вращения связан со значительными потерями энергии в сопротивлении R_d и поэтому малоэкономичен. Он применяется главным образом при кратковременной или повторно кратковременной работе (например, пусконаладочные режимы некоторых машин, крановые устройства и пр.), а также в приводах с вентиляторным моментом. В последнем случае мощность на валу с уменьшением частоты вращения быстро снижается, и поэтому мощность скольжения и потери в цепи ротора ограничены.

К недостаткам реостатного регулирования частоты вращения относятся также мягкость механических характеристик и зависимость диапазона регулирования от нагрузки. В частности, регулирование частоты вращения на холостом ходу практически невозможно.

3.2.2. Регулирование частоты вращения двигателя введением добавочной ЭДС во вторичную цепь двигателя

Этот способ регулирования подробно в учебном пособии не рассматривается, отмечаются лишь его возможности [3]. Для регулирования скорости вращения асинхронного двигателя с фазным ротором в обмотку ротора через щетки и контактные кольца вводится внешняя добавочная ЭДС E_d . Частота этой добавочной ЭДС должна быть всегда равна частоте скольжения $f_{2s} = s \cdot f_1$ тока и ЭДС обмотки ротора двигателя.

Если добавочная ЭДС E_d вводится в фазе с ЭДС $E_{2s} = E_2 \cdot s$ обмотки ротора, то скорость ротора увеличится, а скольжение уменьшится.

Если добавочная ЭДС E_d вводится в противофазе с ЭДС $E_{2s} = E_2 \cdot s$ обмотки ротора, то скорость ротора уменьшится, а скольжение увеличится.

Таким образом, введением добавочной ЭДС в цепь ротора асинхронного двигателя можно регулировать его частоту вращения, как на понижение, так и на повышение.

Введением добавочной ЭДС, имеющей частоту скольжения f_{2s} , в цепь ротора асинхронного двигателя можно также регулировать коэффициент мощности $\cos \varphi_1$ двигателя.

Способ регулирования частоты вращения асинхронного двигателя с фазным ротором за счет ввода внешней добавочной ЭДС E_d частоты скольжения весьма экономичен и обеспечивает широкий диапазон регулирования. Трудности, которые при этом возникают, обусловлены главным образом способом получения регулируемого добавочного напряжения частоты скольжения. Такое напряжение, в частности, можно получить на базе коллекторного преобразователя частоты, что и было реализовано в двигателе Шраге–Рихтера.

Более подробно вопросы регулирования скорости вращения асинхронных двигателей рассматриваются в курсах электропривода.

4. Экспериментальное исследование

Исследование асинхронного двигателя с фазным ротором выполняется на лабораторной установке, состоящей из двигателя, электродвигательного динамометра и пускового реостата $RR_{п}$. На рис. 11.3 приведена схема опыта и номинальные данные исследуемого асинхронного двигателя типа АК51/4. Фотографии приборной панели лабораторного стенда и исследуемого агрегата приведены на рис. 11.6 и 11.7.

Момент нагрузки на валу электродвигателя создается динамометром и регулируется реостатом, включенным по схеме потенциометра RP в цепь обмотки возбуждения LG динамометра. Значение момента непосредственно считывается со шкалы динамометра, которая проградуирована в кгс·м. Для выражения момента в Н·м необходимо умножить показание, определенное по шкале динамометра, на коэффициент 9,80665, так как имеет место соотношение $1 \text{ кгс} = 9,80665 \text{ Н}$ (точно).

Значения омических сопротивлений фазы обмотки статора и ротора:

$$R_1 = 1,5 \text{ Ом}; R_2 = 0,15 \text{ Ом}.$$

4.1. Определение коэффициента трансформации

1. Отсоединить пусковой реостат $RR_{п}$ от выводов обмотки ротора (рис. 11.3, гнезда 6, 7 и 8): обмотка ротора разомкнута, ротор неподвижен. Установить верхнее значение диапазона измерения вольтметра PVI на 600 В, цена деления — 40 В/дел; выставить рукоятку на шкале автотрансформатора на 0,0 В;

2. Включить автомат $QF1$: обмотка статора подсоединена к трехфазной сети;

3. Установить автотрансформатором номинальное линейное напряжение $U_{1н} = 380 \text{ В}$;

4. Измерить напряжение на обмотке статора и на контактных кольцах ротора (гнезда 6 и 7).

За действительное значение коэффициента трансформации принимают отношение измеренных линейных напряжений статора и ротора, $K = U_{V-W}/U_{M-K}$.

Полученные результаты занести в табл. 11.1.

Таблица 11.1. – Определение коэффициента трансформации

Статор: U_{V-W} , В	Ротор: $U_{M-K} = U_{6-7}$, В	K
380		

4.2. Пуск двигателя

При холостом ходе двигателя обмотка статора подключена к напряжению электросети, а на валу отсутствует механическая нагрузка.

Пуск двигателя на холостой ход осуществить следующим образом.

1. Установить верхнее значение диапазона измерений амперметров $PA1$, $PA2$ и $PA3$ на 15 А, цена деления – 1 А/дел.

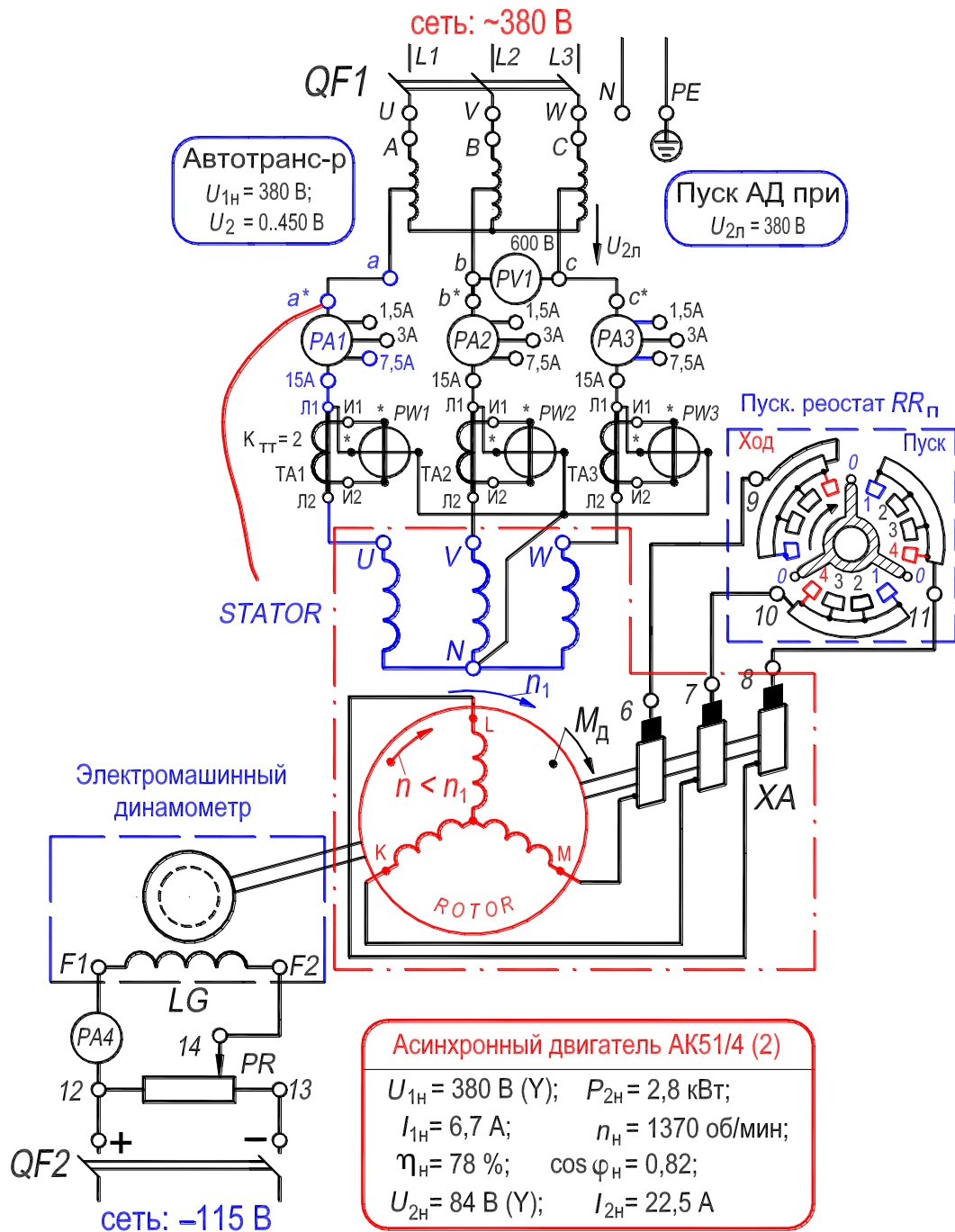


Рисунок 11.3. – Схема лабораторной установки для исследования асинхронного двигателя с фазным ротором

2. Установить пусковой реостат RR_{Π} в положение «Пуск АД» (**введен**);
3. Выставить *рукоятку на шкале* автотрансформатора на напряжение $U_1 = 380 \text{ В}$;
4. Включить автомат $QF1$: ротор двигателя неподвижен;
5. *Плавно и постепенно* перевести реостат RR_{Π} в положение «Ход АД» (**выведен**): *ротор вращается*. При установившемся значении токов и скорости *пуск завершен*.

При напряжении $U_{1н} = 380 \text{ В}$ измерить бесконтактным цифровым тахометром установившуюся частоту вращения ротора n_x . Показание записать [отражающая метка находится на периферии ротора (**диска**) динамометра].

Осуществить реверс двигателя в следующей последовательности.

1. Отключить автоматом $QF1$ двигатель от электросети;
2. Изменить чередование фаз обмотки статора (поменять местами проводники на началах фаз обмотки статора U и V);
3. В соответствии с указанной выше последовательностью осуществить пуск еще раз.

Двигатель от электросети не отключать

4.3. Изменение диапазона измерений амперметров $PA1$, $PA2$, $PA3$ при работающем двигателе

В таблице приведены значения диапазонов измерения и цены деления амперметров $PA1$, $PA2$ и $PA3$ (см. обозначения этих амперметров рис. 11.3).

Диапазон измерений, А	15	7,5	3	1,5
Цена деления $K_{ам}$, А/дел	1	0,5	0,2	0,1

- 1) На рис. 11.4,б из синего гнезда « **a^*** » выходят два проводника:
 - 1-й, **черный**, он соединяет на рис. 11.3 гнезда « **a^*** » и « **a** »;
 - 2-й, **красный**, он в опытах «висит» из гнезда « **a^*** » (см. рис. 11.3);
- 2) На рис. 11.4,б из гнезда «15 А» выходит один проводник: он соединяет на рис. 11.3 гнезда «15 А» и «Л1»; именно *этот проводник необходимо переставить* из гнезда «15 А» в гнездо «7,5 А» (или другое: «3 А», «1,5 А») *не разрывая цепь с током*;
- 3) Последовательность перехода:
 - а) «*висящий*» конец красного проводника (рис. 11.3) вставить в гнездо

«U» (это начало фазы U двигателя): амперметр $PA1$ зашунтирован, стрелка прибора находится на нуле;

б) вынуть проводник из гнезда «15 А» и вставить в гнездо «7,5 А» [рис. 11.3 и 11.4, б, в];

в) вынуть конец красного проводника из гнезда «U» и оставить его «висящим».

На этом процесс перехода на диапазон измерений токов 7.5 А завершен.

Аналогично совершается переход на диапазон измерений токов 7.5 А в фазах V и W .

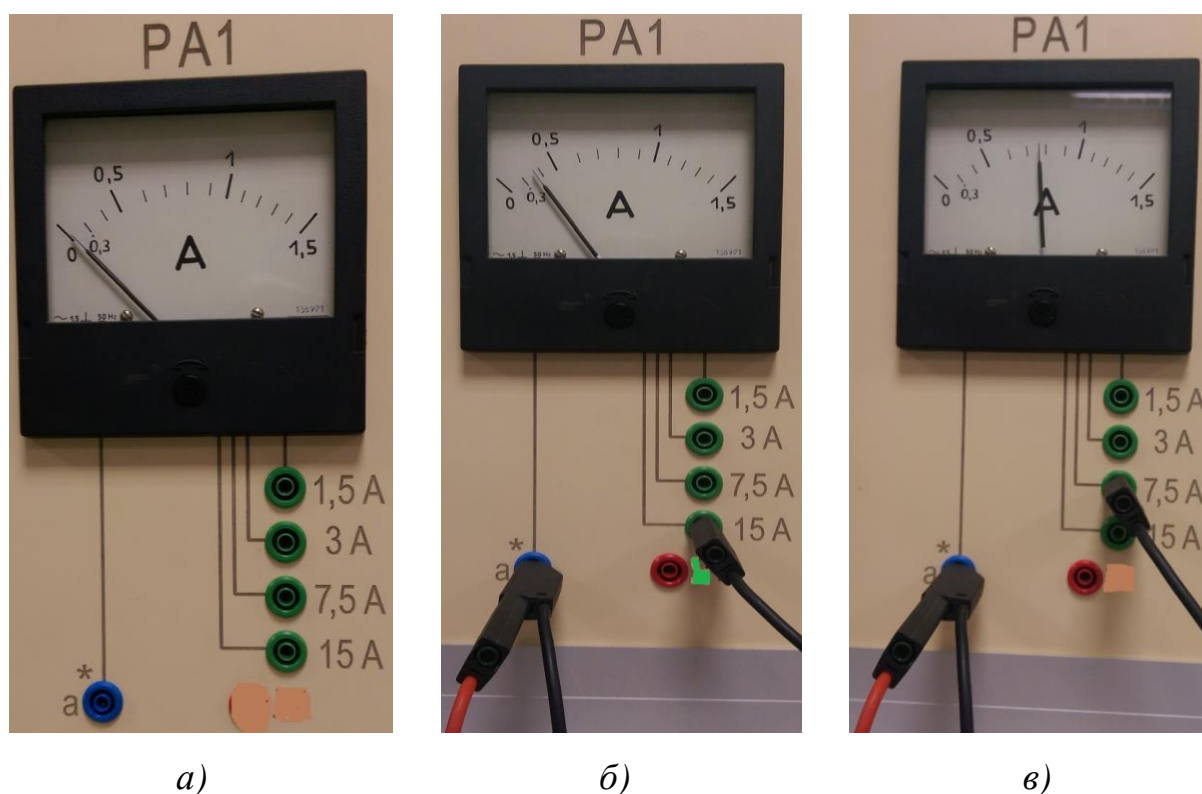


Рисунок 11.4 – К иллюстрации перехода с диапазона измерений токов «15 А» на диапазон измерений токов «7.5 А» (на примере амперметра $PA1$ в фазе U обмотки статора)

4.4. Опыт холостого хода

В опыте холостого хода измеряют величины: подведенное линейное напряжение (вольтметр $PV1$, установить верхнее значение диапазона измерений на 600 В, цена деления – 40 В/дел), линейные токи статора (амперметры $PA1$, $PA2$, $PA3$) и активную мощность (ваттметры $PW1$, $PW2$, $PW3$ включены через трансформаторы тока $TA1$, $TA2$ и $TA3$, их коэффициент трансформации $K_{\text{ТТ}} = 2$). Установить верхнее значение диапазона измере-

ний ваттметров по напряжению на 300 В, по току – 5 А, цена деления – $K_{\text{ВТ}} = 10 \text{ Вт/дел}$ (см. разд. 3.12.2, с. 157, сл.).

В процессе всех опытов записывать значения коэффициентов: $K_{\text{ам}}$ – цена деления амперметров $PA1, PA2, PA3$; $K_{\text{ВТ}}$ – цена деления ваттметров $PW1, PW2, PW3$; $K_{\text{ТТ}} = 2$ – коэффициент трансформации трансформаторов тока $TA1, TA2, TA3$.

Опыт холостого хода осуществить в следующей последовательности.

1. Установить верхнее значение диапазона измерений амперметров $PA1, PA2, PA3$ на 7,5 А (цена деления – 0,5 А/дел; последовательность перехода на другой диапазон – см. разд. 4.3 и рис. 11.4).

2. Установить автотрансформатором линейное напряжение на зажимах обмотки статора равным $U_x = 1,15U_{1\text{н}} \approx 420 \div 440 \text{ В}$ (вольтметр PVI), затем уменьшать до величины 160 В с шагом $\Delta U = 20 \div 40 \text{ В}$;

3. Записывать в табл. 11.2 показания приборов при каждом дискретном значении напряжения (одно из измерений произвести при $U_{1\text{н}} = 380 \text{ В}$). При последнем, меньшем, значении напряжения, измерить и записать частоту вращения ротора n_x .

Выставить реостат $RR_{\text{П}}$ в положение «Пуск АД» и отключить двигатель от электросети.

По данным опыта построить характеристики холостого хода $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_x)$ и зависимость $p_{\text{МГ}} + p_{\text{МХ}} = f(U_x^2)$ [см. ниже разд. 3), пп. а), б), в)].

Таблица 11.2. – Измерение и расчет характеристик холостого хода

Измерение							Расчет								
U_x	I_{U_x}	I_{V_x}	I_{W_x}	P_{U_x}	P_{V_x}	P_{W_x}	I_x	P_x	$\cos \varphi_x$	$p_{\text{эл}}$	U_x^2	$p_{\text{МГ}} + p_{\text{МХ}}$	$p_{\text{МГ}}$	$p_{\text{МХ}}$	
В	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	А	Вт	–	Вт	В ²	Вт	Вт	Вт	

Расчетные величины определить в следующем порядке:

1) Ток холостого хода I_x по формуле

$$I_x = I_{лх} = I_{фх} = K_{ам} \cdot (I_{Ux} + I_{Vx} + I_{Wx})/3, \text{ А.} \quad (11.5)$$

2) Потери холостого хода и коэффициент мощности по формулам:

$$P_x = K_{вт} \cdot K_{тт} \cdot (P_{Ux} + P_{Vx} + P_{Wx}) = K_{вт} \cdot 2 \cdot (P_{Ux} + P_{Vx} + P_{Wx}), \quad (11.6)$$

$$\cos \varphi_x = P_x / \sqrt{3} U_x I_x. \quad (11.7)$$

3) Разделение потерь холостого хода P_x (определение магнитных $p_{мг}$ и механических $p_{мх}$ потерь) произвести следующим образом:

а) Определить электрические потери в обмотке статора:

$$p_{э1} = 3 \cdot I_x^2 R_{1(75^\circ)}, \quad (11.8)$$

где $R_{1(75^\circ)}$ – сопротивление фазы обмотки статора, приведенное к расчетной рабочей температуре двигателя, составляющей 75°C .

$$R_{1(75^\circ)} = R_{1(t)} (235^\circ + 75^\circ) / (235^\circ + t), \quad (11.9)$$

где t – температура окружающей среды, при которой производится измерение сопротивления $R_{1(t)}$. Величина сопротивления $R_{1(t)}$ приводится в паспорте двигателя ($R_{1(t)} = 1,5 \text{ Ом}$), а значение температуры t можно приближенно принять равным 20°C .

б) Определить сумму магнитных и механических потерь:

$$p_{мг} + p_{мх} = P_x - p_{э1}.$$

в) Построить зависимость $p_{мг} + p_{мх} = f(U_x^2)$, которая должна представлять собой прямую линию. Провести между опытными точками указанной зависимости прямую линию до пересечения с осью ординат. Значение механических потерь равно отрезку, отсекаемому этой прямой на оси ординат. Все ординаты выше горизонтальной линии механических потерь [разность $(p_{мг} + p_{мх}) - p_{мх}$], соответствуют магнитным потерям (в стали).

Результаты расчетов, полученные в пп. 1), 2), 3), записать в табл. 11.2.

Для построения круговой диаграммы использовать значения $I_{фх}$, P_x , $p_{мг}$ и $p_{мх}$, соответствующие номинальному линейному напряжению $U_x = U_{1н} = 380 \text{ В}$ (номинальное фазное напряжение $U_{фх} = U_{1н} / \sqrt{3} = 220 \text{ В}$).

4.5. Опыт короткого замыкания

Установить диапазон измерений амперметров на 7,5 А (*цена деления* – 0,5 А/дел; последовательность перехода на другой диапазон – см. рис. 11.4). Отсоединить пусковой реостат RR_{Π} и замкнуть обмотку ротора двигателя на контактных кольцах (рис. 11.3, гнезда 6, 7 и 8;). Ротор затормозить: в отверстие в диске (роторе) динамометра вставить шпильку. К обмотке статора подводить *пониженное* напряжение $U_{\text{к}} \leq 100 \text{ В}$, при котором токи в обмотке не превышают значение $1,1 \cdot I_{\text{н}} = 1,1 \cdot 6,7 \approx 7,5 \text{ А}$ (см. разд. 3.12.2, с. 157, сл.).

В процессе опыта измеряют величины: подведенное линейное напряжение (вольтметр $PV1$, установить верхнее значение диапазона измерений на 150 В, *цена деления* – 10 В/дел); ток статора (амперметры $PA1$, $PA2$, $PA3$); активная мощность (ваттметры $PW1$, $PW2$, $PW3$ включены через трансформаторы тока $TA1$, $TA2$, $TA3$, их трансформации $K_{\text{тт}} = 2$). Установить верхнее значение диапазона измерений ваттметра по напряжению на 150 В, по току на 5 А; *цена деления* – 5 Вт/дел.

При значении тока обмотки статора менее 3 А, целесообразно установить верхнее значение диапазона измерений амперметров $PA1$, $PA2$, $PA3$ на 3 А (*цена деления* – 0,2 А/дел; последовательность перехода на другой диапазон – см. разд. 4.3 и рис. 11.4).

Опыт короткого замыкания осуществить в следующей последовательности.

1. Установить *рукоятку на шкале* автотрансформатора на напряжение 0,0 В;
2. Включить автомат $QF1$: обмотка статора подключена к электросети;
3. *Плавно* увеличить автотрансформатором напряжение на обмотке статора двигателя до такого *пониженного* значения (примерно 100 В) при котором линейный (фазный) ток короткого замыкания $I_{\text{к}}$ составит примерно $1,1 \cdot I_{\text{н}} \approx 7,5 \text{ А}$;
4. Уменьшать ток с шагом *примерно* 1–1,5 А и записывать в табл. 11.3 показания приборов при каждом дискретном значении тока (одно из измерений произвести при токе $I_{\text{к}} = I_{\text{н}} = 6,7 \text{ А}$). Измерения производить до тех пор, пока возможно фиксировать величину напряжения: $U_1 = U_{\text{к}} = 30 \text{ В}$.

После выполнения опыта *двигатель отключить от электросети.*

По данным опыта построить характеристики короткого замыкания $I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_k)$.

Таблица 11.3. – Измерение и расчет характеристик короткого замыкания

Измерение							Расчет		
U_k	I_{Uk}	I_{Vk}	I_{Wk}	P_{Uk}	P_{Vk}	P_{Wk}	I_k	P_k	$\cos \varphi_k$
В	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	А	Вт	–

Расчетные величины определить в следующем порядке:

1) Ток короткого замыкания I_k по формуле

$$I_k = I_{лк} = I_{фк} = K_{ам} \cdot (I_{Uk} + I_{Vk} + I_{Wk})/3, \text{ А.} \quad (11.10)$$

Потери короткого замыкания и коэффициент мощности по формулам

$$P_k = K_{вт} \cdot K_{тт} \cdot (P_{Uk} + P_{Vk} + P_{Wk}) = K_{вт} \cdot 2 \cdot (P_{Uk} + P_{Vk} + P_{Wk}), \text{ Вт,} \quad (11.10)$$

$$\cos \varphi_k = P_k / \sqrt{3} U_k I_k. \quad (11.11)$$

Для построения круговой диаграммы фазный (линейный) ток короткого замыкания $I_{кн}$ и потери короткого замыкания $P_{кн}$, соответствующие номинальному линейному напряжению обмотки статора $U_{1н} = 380 \text{ В}$, рассчитать по формулам:

$$I_{кн} = I_k(U_{1н}/U_k) = I_k(380/U_k), \quad (11.12)$$

где $I_k = 6,7 \text{ А}$ – фазный (линейный) ток короткого замыкания, равный номинальному значению; U_k – измеренное линейное напряжение короткого замыкания, соответствующее току $I_k = 6,7 \text{ А}$;

$$P_{кн} = P_k(I_{кн}/I_k)^2 = P_k(I_{кн}/6,7)^2, \quad (11.13)$$

где P_k – потери короткого замыкания при токе $I_k = 6,7 \text{ А}$.

4.6. Опыт нагрузки. Рабочие характеристики

В процессе опыта поддерживать автотрансформатором напряжение неизменным и равным номинальному значению, $U_{1н} = 380 \text{ В}$. Измерение частоты вращения n ротора осуществлять бесконтактным цифровым тахо-

метром, отражающая метка находится на периферии ротора (диска) динамометра (см. разд. 3.12.1, с. 155, сл.).

Опыт нагрузки осуществить в следующей последовательности.

1. Включить в цепь ротора пусковой реостат RR_{II} (рис. 11.3, гнезда 6, 7 и 8; положение «Пуск АД»), устранить затормаживание ротора и установить на вольтметре PVI верхнее значение диапазона измерений на 600 В, цена деления – 40 В/дел;

2. Осуществить пуск двигателя на холостой ход так, как указано в разд. 4.2, пп. 1–5; Установить верхнее значение диапазона измерений амперметров на 7,5 А (цена деления – 0,5 А/дел; последовательность перехода на другой диапазон – см. разд. 4.3 и рис. 11.4);

3. Установить движок потенциометра RP в цепи обмотки LG динамометра в *нижнее положение*. Включить автомат $QF2$: обмотка LG подключена к источнику постоянного тока;

4. Потенциометром RP отрегулировать момент динамометра так, чтобы ток в обмотке статора принял значение $1,1 \cdot I_{1H} \approx 7,5$ А (движок потенциометра в верхнем положении);

5. Разгружая двигатель *вплоть до холостого хода*, уменьшать ток в обмотке статора с шагом примерно 1–1,5 А и записывать в табл. 11.4 показания приборов при каждом дискретном значении тока (произвести одно из измерений при токе $I_{1H} = 6,7$ А).

По данным опыта построить рабочие характеристики двигателя $I_1, P_1, M, \cos \varphi_1, \eta, s = f(P_2)$.

Таблица 11.4. – Измерение и расчет рабочих характеристик

Измерение								Расчет						
I_U	I_V	I_W	P_U	P_V	P_W	M	n	s	I_1	P_1	M	P_2	η	$\cos \varphi_1$
дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	дел.	кгс·м	об/мин	–	А	Вт	Н·м	Вт	%	–

После выполнения опыта выключить автоматы $QF1$ и $QF2$: двигатель и динамометр отключены. Установить реостат RR_{II} в положение «Пуск АД» (введен); Перевести движок потенциометра RP в *нижнее* положение.

Расчетные величины (см. табл. 11.4) *определить в следующем порядке.*

1) Скольжение ротора двигателя по формуле

$$s = (n_1 - n)/n_1, \quad (11.14)$$

где $n_1 = 60f_1/p = 60 \cdot 50/2 = 1500$ об/мин – синхронная частота вращения первой гармоники магнитного поля;

2) Ток обмотки статора по формуле $I_1 = K_{ам} \cdot (I_U + I_V + I_W)/3$; (11.15)

3) Активная мощность, потребляемая двигателем из сети, по формуле

$$P_1 = K_{вт} \cdot K_{тт} \cdot (P_U + P_V + P_W) = K_{вт} \cdot 2 \cdot (P_U + P_V + P_W); \quad (11.16)$$

4) Величина момента нагрузки на валу двигателя в системе единиц СИ:

$$M, \text{ Н} \cdot \text{м} = 9,80665 \cdot (M, \text{ кгс} \cdot \text{м}); \quad (11.17)$$

5) Полезная механическая мощность на валу двигателя:

$$P_2 = 0,1047 \cdot M \cdot n, \text{ Вт}; \quad (11.18)$$

6) Коэффициент полезного действия двигателя:

$$\eta = 100 \cdot P_2/P_1, \%; \quad (11.19)$$

7) Коэффициент мощности: $\cos \varphi_1 = P_1/\sqrt{3}U_{1н}I_1$. (11.20)

4.7. Пуск двигателя при несимметрии цепи обмотки ротора

(см. разд. П2.2.2, с. 223)

Пуск двигателя осуществить в следующей последовательности.

1. Установить диапазон измерений амперметров на 15 А (*цена деления* – 1 А/дел; последовательность перехода на другой диапазон – см. разд. 4.3 и рис. 11.4).

2. Разомкнуть цепь одной фазы обмотки ротора (рис. 11.3, фаза L , гнездо 8);

3. Установить реостат RR_{II} в положение «Ход АД» (выведен);

4. Установить *рукояткой на шкале* автотрансформатора *пониженное* напряжение $U_1 = 220$ В;

5. Включить автомат $QF1$ и *плавно* поднять напряжение до номинального значения $U_{1н} = 380$ В. Измерить и записать в табл. 11.5 значения напряжения $U_{1н}$, тока I_1 обмотки статора (его значение примерно 12 А), а также частоты n вращения ротора;

6. Плавно и постепенно ввести 2 или 3 ступени реостата RR_{Π} и еще раз измерить и записать в табл. 11.5 значения напряжения U_{1H} , тока I_1 (его значение примерно 4 А) и частоты n вращения ротора.

Таблица 11.5. – Данные пуска двигателя при несимметрии цепи ротора

Положение пускового реостата RR_{Π}							
«Ход АД» (реостат выведен)				Введены ступени реостата RR_{Π}			
U_{1H}	I_1	n	s	U_{1H}	I_1	n	s
В	А	об/мин	–	В	А	об/мин	–
380				380			

Значение скольжения s рассчитать по формуле (11.14), $s = (n_1 - n)/n_1 = (1500 - n)/1500$.

4.8. Построение круговой диаграммы по данным опытов холостого хода и короткого замыкания

Определение. Круговая диаграмма асинхронной машины – это геометрическое место (годограф) концов векторов токов статора и ротора вращающейся асинхронной машины при ее работе в разных режимах, а именно: двигателя, генератора и электромагнитного тормоза.

Круговую диаграмму строят по данным опытов холостого хода и короткого замыкания. *Достоинство состоит в том,* что не загружая двигатель по диаграмме можно определить рабочие характеристики его, а также механическую и скоростную характеристики. Отметим, что эксплуатационные характеристики трансформатора также определяют по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.

4.8.1. Перечень необходимых данных для построения

Для построения круговой диаграммы с целью проверки гарантированных значений: коэффициента полезного действия η , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ и скольжения s при номинальной нагрузке необходимы следующие данные.

1) Фазное значение тока холостого хода $I_{\Phi X}$ при номинальном напряжении $U_1 = U_{1H} = 380$ В и номинальной частоте $f_1 = f_{1H}$ [см. табл. 11.2 и формулу (11.5)] [считаем, что ток реального холостого хода $I_{\Phi X}$ и ток идеального холостого хода $I_{и.х}$ (см. рис. 11.5) равны, $I_{и.х} \approx I_{\Phi X}$].

2) Потери холостого хода P_X при номинальном напряжении $U_1 = U_{1H} = 380$ В и номинальной частоте $f_1 = f_{1H}$ (табл. 11.2).

3) Разность между потерями холостого хода и механическими $P_x - p_{мх}$ при номинальном напряжении $U_1 = U_{1н} = 380$ В и номинальной частоте $f_1 = f_{1н}$ (табл. 11.2).

4) Фазное значение тока короткого замыкания $I_{кн}$ при номинальном напряжении $U_1 = U_{1н} = 380$ В [формула (11.12)].

5) Потери короткого замыкания $P_{кн}$ при номинальном напряжении $U_1 = U_{1н} = 380$ В [формула (11.13)].

6) Сопротивление фазы обмотки статора $R_{1(75^\circ)}$, приведенное к расчетной рабочей температуре [формула (11.9)].

Значения величин, перечисленных в пп. 1)–6), записать в табл. 11.6 (выше диагоналей).

Таблица 11.6 – Данные для построения круговой диаграммы

m_i	m_p	$I_{н.х} \approx I_{фх}$ O_1O	P_x $O'O''$	$P_x - p_{мх}$ $O'O$	$I_{кн}$ O_1K	$P_{кн}$ KH	$R_{1(75^\circ)}$
А/см	Вт/см	А см	Вт см	Вт см	А см	Вт см	Ом

Примечание. Ниже диагоналей в первой строке таблицы приведены обозначения длин отрезков, которые в масштабе тока m_i (или в масштабе мощности m_p) соответствуют значениям тока (или мощности); значения длин этих отрезков рассчитать после выполнения пп. 2) и 3) разд. 4.8.2 и затем записать в табл. 11.6 (ниже диагоналей).

4.8.2. Последовательность построения упрощенной круговой диаграммы

Построение круговой диаграммы (рис. 11.5) выполнить на листе миллиметровой бумаги формата А4 следующим образом (все данные см. в табл. 11.6).

1) Из точки O_1 проводят ось абсцисс O_1X и ось ординат O_1Y . Ось ординат соответствует фазному напряжению $U_{1ф.н} = 220$ В обмотки статора;

2) Выбирают масштаб тока m_i , А/см (рекомендуется принять масштаб тока m_i в диапазоне 1,5–2,0 А/см. Значение масштаба записать в табл. 11.6);

3) Определяют масштаб мощности по формуле (значение записать в табл. 11.6)

$$m_p = 3m_i \cdot U_{1\phi,н} = 3m_i \cdot 220, \text{ Вт/см};$$

4) Строят точку идеального ($s = 0$) холостого хода O по фазному току $I_{\phi,х}$ (отрезок O_1O) и потерям $P_x - p_{мх}$ (отрезок $O'O$). Для построения проводят прямую OD параллельно оси абсцисс на расстоянии $O'O$ от оси. Затем из точки O_1 раствором циркуля O_1O отсекают прямую OD в точке O , которая и является точкой идеального холостого хода ($s = 0$). Проводят линию O_1O , которую считают соответствующей току идеального холостого хода $I_{и.х}$ (см. рис. 11.5);

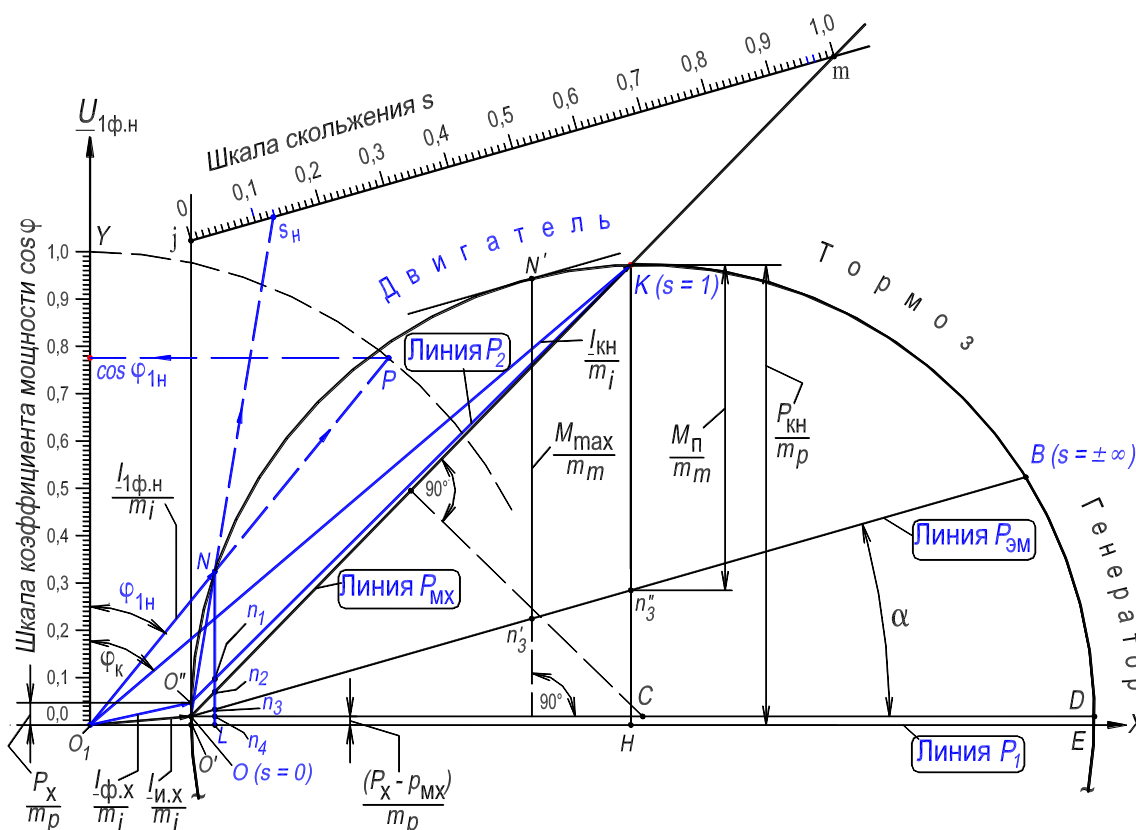


Рисунок 11.5. – Упрощенная круговая диаграмма асинхронной машины:

(масштабы: тока $m_i = 1,87$ А/см; мощности $m_p = 1234$ Вт/см;

момента $m_m = 7,856$ Н.м/см)

5) Строят точку короткого замыкания K по фазному току $I_{кн}$ (отрезок O_1K) и потерям $P_{кн}$ (отрезок KH). Для построения проводят прямую парал-

лельно оси абсцисс на расстоянии KH от оси. Затем из точки O_1 раствором циркуля O_1K отсекают эту прямую в точке K , которая и является точкой короткого замыкания ($s = 1,0$). Проводят линию O_1K ;

б) Проводят отрезок OK , который соответствует току $-I''_{2KH}$ Г-образной схемы замещения при скольжении $s = 1,0$ (см. рис. 10.7,б и рис. 11.5). Из середины отрезка OK восстанавливают перпендикуляр (пунктирная линия) до пересечения с линией OD в точке C . Через точки O и K проводят окружность с центром в точке C , которая и является годографом векторов тока статора I_1 и ротора $-I''_2$;

7) Строят точку реального холостого хода O'' по потерям P_x (отрезок $O'O''$). Точка O'' расположена на одной вертикали с точкой идеального холостого хода O выше оси абсцисс O_1X на величину отрезка $O'O''$. Проводят линию O_1O'' , которая соответствует току реального холостого хода $I_{ф.х.}$. Проводят линию $O''K$;

8) Проводят под углом α прямую OB , точка B соответствует скольжению $s = \pm\infty$, при этом

$$\operatorname{tg} \alpha = D_a R_{1(75^\circ)} / U_{1ф.н.},$$

где D_a – диаметр диаграммы (отрезок OD), выраженный в амперах ($D_a = m_i \cdot OD$);

9) Строят шкалу коэффициента мощности:

Проводят дугу (пунктирная линия) радиусом 10 см с центром в точке O_1 до пересечения с осью ординат в точке Y .

Линия O_1Y является шкалой коэффициента мощности $\cos \varphi_1$;

10) Строят шкалу скольжений:

а) проводят касательную Oj в точке O ($s = 0$);

б) проводят линию jm параллельно линии OB на таком расстоянии, чтобы отрезок jm (он расположен между линией Oj и продолжением отрезка OK) удобно делился на 100 частей;

в) линия jm является шкалой скольжения.

На этом построение круговой диаграммы закончено.

На годографе векторов токов статора и ротора имеются три характерные точки O , K и B , которые соответствуют значениям скольжения $s = 0$, 1 и $\pm\infty$, и делят окружность на три части, соответствующие режимам: двигателя (дуга $OO''K$), генератора (дуга $BO'O$) и электромагнитного тормоза (дуга KB) (рис. 11.5).

4.8.3. Определение по круговой диаграмме номинальной точки, мощностей и потерь мощности двигателя

1) Определение на круговой диаграмме точки N , соответствующей номинальному режиму работы двигателя:

а) от прямой $O''K$ перпендикулярно диаметру OD откладывают на диаграмме номинальную мощность электродвигателя $P_{2н}$ в виде отрезка Nn_1 , определяемого из выражения

$$Nn_1 = P_{2н}/m_p,$$

где значение мощности $P_{2н}$, Вт берется из паспорта электродвигателя.

б) продлевают отрезок Nn_1 до пересечения с осью абсцисс в точке L . Обозначают на отрезке NL точки n_2 , n_3 и n_4 ;

2) Определение на круговой диаграмме мощностей двигателя:

а) линии O_1E , OB , OK и $O''K$ круговой диаграммы называются линиями первичной P_1 , электромагнитной $P_{эм}$, механической $P_{мх}$ и вторичной P_2 мощностей (линия OB также называется линией электромагнитного момента);

б) значения мощностей $P_{1н}$, $P_{мх}$, $P_{эм}$ и $P_{2н}$, Вт при номинальном режиме двигателя пропорциональны соответственно отрезкам NL , Nn_2 , Nn_3 и Nn_1 , см, причем

$$P_{1н} = m_p \cdot NL, P_{мх} = m_p \cdot Nn_2, P_{эм} = m_p \cdot Nn_3, P_{2н} = m_p \cdot Nn_1;$$

в) для определения значений мощностей P_1 , $P_{эм}$, $P_{мх}$ и P_2 , Вт при различных значениях скольжения в диапазоне $0,0 < s < 1,0$, например при $s = 0,3$, (то есть при *не номинальном* режиме) проводят из точки O отрезок до точки $s = 0,3$ на шкале скольжения. Фиксируют на дуге $OO''K$ точку пересечения с этим отрезком; опускают из этой точки перпендикуляр на ось абсцисс; обозначают на нем точки пересечения с вышеуказанными линиями мощностей и рассчитывают значения мощностей по формулам, приведенным в п. 2) б). Аналогично определяются значения мощностей при других значениях скольжения (построения соответствующие пункту 2) в) на рис. 11.5 не показаны).

3) Определение на круговой диаграмме потерь мощности в двигателе:

а) значения электрических потерь мощности $p_{э1}$ и $p_{э2}$, Вт в обмотке статора и в обмотке ротора при номинальном режиме двигателя пропорциональны соответственно составляющим n_3n_4 и n_2n_3 , см отрезка NL , причем

$$p_{\varepsilon 1} = m_p \cdot n_3 n_4, p_{\varepsilon 2} = m_p \cdot n_2 n_3;$$

б) значения суммы механических и добавочных потерь мощности $p_{\text{мх}} + p_{\text{дб}}$, Вт при номинальном режиме двигателя пропорциональны составляющей $n_1 n_2$, см отрезка NL , причем

$$p_{\text{мх}} + p_{\text{дб}} \approx m_p \cdot n_1 n_2;$$

в) значения суммы магнитных потерь $p_{\text{мг}}$ и электрических потерь мощности в обмотке статора от тока идеального холостого хода (они постоянны и равны разности $P_x - p_{\text{мх}}$, Вт) при номинальном режиме двигателя пропорциональны составляющей $n_4 L = OO'$, см отрезка NL , причем

$$P_x - p_{\text{мх}} = m_p \cdot n_4 L;$$

г) определение значений потерь мощности при не номинальном режиме двигателя выполняется на основе построений, описанных в п. 2) в), а также формул, приведенных в пп. 3) а) б) в).

4.8.4. Определение по круговой диаграмме значений коэффициента мощности, коэффициента полезного действия и скольжения

1) Определение коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ при номинальной мощности двигателя $P_{2\text{н}}$:

а) проводят линию $O_1 N$ и продлевают ее до пересечения с дугой в точке P (дуга изображена пунктирной линией), служащей для определения коэффициента мощности. Опускают перпендикуляр из этой точки на шкалу коэффициента мощности;

б) коэффициент мощности $\cos \varphi_{1\text{н}}$ определяется по шкале коэффициента мощности.

2) Определение скольжения s при номинальной мощности двигателя $P_{2\text{н}}$:

а) проводят линию ON . Точка пересечения этой линии со шкалой скольжения определяет значение скольжения $s_{\text{н}}$ при номинальной мощности двигателя.

3) Определение коэффициента полезного действия двигателя η при номинальной мощности двигателя:

КПД двигателя определяют косвенным методом по формуле

$$\eta = 100(1,0 - \Sigma p / P_{1\text{н}}), \%$$

где $\Sigma p = p_{\varepsilon 1} + p_{\text{мг}} + p_{\text{мх}} + p_{\varepsilon 2} + p_{\text{дб}}$ – сумма всех потерь в двигателе;

$p_{\varepsilon 1} = 3 \cdot I_{1\text{ф.н}}^2 R_{1(75^\circ)}$ – электрические потери в обмотке статора; номинальный фазный ток в обмотке статора определяется из круговой диаграммы как $I_{1\text{ф.н}} = m_i O_1 N$;

$p_{\text{мг}}$ и $p_{\text{мх}}$ – магнитные (в стали) и механические потери (см. табл. 11.2, графа Расчет);

$p_{\varepsilon 2} = s_{\text{н}} \cdot P_{\text{эм}} = s_{\text{н}}(P_{1\text{н}} - p_{\text{мг}} - p_{\varepsilon 1})$ – электрические потери в обмотке ротора; скольжение $s_{\text{н}}$ определено из круговой диаграммы (см. п. 2);

$p_{\text{дб}} = 0,005 \cdot P_{1\text{н}}$ – добавочные потери;

$P_{1\text{н}}$ – потребляемая из сети мощность определяется из диаграммы как $m_p \cdot LN$.

Значения коэффициента мощности, коэффициента полезного действия и скольжения: а) определенные по круговой диаграмме (см. п. 4.8.4); б) полученные на основе опыта снятия рабочих характеристик (см. п. 4.6) записать в табл. 11.7 и сопоставить со значениями, гарантированными заводом – изготовителем.

Таблица 11.7. – Значения коэффициента мощности, скольжения и коэффициента полезного действия

Величина определена	cos φ ₁	s	η
	–	–	%
По паспорту двигателя (гарантированное значение)	0,82		78
Из круговой диаграммы			
На основе опыта снятия рабочих характеристик			

* **Примечание:** рассчитать значение $s_{\text{н}} = (n_1 - n_{\text{н}})/n_1$

4.8.5. Определение по круговой диаграмме максимального электромагнитного момента, характеристик $s = f(M_{\text{эм}})$, $s = f(I_1)$ и кратностей пускового момента и пускового тока

1) Определение номинального электромагнитного момента:

Электромагнитный момент $M_{\text{н}}$ пропорционален отрезку Nn_3 :

$$M_{\text{н}} = m_m N n_3,$$

где $m_m = p \cdot m_p / 2\pi \cdot f_1$, Н·м/см – масштаб момента, $p = 2$ – число пар полюсов двигателя, $f_1 = 50$ Гц;

2) Определение *максимального электромагнитного момента*:

а) Максимальный электромагнитный момент M_{\max} пропорционален отрезку $N'n'_3$. Для нахождения этого отрезка необходимо провести к годографу токов касательную параллельно линии электромагнитной мощности OB , и из точки касания N' опустить перпендикуляр на диаметр OD . Пересечение перпендикуляра с линией OB определяет точку n'_3

$$M_{\max} = m_m N'n'_3;$$

б) Кратность максимального электромагнитного момента (перегрузочная способность двигателя) определяется отношением

$$\kappa_m = M_{\max}/M_H = N'n'_3/Nn_3.$$

3) Определение *пускового электромагнитного момента*:

а) Пусковой электромагнитный момент M_{Π} пропорционален отрезку Kn''_3 . Пересечение перпендикуляра KN_1 к диаметру OD с линией электромагнитной мощности OB определяет точку n''_3

$$M_{\Pi} = m_m Kn''_3;$$

б) Кратность пускового электромагнитного момента определяется отношением

$$\kappa_{\Pi} = M_{\Pi}/M_H = Kn''_3/Nn_3.$$

4) Определение *пускового тока* обмотки статора:

а) Пусковой ток обмотки статора $I_{1\Pi}$ пропорционален отрезку O_1K

$$I_{1\Pi} = m_i \cdot O_1K;$$

б) Кратность пускового тока определяется отношением

$$\kappa_i = I_{1\Pi}/I_{1\phi.H} = O_1K/O_1N.$$

Значения кратностей пускового тока, пускового и максимального моментов занести в табл. 11.8

Таблица 11.8. – Кратности пусковых тока и момента; максимального момента

Кратность пускового тока	$\kappa_i =$
Кратность пускового момента	$\kappa_{\Pi} =$
Кратность максимального моментов	$\kappa_m =$

5) Определение характеристики $s = f(M_{\text{эм}})$:

Задаваясь рядом значений скольжения двигателя (см. табл. 11.9), необходимо определить по круговой диаграмме соответствующие им значения электромагнитного момента. Для определения значений момента

необходимо произвести построения, подобные описанным в разделе 4.8.3, п. 2) в) и выполнить расчеты, подобные описанным в разделе 4.8.5, п. 1). Результаты записать в табл. 11.9.

Таблица 11.9. – Данные для построения зависимости момента от скольжения

s	0,05	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0
$M_{эм}, Н·м$										
$I_1, А$										

На графике зависимости $s = f(M_{эм})$ необходимо отобразить точки и их координаты, соответствующие значениям номинального [разд. 4.8.5, п. 1)], максимального [разд. 4.8.5, п. 2)] и пускового моментов [разд. 4.8.5, п. 3)]. На оси ординат необходимо показать кроме значений скольжения s также значения частоты вращения ротора n , выраженные в долях синхронной частоты вращения поля n_1 , то есть $n/n_1 = 1 - s$.

б) Определение характеристики $s = f(I_1)$:

Задаваясь рядом значений скольжения двигателя (см. табл. 11.9), необходимо определить по круговой диаграмме соответствующие им значения тока обмотки статора I_1 . Для определения значений этого тока осуществляют следующие действия (рис. 11.5): а) проводят из точки O лучи упирающиеся в шкалу скольжения в точках соответствующих значениям скольжения, приведенным в табл. 11.9; б) фиксируют на дуге $OO''K$ точки пересечения этих лучей с дугой (см. на рис. 11.5 отрезок ON и точку N); в) из точки O_1 проводят отрезки в точки пересечения (см. отрезок O_1N); длина полученных отрезков пропорциональна значениям тока статора.

Ток статора соответствующий точке N (и скольжению s_N) определяется как $I_{1ф.н} = m_i O_1N$. Подобным образом определяются значения тока статора при других значениях скольжения. Результаты записываются в табл. 11.9.

На графике $s = f(I_1)$ необходимо отобразить точки и их координаты, соответствующие значениям номинального и пускового тока [разд. 4.8.5, п. 4)].

По данным табл. 11.9 построить зависимости $s = f(M_{эм})$, $s = f(I_1)$. Они соответствуют двигательному режиму работы асинхронной машины. На оси ординат необходимо показать кроме значений скольжения s также значения частоты вращения ротора n , выраженные в долях синхронной частоты вращения поля n_1 , то есть $n/n_1 = 1 - s$.

4.8.6. Оценка точности построения круговой диаграммы

При оценке точности нахождения значений кратностей пускового момента и тока, а также максимального момента (разд. 4.8.5), *которые определены без учета насыщения стали магнитопровода*, необходимо принять во внимание, что при больших токах и скольжениях параметры двигателя (сопротивления Г-образной схемы замещения) перестают быть постоянными, поэтому годограф токов будет более сложной линией, чем окружность.

Каждой точке на окружности токов, то есть на годографе векторов тока статора и ротора (рис. 11.5), соответствует уравнение равновесия МДС асинхронной машины $\underline{I}_1 = \underline{I}_{и.х} + (-\underline{I}''_2)$, где \underline{I}_1 – вектор тока статора; $\underline{I}_{и.х}$ – вектор тока статора при идеальном холостом ходе двигателя ($s = 0$); \underline{I}''_2 – вектор приведенного тока ротора.

Для номинальной точки N векторам этого уравнения соответствуют отрезки O_1N , O_1O и ON ; для точки короткого замыкания K – отрезки O_1K , O_1O и OK и т. д. Как видно из рис. 11.5 диаметр годографа векторов тока OD соответствует наибольшему значению приведенного тока ротора, который является чисто реактивным. Длина диаметра OD практически обратно пропорциональна индуктивному сопротивлению короткого замыкания $X_k = X_1 + X'_2$. С увеличением скольжения вследствие насыщения зубцовой зоны магнитопровода это сопротивление уменьшается, а диаметр круговой диаграммы уже по этой причине увеличивается по сравнению с его значением при малых скольжениях и поэтому годограф токов будет более сложной линией, чем окружность.

Круговая диаграмма строится по данным опытов холостого хода (разд. 4.4) и короткого замыкания (разд. 4.5) асинхронного двигателя и используется в соответствии с ГОСТ 7217–87 *Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний* для проверки гарантированных заводом-изготовителем значений: коэффициента полезного действия η , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ и скольжения s при номинальной нагрузке (разд. 4.8.4), а также для определения максимального вращающего момента двигателя (разд. 4.8.5).

5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы.
4. Номинальные данные асинхронного двигателя.
5. Схему испытаний.
6. Результаты опытов и расчетов, представленных в таблицах 11.1–11.9; ниже каждой таблицы приводятся формулы для расчета величин и соответствующие таблице графические зависимости (см. далее пп. 7.1–7.6).
7. Экспериментальные и расчетные графические зависимости:
 - 7.1. $p_{\text{МГ}} + p_{\text{МХ}} = f(U_{\text{X}}^2)$ – график разделения потерь мощности;
 - 7.2. $I_{\text{X}}, P_{\text{X}}, \cos \varphi_{\text{X}} = f(U_{\text{X}})$ – характеристики холостого хода;
 - 7.3. $I_{\text{К}}, P_{\text{К}}, \cos \varphi_{\text{К}} = f(U_{\text{К}})$ – характеристики короткого замыкания;
 - 7.4. $I_1, P_1, M, \cos \varphi_1, \eta, s = f(P_2)$ – рабочие характеристики;
 - 7.5. $s, n/n_1 = f(M_{\text{ЭМ}})$ – механическая характеристика (на оси ординат отобразить кроме значений скольжения s , также значения относительной частоты вращения ротора $n/n_1 = 1 - s$);
 - 7.6. $s, n/n_1 = f(I_1)$ – скоростная характеристика.
8. Круговую диаграмму с соответствующими построениями.

Текст отчета оформить в текстовом процессоре *MS Word* (шрифт *Times New Roman*, 12 пт.). Графики строить в интерактивном графическом пакете *Grapher*. Схему опыта и круговую диаграмму вычертить в интерактивном графическом пакете *AutoCAD*. Все отчеты по лабораторным работам раздела Асинхронные машины подшить в одну общую простую папку-скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

6. Контрольные вопросы

1. Перечислить условия создания вращающегося магнитного поля трехфазной распределенной обмоткой.
2. Объяснить принцип действия асинхронного двигателя.
3. Устройство асинхронного двигателя с фазным ротором.
4. Нарисовать и объяснить энергетическую диаграмму двигателя.
5. С какой целью в цепь ротора при пуске двигателя с фазным ротором включается пусковой реостат?
6. Изобразить и объяснить форму механической $n = f(M)$ и скоростной $n = f(I_1)$ характеристик двигателя.

7. Изобразить Г-образную схему замещения двигателя и объяснить физический смысл всех ее параметров.
8. Как изменить направление вращения ротора двигателя?
9. Объяснить эффект Гергеса (Görges).

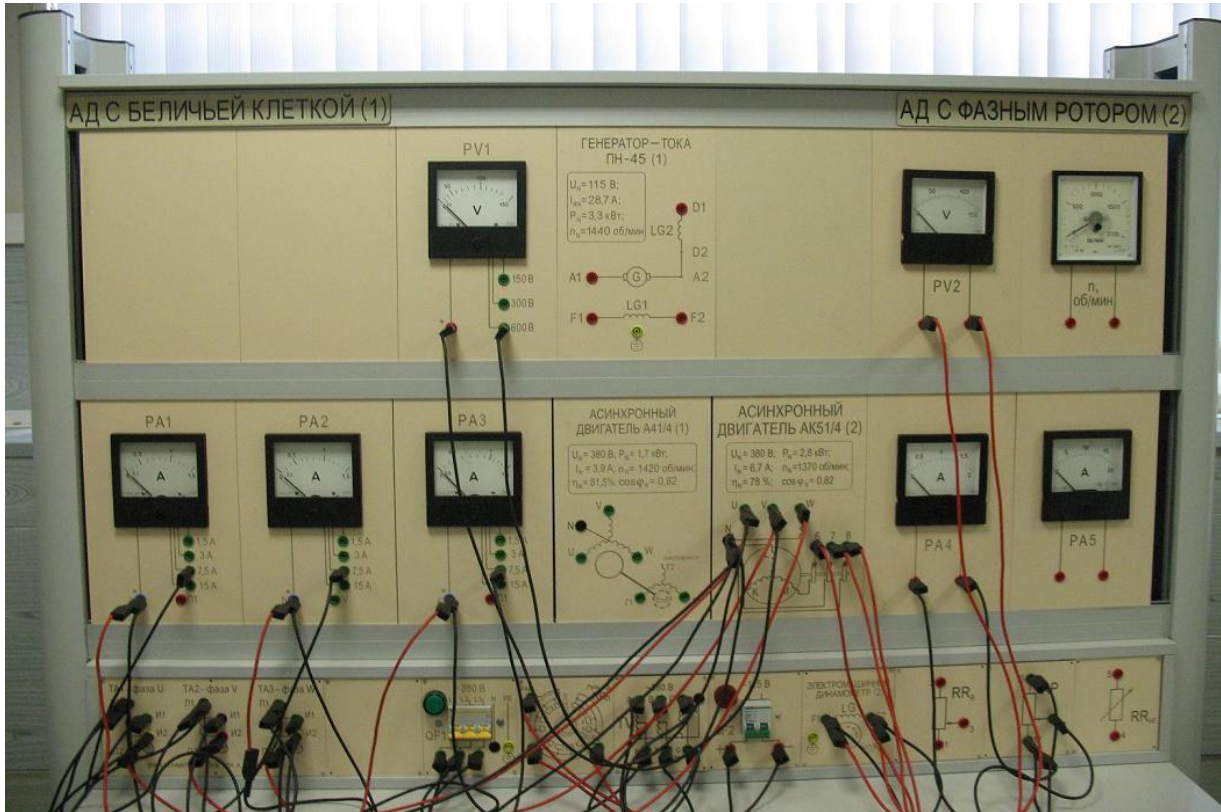


Рисунок 11.6. – Фотография приборной панели лабораторного стенда для исследования трехфазного асинхронного двигателя с фазным ротором



Рисунок 11.7. – Фотография исследуемого агрегата «Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором – электромашинный динамометр»
(номинальные данные – см. рис. 11.3)

Электромашинный динамометр

На рис. П1 показано устройство электромашинного динамометра: электромагнит, состоящий из четырех полюсов 4, с полюсными катушками 3, соединенными последовательно, укреплен на одной стороне оси, имеющей возможность поворачиваться в подшипниках, укрепленных в стойке 2; на другой стороне этой оси расположены стрелка 1 и груз 8. При включении двигателя диск 6 (вместе с его валом 7) вращается в магнитном поле электромагнита. При этом в диске наводятся вихревые токи, оказывающие на него тормозящее действие. В результате электромагнитного взаимодействия вращающегося диска с полюсными наконечниками 5 электромагнита ось вместе с электромагнитом 4 и грузом 8 поворачивается на некоторый угол, при котором противодействующий момент, создаваемый грузом (противовесом) 8, уравнивает полезный момент двигателя M_2 . На такой же угол отклонится стрелка 1 и укажет на шкале 9 величину нагрузочного момента.

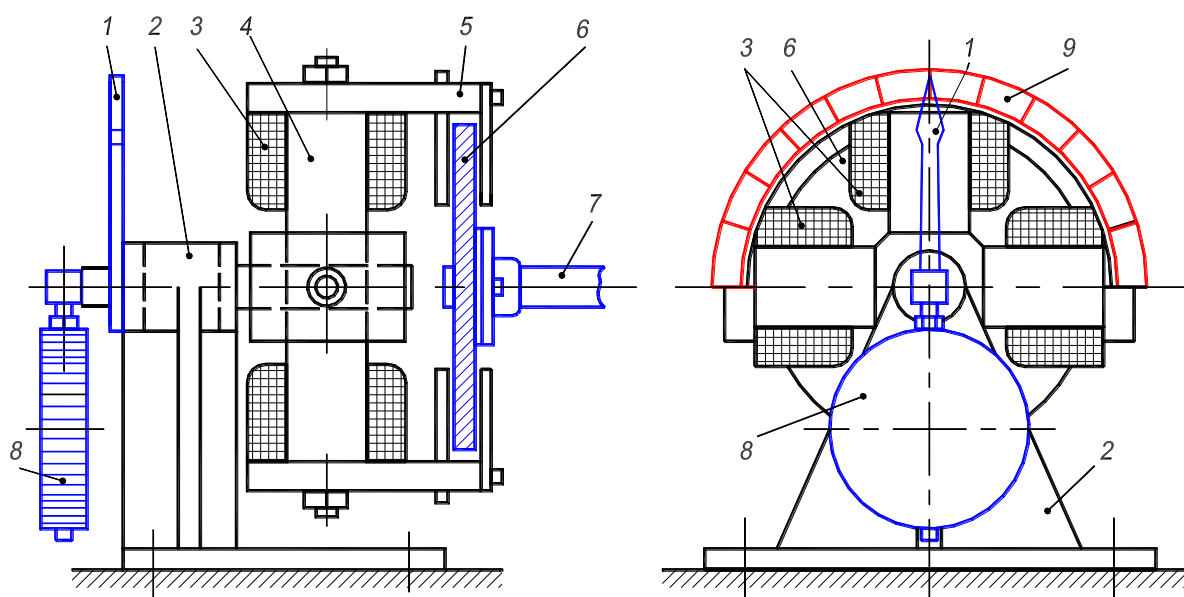


Рисунок П1. – Электромашинный динамометр (изображен упрощенно)

Количество полюсов в электромашинном динамометре может быть различным: при небольших нагрузочных моментах их число равно двум, а при значительных – четырем или шести. Диск обычно делают из ферромагнитной стали и лишь в небольших динамометрах, применяемых для испытания двигателей небольшой мощности (не более 500 Вт), его делают алюминиевым.

Электромашинные динамометры удобны в эксплуатации, позволяют плавно изменять нагрузку путем регулировки величины тока в обмотке возбуждения электромагнита, дают непосредственный отсчет величины нагрузочного момента по шкале. Кроме того, эти динамометры дают возможность измерения величины начального пускового момента (при напряжениях, допускающих режим короткого замыкания). С этой целью в специальное отверстие в диске вставляют шпильку, которая зацепляется с полюсным наконечником электромагнита. Величину пускового момента отсчитывают по шкале после прекращения качания полюсной системы электромагнита.

Приложение 2

П2.1. Работа трехфазных асинхронных двигателей при ненормальных условиях

П2.1.1. Изменение частоты

Частота сети f_1 может отличаться от номинальной $f_{1н}$, в особенности, в маломощных автономных энергетических установках (транспорт, лесоразработки, изолированные строительные объекты и пр.). Рассмотрим, влияние изменения частоты на работу двигателя, когда $U_1 = U_{1н} = \text{const}$ и момент нагрузки на валу $M_{нг}$ равен или близок номинальному.

Если пренебречь падениями напряжения, то

$$U_1 = 4,44f_1w_1\Phi_m k_{об1}, \quad (\text{П2.1})$$

откуда следует, что при $U_1 = \text{const}$ изменение f_1 приводит к изменению потока двигателя Φ_m . С другой стороны,

$$M = c_M \Phi_m I_2 \cos \psi_2,$$

откуда следует, что при $M_{нг} = \text{const}$ изменение Φ_m приводит к изменению вторичного тока I_2 и нагрузочной составляющей первичного тока.

Ввиду заметного насыщения магнитной цепи асинхронных двигателей уменьшение f_1 и соответствующее ему увеличение Φ_m приводят к значительному увеличению намагничивающего тока I_x . Например, уменьшение f_1 на 10 % обычно вызывает увеличение I_x на 20–30 %. Хотя при увеличении Φ_m и $M_{нг} = \text{const}$ ток I_2 соответственно уменьшается, более значительное увеличение намагничивающего тока I_x может вызвать общее увеличение первичного тока и перегрев первичной обмотки.

Увеличение f_1 и соответствующее ему уменьшение Φ_m приводят к заметному уменьшению намагничивающего тока I_x . При этом, однако, при $M_{нг} = \text{const}$ растет ток I_2 , что приводит к перегрузке током обмотки ротора, а при определенных условиях также и к перегрузке обмотки статора.

Таким образом, как уменьшение, так и увеличение частоты вызывают ухудшение условий работы асинхронных двигателей, работающих при нагрузках, близких к номинальным. Поэтому колебания частоты сети должны быть ограничены. Двигатели должны отдавать номинальную мощность при отклонениях частоты от номинального значения до $\pm 5\%$.

П2.1.2. Изменение напряжения

Изменение напряжения при $f_1 = f_{1н}$ приводит, согласно равенству (П2.1), к тем же последствиям, как и изменение частоты, с той лишь разницей, что *уменьшение U_1 вызывает также уменьшение Φ и наоборот*. Поэтому изменение U_1 при $f_1 = \text{const}$ при нагрузках, близких к номинальным, тоже приводит к ухудшению условий работы двигателей. В связи с этим изменения U_1 также должны быть ограничены. Двигатели должны отдавать номинальную мощность при отклонениях напряжения сети от номинального в пределах от -5 до $+10$ %. При одновременном отклонении напряжения и частоты двигателя переменного тока, должны отдавать номинальную мощность, если сумма процентных значений этих отклонений без учета знаков не превосходит 10 %.

П2.1.3. Переключение обмоток слабо загруженных асинхронных двигателей с треугольника на звезду

Как было установлено, *при большой нагрузке* асинхронного двигателя уменьшение напряжения на его зажимах приводит к перегрузке обмоток двигателя токами со всеми вытекающими отсюда последствиями (увеличение потерь, уменьшение КПД, перегрев обмоток). Однако *если двигатель нагружен слабо*, например до 35–40 % от номинальной мощности, то уменьшение U_1 может привести к улучшению энергетических показателей двигателя. Действительно, намагничивающий ток I_x в результате уменьшения потока при этом весьма значительно уменьшается и, следовательно, коэффициент мощности заметно увеличивается. Уменьшаются пропорционально U_1 также магнитные потери. Хотя при $M_{нг} = \text{const}$ уменьшение U_1 будет вызывать соответствующее увеличение I_2' , вследствие недогрузки двигателя величина I_2' может не превышать номинального значения. Нагрузочная составляющая I_1 увеличивается так же, как I_2' , но ввиду уменьшения I_x результирующее значение I_1 может даже уменьшиться. В результате указанных причин КПД может увеличиться.

По ряду причин некоторые асинхронные двигатели в условиях эксплуатации могут быть сильно недогруженными. Если обмотки статора таких двигателей нормально соединены в треугольник, то для улучшения $\cos \varphi_1$ и КПД двигателей может оказаться целесообразным переключение их в звезду. Напряжения фаз при этом *уменьшатся* в $\sqrt{3}$ раза, что вызовет *уменьшение Φ в $\sqrt{3}$ раза, уменьшение I_x в 2–2,5 раза* и при условии $M_{нг} = \text{const}$ – *увеличение I_2' в $\sqrt{3}$ раза*. Если при этом КПД улучшится или

даже останется неизменным, то для улучшения $\cos \varphi_1$ сети целесообразно переключить обмотки статора в звезду. Значение нагрузки, ниже которого такое переключение для данного двигателя целесообразно, должно быть установлено путем расчета или экспериментально. На рис. П2.1 в качестве иллюстрации к сказанному приведены характеристики двигателя на $P_{2н} = 28$ кВт, $n_{1н} = 975$ об/мин. Из этих характеристик видно, что для улучшения $\cos \varphi_1$ переключение обмоток этого двигателя в звезду целесообразно при нагрузках ниже 40 % от номинального значения, когда $\cos \varphi_1$ и η будут выше, чем при соединении в треугольник.

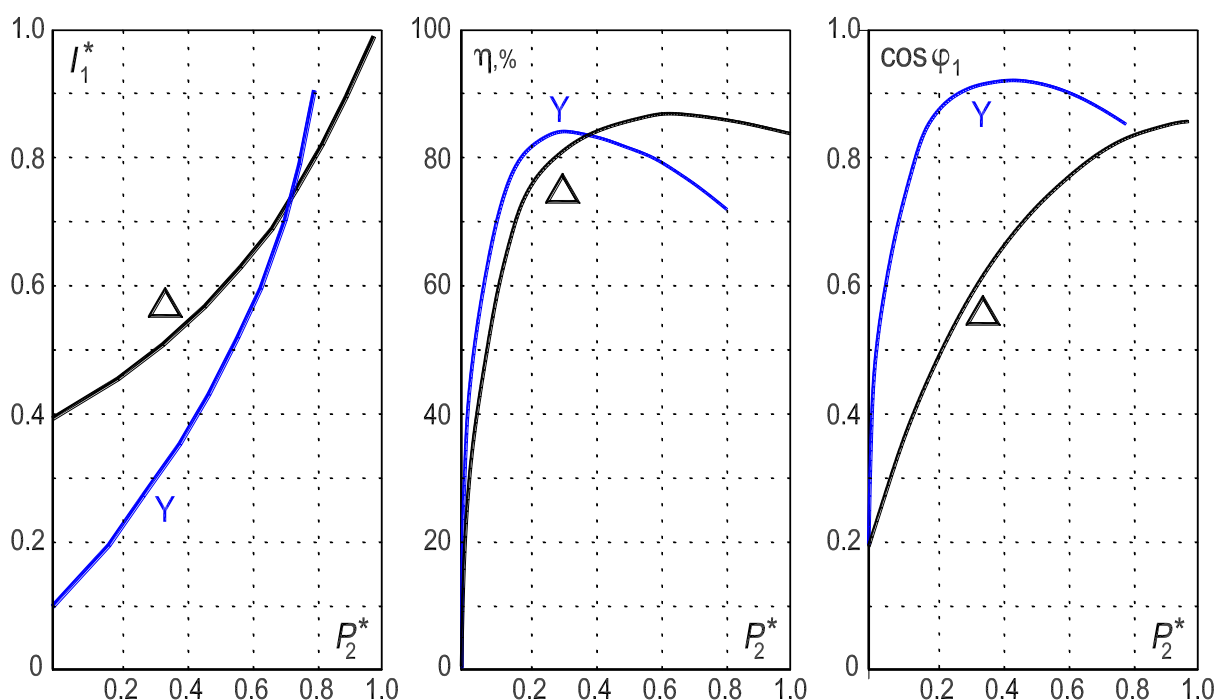


Рисунок П2.1 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя при соединениях обмотки статора в треугольник (« Δ ») и в звезду (« Y ») и при напряжении сети, равном номинальному фазному напряжению двигателя:

ток и мощность выражены в относительных единицах: $I_1^* = I_1/I_{1н}$; $P_2^* = P_2/P_{2н}$

П2.2. Несимметричные режимы работы асинхронных двигателей

Несимметричные режимы работы асинхронных двигателей возникают в следующих случаях: 1) при искажении симметрии напряжений сети; 2) при несимметрии сопротивлений в цепях статора и ротора; 3) при несимметричной схеме соединений обмоток двигателя. Такие режимы могут возникнуть как результат отклонения условий работы двигателя от нормальных, в частности, вследствие неисправностей и аварий. Рассмотрим некоторые несимметричные режимы, считая, что устройство асинхронной машины в целом и фаз ее обмоток является симметричным.

Несимметричные режимы работы асинхронных машин целесообразно *исследовать с помощью метода симметричных составляющих, пренебрегая насыщением и пользуясь методом наложения*. Составляющие нулевой последовательности в токах обмоток асинхронных двигателей обычно не возникают, так как нейтральные точки этих обмоток, если обмотки соединены в звезду, обычно изолированы. Поэтому достаточно рассмотреть поведение асинхронных машин по отношению к составляющим напряжений и токов прямой и обратной последовательности.

П2.2.1. Работа асинхронного двигателя при несимметрии приложенных напряжений

Пусть система трехфазных напряжений, приложенных к обмотке статора асинхронного двигателя, несимметрична и содержит составляющие прямой (U_{11}) и обратной (U_{12}) последовательности. Все изложенное в предыдущих разделах относилось к асинхронному двигателю с напряжениями и токами прямой последовательности. Приведем полученные ранее результаты, введя дополнительный индекс «1» для обозначения прямой последовательности, а затем распространим эти результаты на напряжения и токи обратной последовательности (с дополнительным индексом «2»).

Напряжения прямой последовательности U_{11} вызывают в первичной цепи машины токи прямой последовательности I_{11} . Эти токи создают магнитное поле и поток прямой последовательности, которые вращаются со скоростью

$$n_1 = f_1/p \quad (\text{П2.2})$$

и индуцируют токи прямой последовательности I_{21} во вторичной обмотке. Токи I_{11} и I_{21} создают результирующее магнитное поле прямой последовательности, вращающееся со скоростью n_1 . Скольжение ротора относительно этого поля есть скольжение прямой последовательности:

$$s_1 = s = (n_1 - n)/n_1, \quad (\text{П2.3})$$

где n – скорость вращения ротора, положительная в случае, когда ротор вращается в сторону поля прямой последовательности.

Для системы токов и напряжений прямой последовательности действительна схема замещения, идентичная схеме замещения рис. 10.7, с. 123. Эта схема позволяет рассчитать токи I_{11} и I_{21}' , если известны U_{11} и параметры машины.

Токи и поле прямой последовательности создают вращающий момент прямой последовательности

$$M_1 = m_1 I_{21}'^2 (R_2'/s)(p/\omega_1). \quad (\text{П2.4})$$

Напряжения обратной последовательности U_{12} , приложенные к обмотке статора, вызывают в ней токи обратной последовательности I_{12} . Токи I_{12} создают поле обратной последовательности, вращающееся с той же скоростью, что и поле прямой последовательности, но в обратную сторону, так как эти токи имеют обратное чередование фаз. Следовательно, скорость вращения поля обратной последовательности

$$n_2 = -n_1 = -f_1/p. \quad (\text{П2.5})$$

Это поле индуцирует во вторичной цепи токи обратной последовательности I_{22}' . Токи I_{12} и I_{22}' создают результирующее магнитное поле обратной последовательности. Скольжение ротора относительно этого поля, или скольжение обратной последовательности $s_2 = (n_2 - n)/n_2 = (-n_1 - n)/-n_1 = (n_1 + n)/n_1$; подставив сюда скорость ротора, выраженную через скольжение прямой последовательности:

$$n = n_1(1 - s) \quad (\text{П2.6})$$

получим

$$s_2 = 2 - s. \quad (\text{П2.7})$$

Для системы токов и напряжений обратной последовательности действительна схема замещения также аналогичная схеме рис. 10.7, однако в схеме для обратной последовательности необходимо вместо скольжения $s_1 = s$ отобразить скольжение $s_2 = 2 - s$.

Токи и поле обратной последовательности создают вращающий момент обратной последовательности

$$M_2 = -m_1 I_{22}'^2 (R_2'/s_2)(p/\omega_1) = -m_1 I_{22}'^2 [R_2'/(2 - s)](p/\omega_1). \quad (\text{П2.8})$$

Знак минус здесь введен по той причине, что при $s_2 > 0$ момент M_2 действует в сторону вращения обратного поля, и является поэтому отрицательным.

На ротор машины действует суммарный вращающий момент

$$M = M_1 + M_2 = [m_1 I_{21}^2 R_2'/s - m_1 I_{22}'^2 R_2'/(2 - s)](p/\omega_1). \quad (\text{П2.9})$$

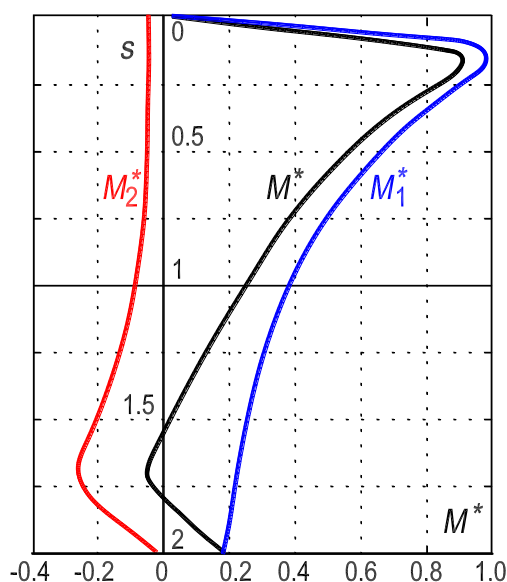


Рисунок П2.2. – Моменты **прямой** (M_1) и **обратной** (M_2) последовательности и результирующий момент (M) асинхронной машины в функции скольжения:

моменты выражены в относительных единицах: $M^* = M/M_H$

В общем случае параметры вторичной цепи R_2' и $X_{\sigma 2}'$ для токов прямой и обратной последовательности различны так как частоты этих токов $f_{21} = sf_1$ и $f_{22} = (2 - s)f_1$ неодинаковы и влияние вытеснения тока сказывается поэтому в различной степени. Это обстоятельство необходимо учитывать при практических расчетах.

На рис. П2.2 изображены кривые моментов M_1 , M_2 и M для случая, когда U_{12} и U_{11} постоянны по значению и $U_{12}/U_{11} = 0,5$. Ввиду преобладания составляющей прямой последовательности режим работы машины в целом определяется действием этой составляющей. Как видно из рис. П2.2, под влиянием токов обратной последовательности результирующий момент двигателя M снижается, скольжение притом же моменте нагрузки на валу $M_{нг}$ увеличивается и, следовательно, увеличиваются потери и нагрев машины, а также уменьшается КПД. Все это является следствием того, что по отношению к системе обратной последовательности машина при $0 < s < 1$ работает в *тормозном режиме* ($1 < s_2 < 2$).

Таким образом, наличие токов обратной последовательности ухудшает условия работы асинхронных двигателей, и поэтому искажение симметрии системы питающих напряжений нежелательно.

П2.2.2. Влияние несимметрии цепи ротора на работу асинхронной машины

Несимметрия электрической цепи ротора может возникнуть вследствие неисправности щеточного устройства (неодинаковое нажатие щеток на разных кольцах), плохого контакта, а также при неодинаковых сопротивлениях фаз ротора.

Рассмотрим, как влияет несимметрия цепей ротора на работу двигателя при симметричном напряжении U_1 сети. Вследствие неравенства сопротивления отдельных фаз цепи ротора токи в них будут неодинаковыми.

Несимметричную систему токов ротора разложим на симметричные составляющие прямой I_{21} и обратной I_{22} последовательностей. Токов нулевой последовательности в цепи ротора не будет.

Токи ротора прямой последовательности I_{21} частоты скольжения $s \cdot f_1$ создадут МДС, вращающуюся в пространстве с скоростью

$$n + n_{2s} = n_1 \cdot (1 - s) + s \cdot n_1 = n_1.$$

Токи ротора обратной последовательности I_{22} , имеющие ту же частоту скольжения $s \cdot f_1$ создают МДС, вращающуюся относительно ротора

со скоростью $n_{2s} = s \cdot n_1$, а относительно статора – со скоростью

$$n_2 = n - n_{2s} = n_1 \cdot (1 - s) - s \cdot n_1 = n_1 \cdot (1 - 2s).$$

Поле, созданное этой МДС, наводит в обмотке статора ЭДС с частотой $f_3 = (1 - 2s)/f_1$, в результате чего в обмотке статора возникнет симметричный трехфазный ток с частотой f_3 ; этот ток будет замыкаться через сеть, сопротивление фаз которой в случае мощной сети можно принять близким к нулю.

Таким образом, при несимметрии фаз ротора в фазах статора возникают два тока: 1) симметричный ток I_{11} с частотой f_1 , обусловленный наличием в цепи ротора тока I_{21} прямой последовательности; 2) симметричный ток I_{13} с частотой f_3 , обусловленный наличием в цепи ротора тока I_{22} обратной последовательности.

При этих условиях в машине возникают два результирующих вращающихся магнитных поля: 1) поле, создаваемое токами I_{11} и I_{21} , скорость вращения которого равна n_1 ; 2) поле, создаваемое токами I_{22} и I_{13} , вращающееся со скоростью n_2 .

В соответствии с этим вращающий момент машины равен $M = M_1 + M_2$, причем момент M_1 создается взаимодействием первого поля с током I_{21} , а момент M_2 – взаимодействием второго поля с током I_{22} .

Момент M_1 при $s > 0$ направлен, как и при симметричном роторе, в сторону его вращения. Момент M_2 совпадает по направлению с моментом M_1 при скольжениях $s > 0,5$, когда $n_2 = n_1 \cdot (1 - 2s) < 0$, т. е. когда второе магнитное поле вращается относительно статора в сторону, обратную вращению ротора*. При $s < 0,5$, когда $n_2 > 0$, т. е. когда второе магнитное поле вращается относительно статора в том же направлении, что и ротор, момент M_2 противодействует его вращению.

На рис. П2.3 показана примерная зависимость моментов M_1 , M_2 и M от скольжения. Как видно из этого рисунка, в кривой результирующего момента M явно выражен провал непосредственно за полусинхронной скоростью, обусловленный наличием в роторе токов обратной последовательности.

Частным случаем несимметрии электрических цепей ротора является размыкание одной его фазы, при котором ротор становится однофазным. Такой случай может возникнуть на практике, если одна из щеток не будет касаться своего кольца.

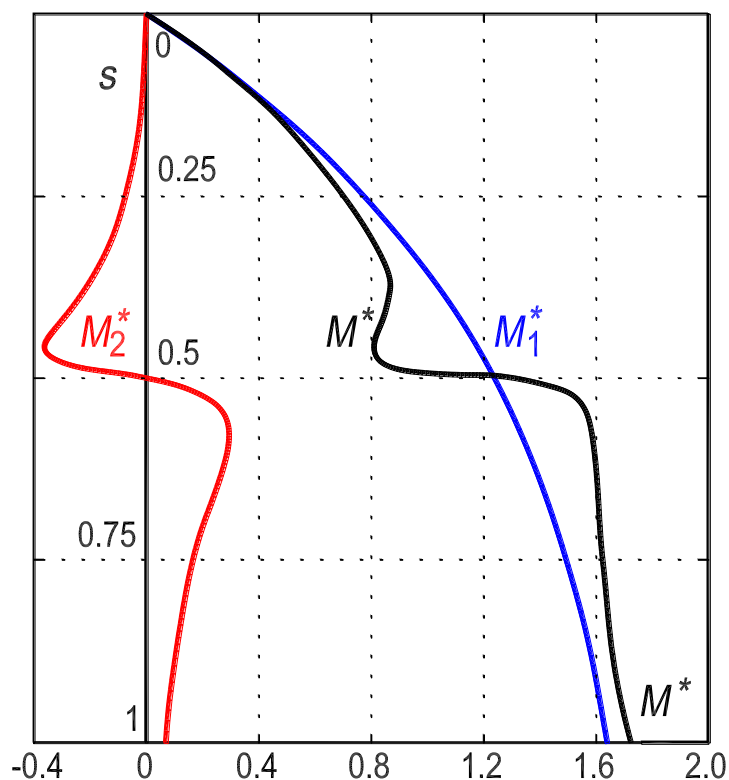


Рисунок П2.3. – Кривые вращающих моментов при несимметрии фаз роторной цепи: моменты выражены в относительных единицах: $M^* = M/M_H$

На рис. П2.4 приведена опытная кривая момента $M = f(s)$ для случая работы асинхронного двигателя с однофазным ротором. Как видно из рисунка, кривая при $s \approx 0,5$ имеет глубокий провал, обусловленный наличием в роторе токов обратной последовательности (при $0,5 > s > \sim 0,33$ вращающий момент становится отрицательным). При наличии такой зависимости между моментом и скольжением двигатель с однофазным ротором при разбеге не может достигнуть номинальной скорости вращения, так как, достигнув скольжения $s \approx 0,5$, будет устойчиво работать при данном моменте сопротивления – $M_{HT} = M$. Для перехода на номинальное скольжение s_H необходимо или приложить дополнительный момент к валу двигателя, или восстановить временно нарушенную симметрию цепей ротора. Это явление, впервые описанное Г. Гергесом (G. Görges) в 1896 г., называют «явлением Гергеса».

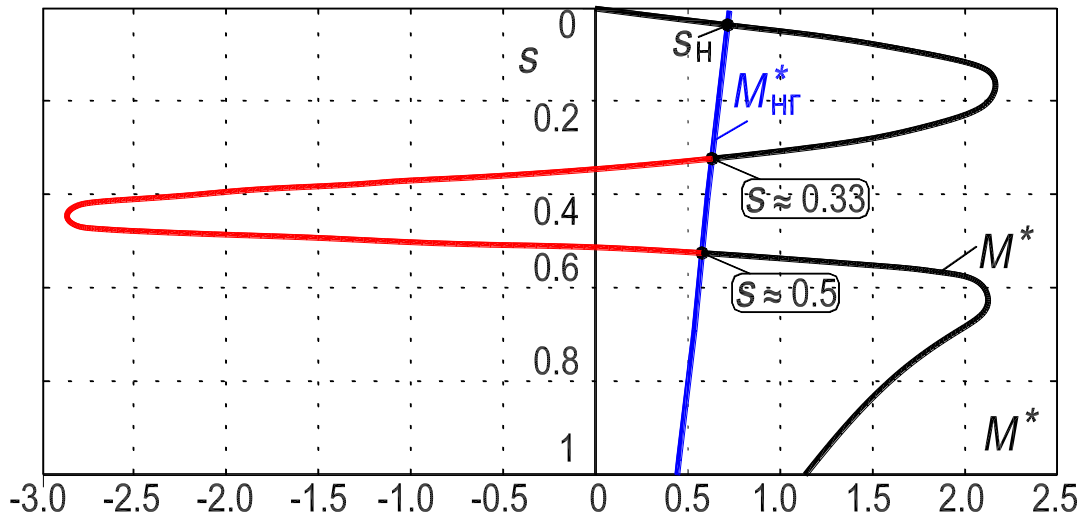


Рисунок П2.4. – Зависимость вращающего момента M от скольжения трехфазного асинхронного двигателя с однофазным ротором

Увеличением активного сопротивления цепи ротора можно уменьшить влияние токов I_{22} . Если момент M_{HT} будет меньше момента M , то двигатель сможет достигнуть скорости вращения, близкой к номинальной, даже при наличии однофазного ротора.

* Этот процесс аналогичен питанию трехфазного двигателя со стороны ротора, когда магнитное поле движется в направлении, обратном направлению вращения ротора.

12. РАБОТА № 3

ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ В СХЕМЕ ОДНОФАЗНОГО ВКЛЮЧЕНИЯ

Оглавление

1. Цель работы	229
2. Программа работы	229
3. Основы теории	230
3.1. Работа трехфазного двигателя при питании одной фазы обмотки статора	230
3.2. МДС двухфазной пространственно-распределенной обмотки	233
3.3. Трехфазный асинхронный двигатель в режиме однофазного включения с конденсатором	236
4. Экспериментальное исследование	239
4.1. Пуск двигателя	239
4.2. Изменение диапазона измерений амперметра <i>РАЗ</i> при работающем двигателе	240
4.3. Опыт холостого хода	242
4.4. Опыт короткого замыкания	243
4.5. Опыт нагрузки. Рабочие характеристики	244
5. Содержание и оформление отчета	247
6. Контрольные вопросы	247
Приложение. Специальные асинхронные машины, используемые в системах автоматического управления	249
П.1. Разновидности специальных асинхронных машин	249
П.2. Управляемые асинхронные двигатели	250
П.3. Тахогенераторы	253
П.4. Синусно-косинусные поворотные трансформаторы	255
П.5. Машины для индукционных систем синхронной связи – сельсины..	258

Рис. 12.1. Зависимость вращающих моментов однофазного двигателя от скольжения	232
Рис. 12.2. Годографы векторов первых гармоник вращающихся МДС	233
Рис. 12.3. Положение силовых линий магнитного поля (<i>a, б, в, г</i>) <i>двухфазной</i> распределенной двухполюсной обмотки в моменты времени $t_1, t_2, t_3, t_4(\vartheta)$	235
Рис. 12.4. Схема (<i>a</i>) и векторные диаграммы (<i>б</i>) однофазного двигателя с пусковой обмоткой	236
Рис. 12.5. Принципиальные электрические схемы обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя для работы в однофазной сети	237
Рис. 12.6. Последовательность перехода с верхнего диапазона измерений токов «15 А» на диапазон измерений токов «7.5 А»	240
Рис. 12.7. Схема лабораторной установки для исследования трехфазного асинхронного двигателя в схеме однофазного включения с пусковым активным сопротивлением	241
Рис. 12.8. Фотография приборной панели лабораторного стенда для исследования трехфазного асинхронного двигателя в схеме однофазного включения	248
Рис. 12.9. Фотография исследуемого агрегата «Однофазный асинхронный двигатель – генератор постоянного тока»	248
Рис. П.1. Схемы включения исполнительного двигателя	251
Рис. П.2. Вид механических (<i>a</i>) и регулировочных (<i>б</i>) характеристик асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном управлении	252
Рис. П.3. Конструктивная схема исполнительного асинхронного двигателя с полым ротором	252
Рис. П.4. Принципиальная схема асинхронного тахогенератора	254
Рис. П.5. Схема соединений синусно-косинусного поворотного трансформатора	256
Рис. П.6. Схема использования однофазных сельсинов в индикаторном режиме	258
Рис. П.7. Конструктивная схема контактного сельсина	259
Рис. П.8. Схема включения сельсинов при работе в трансформаторном режиме	261
Рис. П.9. Управление следящим приводом при помощи сельсинов, работающих в трансформаторном режиме	262

1. Цель работы

Уяснить принцип действия трехфазного асинхронного двигателя, включенного по однофазной схеме, порядок пуска и реверсирования, принципы образования вращающего момента при пуске и в рабочем режиме, степень использования номинальной мощности, причины повышения потерь в роторе по сравнению с трехфазным режимом.

2. Программа работы

2.1. Записать номинальные данные исследуемого двигателя.

2.2. Осуществить пуск двигателя в схеме однофазного включения.

2.3. Провести опыт холостого хода и построить зависимости $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_x)$.

Произвести разделение потерь мощности холостого хода P_x на электрические $p_{э1}, p_{э2}$, магнитные $p_{мг}$ и механические $p_{мх}$ потери.

2.4. Провести опыт короткого замыкания и определить сопротивление обмотки ротора.

2.5. Провести опыт нагрузки двигателя и построить рабочие характеристики $I_1, P_1, M, \cos \varphi_1, \eta = f(P_2)$, где P_2 – механическая вторичная мощность на валу двигателя [термин 21].

3. Основы теории

Вращающийся электромагнитный момент, действующий на ротор в асинхронном двигателе, образуется за счет взаимодействия вращающегося магнитного поля с *активной составляющей тока* ротора. Вращающееся магнитное поле может быть образовано магнитодвижущей силой трехфазной или двухфазной обмотки, а магнитодвижущая сила однофазной обмотки создает неподвижное в пространстве магнитное поле, которое пульсирует во времени с частотой тока, протекающего в обмотке.

На статоре однофазного двигателя расположена двухфазная обмотка: одна фаза называется *рабочей* обмоткой, а другая – *пусковой* обмоткой. Рабочая и пусковая обмотки сдвинуты в пространстве на 90° эл.; последовательно с пусковой обмоткой включается фазосдвигающий элемент – активное или емкостное сопротивление. На рабочую и пусковую обмотки, соединенные параллельно, подается однофазное напряжение. На роторе расположена короткозамкнутая обмотка типа беличья клетка. Таким образом, рассматриваемый асинхронный двигатель по входу является однофазным, а по своей внутренней организации – двухфазным (см. рис. 12.4).

3.1. Работа трехфазного двигателя при питании одной фазы обмотки статора

Работа асинхронного двигателя при несимметрии приложенных напряжений рассмотрена в Прил. 2 Л. Р. №2 (с. 219, сл.). Работа трехфазного двигателя при питании только одной фазы обмотки статора является крайним случаем несимметрии. В этом случае отношение напряжения обратной последовательности U_{12} к напряжению прямой последовательности U_{11} составляет $U_{12}/U_{11} = 1$ (первые индексы соответствуют: «1» – статору, «2» – ротору; вторые индексы соответствуют: «1» – прямой и «2» – обратной последовательности).

Система напряжений прямой последовательности U_{11} обусловит в обмотках статора и ротора токи прямой последовательности, соответственно I_{11} и I_{21} , образующие круговое вращающееся поле (назовем его *прямым* полем).

Система напряжений обратной последовательности U_{12} обусловит в обмотках статора и ротора токи обратной последовательности, соответственно I_{12} и I_{22} , образующие другое круговое вращающееся поле (*обратное* поле).

Если представить, что ротор вращается в направлении прямого поля, то по отношению к этому полю ротор будет иметь скольжение s , а по отношению к обратному полю – скольжение $2 - s$ [см. в Л. Р. №2 выражение (П2.7), с. 222].

Соотношение между токами прямой и обратной последовательности статора $I_{12}/I_{11} = 1$, и между токами прямой и обратной последовательности ротора такое же, $I_{22}/I_{21} = 1$. Поэтому результирующее магнитное поле, получающееся при сложении этих вращающихся полей (магнитопровод предполагается ненасыщенным), имеющих одинаковые амплитуды, будет неподвижным в пространстве, но пульсирующим во времени. Пульсирующее магнитное поле неподвижное в пространстве имеет место, если напряжение подается только на одну фазу трехфазной обмотки статора. В этом случае и ротор будет оставаться неподвижным, его скорость $n = 0$, а скольжение $s = 1$.

Пульсирующее магнитное поле, реально существующее в двигателе при питании одной фазы обмотки статора, для удобства анализа представлено в виде двух вращающихся в противоположных направлениях магнитных полей, причем амплитуды этих вращающихся полей будут равны половине амплитуды пульсирующего магнитного поля [см. рис. 8.17 и формулы (8.4)–(8.7)].

Взаимодействие прямого и обратного вращающихся магнитных полей с активными составляющими токов ротора, соответственно, I_{21} и I_{22} , вызовет равные электромагнитные моменты действующие на ротор в противоположных направлениях, прямом и обратном. Сумма этих моментов при скольжении ротора $s = 1$ будет равна нулю

$$M = M_1 + M_2 = [m_1 I_{21}^2 R_2' / s - m_1 I_{22}^2 R_2'' / (2 - s)](p / \omega_1) = [m_1 I_{21}^2 R_2' / 1 - m_1 I_{22}^2 R_2'' / 1](p / \omega_1) = 0 \quad (12.1)$$

и ротор остается неподвижным, так как пусковой, результирующий, момент равен нулю. Сопротивления обмотки ротора R_2'' и R_2' , соответственно, токам обратной и прямой последовательности при $s = 1$ одинаковы.

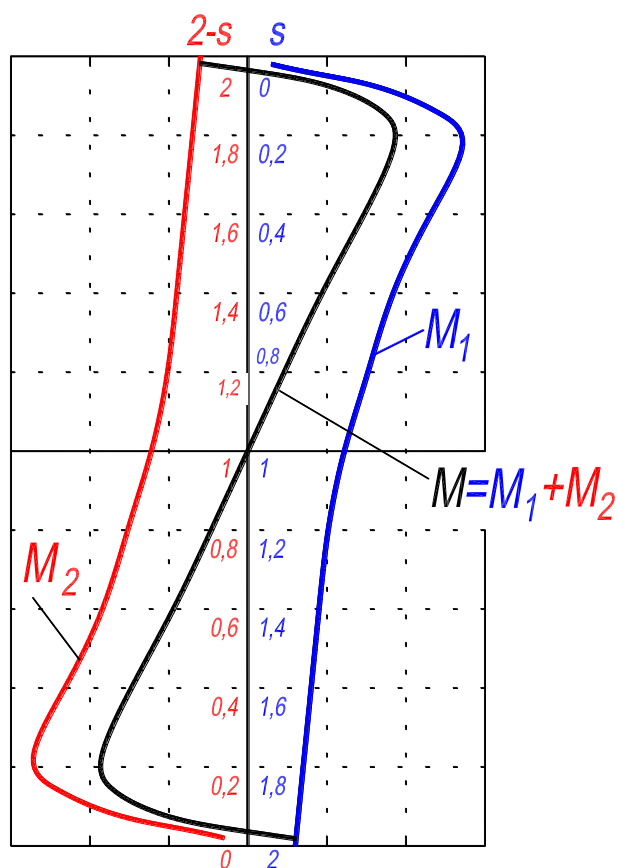


Рисунок 12.1. – Зависимость вращающих моментов однофазного двигателя от скольжения: M_1 – прямой момент; M_2 – обратный момент

Однако, если подтолкнуть ротор, например, в направлении прямого поля, то он будет вращаться в этом направлении, причем момент M_1 будет возрастать, а момент M_2 будет уменьшаться (см. рис. 12.1). Объясняется это тем, что скольжение ротора s относительно прямого поля будет при этом уменьшаться, а скольжение ротора $2 - s$ относительно обратного поля – возрастать.

Также отметим, что при $s = 1$, частота прямого I_{21} и обратного I_{22} токов ротора будет одинаковой, соответственно $f_1 \cdot s$ и $f_1 \cdot (2 - s) = f_1 \cdot s$, но по мере раскручивая двигателя вследствие толчка, частота прямого тока ротора будет уменьшаться, а обратного тока – увеличиваться. Станут также не равными амплитуды прямого и обратного круговых вращающихся полей, результирующее поле будет уже не неподвижным, пульсирующим, а вращающимся и эллиптическим (рис. 12.2).

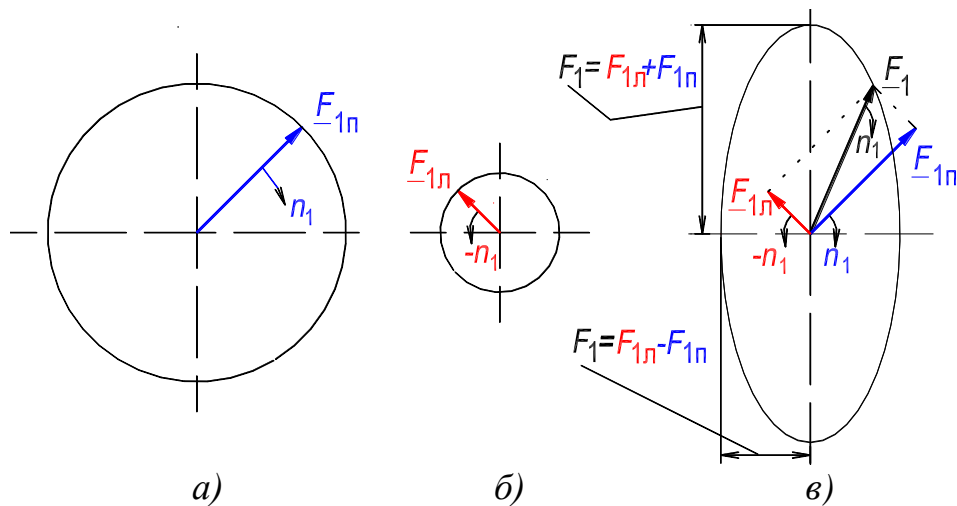


Рисунок 12.2. Годографы векторов первых гармоник вращающихся МДС:

прямое (правовращающееся) круговое поле – (а);

обратное (левовращающееся) круговое поле – (б); эллиптическое магнитное поле – (в)

В однофазном асинхронном двигателе роль первотолчка, примененного к ротору, выполняет фазосдвигающий элемент (см. далее рис. 12.4).

3.2. МДС двухфазной пространственно-распределенной обмотки

МДС двухфазной пространственно-распределенной обмотки, при протекании по ней двухфазного тока, создает вращающееся магнитное поле. Условия создания вращающегося поля заключаются в следующем: 1) фазы U и V должны быть смещены в пространстве на 90° эл.; 2) токи в этих фазах должны быть сдвинуты во времени на 90° .

Покажем, что МДС двухфазной пространственно-распределенной обмотки, при протекании по ней двухфазного тока, создает вращающееся магнитное поле, причем амплитуда этого поля остается неизменной. Такое поле называется *круговым*. Последний термин обусловлен тем, что годографом вектора поля является окружность.

Для фазы U справедливо выражение [см. (8.6)]:

$$\begin{aligned}
 F_{1U}(t, \gamma) &= F_{1U}(t, \gamma) \sin \omega t \cdot \cos \gamma = (F_{1U}/2) \sin(\omega t + \gamma) + (F_{1U}/2) \sin(\omega t - \gamma) = \\
 &= F_{1Uл}(t, \gamma) + F_{1Uп}(t, \gamma).
 \end{aligned}
 \tag{12.2}$$

Для фазы V записывается аналогичное выражение, но с учетом соответствующих углов сдвига во времени и пространстве:

$$\begin{aligned}
 F_{1V}(t, \gamma) &= F_{1V}(t, \gamma) \sin(\omega t - 90^\circ) \cdot \cos(\gamma - 90^\circ) = (F_{1V}/2) \sin(\omega t + \gamma - 180^\circ) + \\
 &+ (F_{1V}/2) \sin(\omega t - \gamma) = F_{1Vл}(t, \gamma) + F_{1Vп}(t, \gamma).
 \end{aligned}
 \tag{12.3}$$

Суммируя левые и правые части выражений (12.2) и (12.3) получаем

искомое выражение для мгновенного значения 1-й гармоники МДС двухфазной обмотки. Оно определяется суммой *правовращающихся* волн МДС фаз U и V :

$$F_1^{(2)}(t, \gamma) = F_{1U}(t, \gamma) + F_{1V}(t, \gamma) = F_{1Uп}(t, \gamma) + F_{1Vп}(t, \gamma) = (F_{1U}/2)\sin(\omega t - \gamma) + (F_{1V}/2)\sin(\omega t - \gamma) = F_{1\phi}\sin(\omega t - \gamma), \quad (12.4)$$

где $F_{1\phi} = F_{1U}/2 + F_{1V}/2 = 0,9IWk_{o1}/p$ – амплитуда 1-й гармоники МДС двухфазной обмотки, которая равна амплитуде 1-й гармоники МДС одной фазы [см. (8.5)].

Очевидно, что *лево*вращающиеся волны МДС фаз U и V в сумме будут равны нулю:

$$F_{1Uл}(t, \gamma) + F_{1Vл}(t, \gamma) = (F_{1U}/2)\sin(\omega t + \gamma) + (F_{1V}/2)\sin(\omega t + \gamma - 180^\circ) = 0. \quad (12.5)$$

Выражение (12.3) определяет *правовращающуюся* волну МДС двухфазной обмотки, амплитуда ее неизменна, а частота вращения составляет $n_1 = +f_1/p$ об/с. Рис. 12.3 иллюстрирует процесс вращения поля, созданного МДС двухфазной обмотки.

(Создание МДС однофазной и трехфазной обмоткой рассмотрено в разд. 8.3).

В результате взаимодействия вращающегося магнитного потока с активной составляющей тока, протекающего в обмотке ротора, на ротор двухфазного асинхронного двигателя будет действовать электромагнитный момент. Под действием этого момента ротор двухфазного асинхронного двигателя будет вращаться.

Так как двухфазная система переменного тока не вырабатывается в промышленном масштабе, то на практике для ее создания в одну из фаз двухфазной обмотки включается дополнительное сопротивление $Z_{п}$: активное, индуктивное или емкостное (рис. 12.4). Фаза, в которую включено фазосдвигающее сопротивление $Z_{п}$ называется пусковой, а другая фаза – рабочей. Целью включения этого сопротивления является достижение сдвига токов по фазе на угол ψ , протекающих в фазах двухфазной обмотки. Очевидно, что наилучший результат получается при включении емкостного сопротивления, рис. 12.4,б. Пуск двигателя с помощью индуктивного сопротивления дает наихудшие результаты и почти не используется.

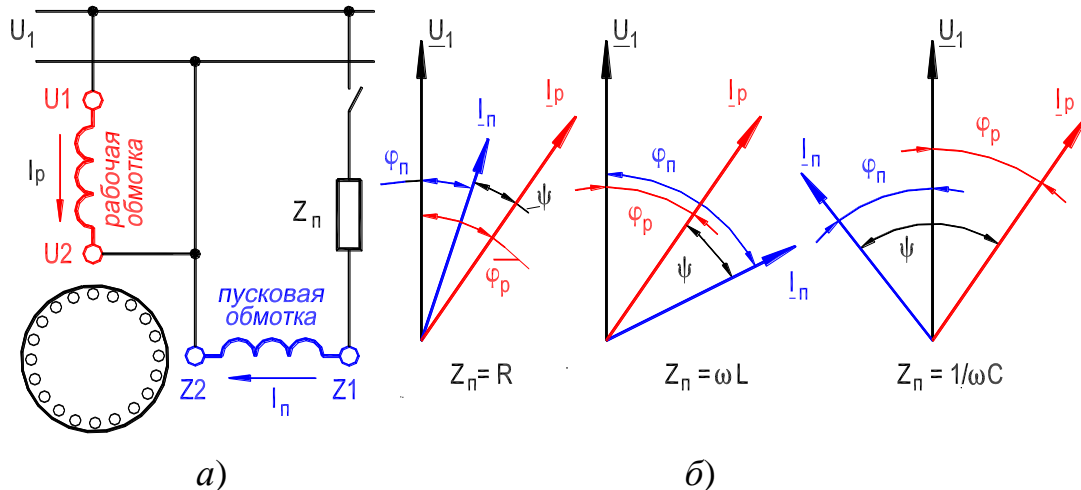


Рисунок 12.4. – Однофазный двигатель с пусковой обмоткой:
 схема двигателя – (а); векторные диаграммы – (б)

В России изготавливаются однофазные асинхронные двигатели единой серии с пусковым активным сопротивлением, с пусковой емкостью и конденсаторные с рабочей и пусковой емкостью мощностью от 18 до 600 Вт. Двигатели с пусковым активным сопротивлением применяются в стиральных и холодильных машинах, доильных аппаратах, машинах для стрижки овец, центрифугах, для привода малых станков и т. д. Двигатели с конденсаторным пуском используются при повышенных требованиях к пусковому моменту (установки для кондиционирования воздуха, компрессоры и др).

3.3. Трехфазный асинхронный двигатель в режиме однофазного включения с конденсатором

Асинхронный двигатель, работающий в сети однофазного тока с конденсатором в его цепи, называется *конденсаторным*.

Трехфазный двигатель при определенном включении может работать как однофазный. На рис. 12.5 показаны принципиальные электрические схемы включения трехфазного двигателя для его питания от однофазной сети.

Для схем, представленных на рисунке, рабочая емкость C_p (рабочий конденсатор) и пусковая емкость C_n (пусковой, отключаемый, конденсатор) при частоте напряжения сети 50 Гц рассчитываются по следующим формулам:

- ❖ схема на рис.12.5,а $C_p \approx 2800I_n/U$, мкФ;
- ❖ схема на рис.12.5,б $C_p \approx 4800I_n/U$, мкФ;

❖ схема на рис.12.5,в $C_p \approx 1600I_H/U$, мкФ;

❖ схема на рис.12.5,г $C_p \approx 2740I_H/U$, мкФ,

где I_H – номинальный фазный ток трехфазного двигателя, А; U – напряжение сети, В.

Исходя из условия получения пускового момента, близкого к номинальному (при трехфазном включении), необходимо для всех схем иметь емкость пускового конденсатора $C_{п} \approx (2,5 \div 3) \cdot C_p$.

Наиболее рациональной схемой включения конденсаторного двигателя является схема рис.12.5,г.

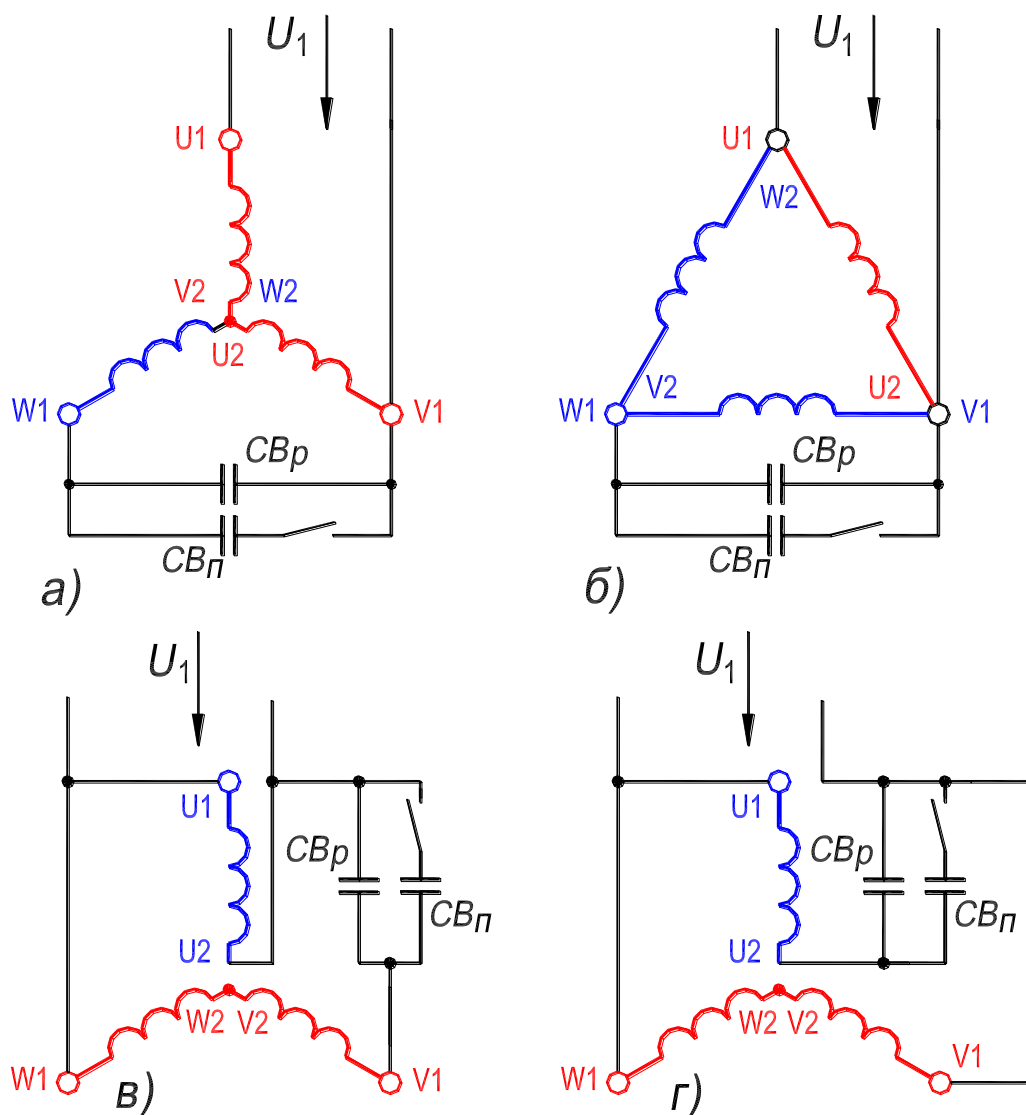


Рисунок 12.5. – Принципиальные электрические схемы обмотки статора трехфазного асинхронного двигателя для работы в однофазной сети: C_{Bp} – рабочий конденсатор; $C_{Bп}$ – пусковой конденсатор, отключаемый

После окончания пуска фаза с пусковым конденсатором отключается. Пусковые конденсаторы работают непродолжительное время; всего несколько секунд или доли секунды за весь период включения. Это позволяет использовать при пуске наиболее дешевые электролитические конденсаторы, специально предназначенные для этой цели.

Для запуска и работы конденсаторных двигателей используются пленочные конденсаторы К78-36. Металлизированная полипропиленовая пленка обладает свойством самовосстановления. Преимуществами пленочных конденсаторов являются улучшенные массогабаритные показатели.

Двигатели с соединением обмоток согласно схемам рис. 12.5 практически равноценны двигателям, которые спроектированы для работы как однофазные. Номинальная мощность трехфазных асинхронных двигателей при однофазном включении составляет примерно 40–50 % от мощности в симметричном трехфазном режиме.

Предельной мощностью конденсаторного двигателя общего назначения, имеющего трехфазную обмотка статора, можно считать мощность 1,5 кВт, указанную на щитке двигателя. Это обусловлено тем, что уже при мощности в 1 кВт стоимость рабочего конденсатора примерно равна стоимости двигателя.

Огромное число асинхронных трехфазных двигателей имеет мощность от нескольких десятков и сотен ватт до 1,5 кВт. В связи с освоением отечественными заводами технологии изготовления высококачественных конденсаторов с небольшим удельным весом, становится реальной возможность широкого использования конденсаторных двигателей особенно в условиях сельского хозяйства, где мощность многих машин животноводческих ферм не превышает 1 кВт (см. разд. 5, с. 26, сл. Механизмы сельскохозяйственного назначения с электродвигателями к ним).

4. Экспериментальное исследование

Исследуется трехфазный асинхронный двигатель типа А41/4 в схеме однофазного включения с пусковым активным сопротивлением. На рис. 12.7 представлены схема лабораторной установки и номинальные данные двигателя. Установка состоит из двигателя, сопряженного с ним генератора постоянного тока типа ПН-17,5 и пускового сопротивления RR_{Π} . Фазосдвигающее сопротивление RR_{Π} включено в пусковую фазу V обмотки статора. В качестве рабочей обмотки используются фазы U и W , включенные по схеме неполной звезды. После того как двигатель в процессе пуска достигает установившуюся скорость вращения пусковую фазу V отключить.

Посредством генератора создается нагрузка на валу исследуемого двигателя: электромагнитный момент генератора направлен навстречу моменту, развиваемому двигателем. Номинальные данные генератора приведены на рис. 12.7.

Пусковые условия трехфазного двигателя в схеме однофазного включения будут лучшими, если в качестве фазосдвигающего элемента использовать конденсатор.

Значение омического сопротивления фазы обмотки статора:
 $R = 1,33 \text{ Ом}$.

4.1. Пуск двигателя

Пуск трехфазного двигателя на холостой ход в схеме однофазного включения с пусковым активным сопротивлением RR_{Π} осуществить следующим образом.

1. Установить верхнее значение диапазона измерений амперметр $PA3$ на 15 А, цена деления – 1,0 А/дел;
2. Включить автомат QF : подключена пусковая фаза V с фазосдвигающим сопротивлением RR_{Π} (оно расположено под столешницей);
3. Установить рукоятку на шкале автотрансформатора на пониженное напряжение $U_1 = 115 \text{ В}$;
4. Включить автомат $QF1$: ротор двигателя начнет вращаться;
5. После того, как ток рабочей обмотки примет установившееся значение (амперметр $PA3$), отключить автоматом QF пусковую фазу V от электросети;

6. Плавно увеличить автотрансформатором значение напряжения до номинального, $U_{1H} = 220$ В (вольтметр *PV1*). При установившемся значении токов и скорости пуск двигателя завершен.

При напряжении $U_{1H} = 220$ В измерить бесконтактным цифровым тахометром установившуюся частоту вращения ротора n_x (отражающая метка расположена на левом, выступающем, конце вала двигателя). Показание записать.

Двигатель от электросети не отключать

4.2. Изменение диапазона измерений амперметра *РАЗ* при работающем двигателе

В таблице приведены значения четырех диапазонов измерения и цены деления амперметра *РАЗ* (см. обозначение этого амперметра на рис. 12.7).

Диапазон измерений, А	15	7,5	3	1,5
Цена деления $K_{ам}$, А/дел	1	0,5	0,2	0,1

1) На рис. 12.6,а из гнезда «*x**» выходят два проводника:

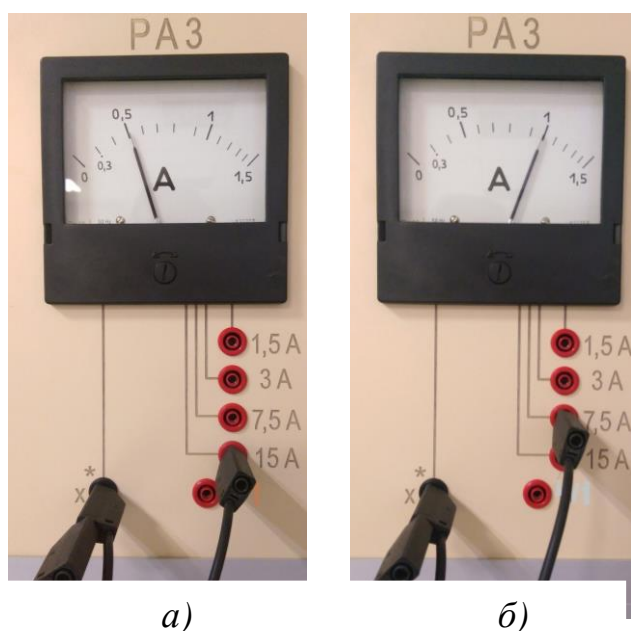


Рисунок 12.6. – К иллюстрации перехода с диапазона измерений токов «15 А» на диапазон измерений токов «7,5 А»

б) вынуть проводник из гнезда «15 А» и вставить в гнездо «7,5 А» (см. рис. 12.6 и 12.7);

в) вынуть конец **красного** проводника из гнезда «*W1*» и оставить его «висящим».

На этом процесс перехода на диапазон измерений токов 7.5 А завершен.

1-й, черный, он соединяет на рис. 12.7 гнезда «*x**» и «*x*»;

2-й, красный, он в опытах «*висит*» из гнезда «*x**» (см. рис. 12.7);

2) На рис. 12.6,а из гнезда «15 А» выходит один проводник: он соединяет на рис. 12.7 гнезда «15 А» и «*W1*»; именно этот проводник необходимо переставить в гнездо «7,5 А» (или другое) не разрывая цепь с током;

3) Последовательность перехода:

а) «*висящий*» конец **красного** проводника (рис. 12.7) вставить в гнездо «*W1*» (это начало фазы *W*): амперметр *РАЗ* зашунтирован, стрелка прибора находится на нуле;

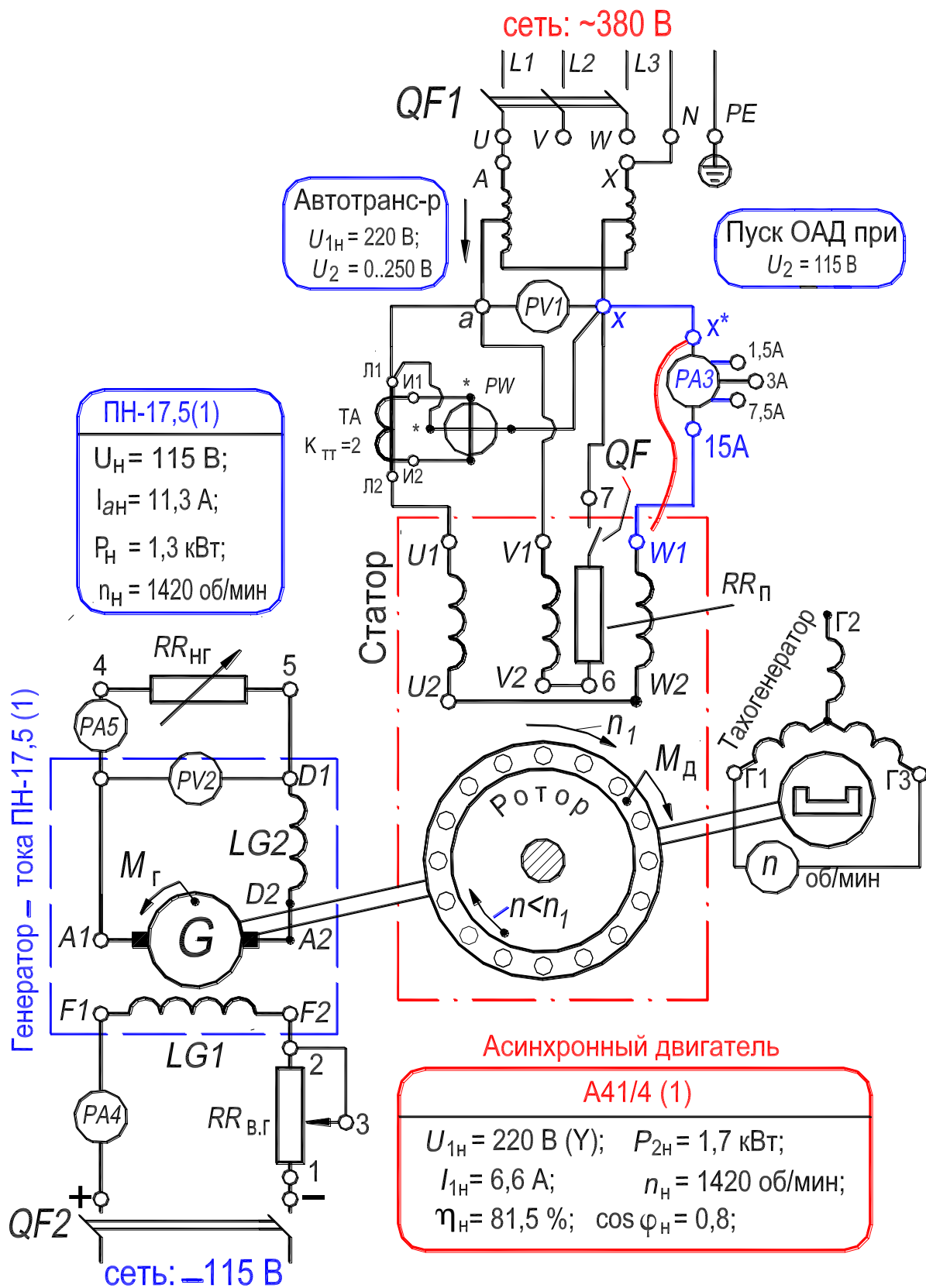


Рисунок 12.7. – Схема лабораторной установки для исследования трехфазного асинхронного двигателя в схеме однофазного включения с пусковым активным сопротивлением

Расчетные величины определить в следующем порядке.

1) Ток холостого хода I_x по формуле $I_x = K_{ам} \cdot I_{x,д}$, А. (12.6)

2) Потери холостого хода P_x и коэффициент мощности по формулам:

$$P_x = K_{вт} \cdot K_{тт} \cdot P_{x,д} = K_{вт} \cdot 2 \cdot P_{x,д}, \text{ Вт}, \quad (12.7)$$

$$\cos \varphi_x = \sqrt{3} \cdot P_x / 2 \cdot U_x I_x. \quad (12.8)$$

3) Разделение потерь холостого хода (определение магнитных $p_{мг}$ и механических $p_{мх}$ потерь).

$$P_x = p_{э1} + p_{э2} + p_{мг} + p_{мх}, \text{ Вт}, \quad (12.9)$$

где $p_{э1}$ – электрические потери в рабочей обмотке; $p_{э2}$ – электрические потери в обмотке ротора (тип обмотки – «беличья клетка»).

Порядок разделения потерь P_x на составляющие – см. разд. 4.4, п. 3) в Л. Р. №2, с. 198.

Для разделения потерь холостого хода P_x необходимо построить зависимость

$$p_{мг} + p_{мх} = P_x - (p_{э1} + p_{э2}) = f(U_x^2). \quad (12.10)$$

$$\text{Электрические потери в рабочей обмотке } p_{э1} = 2 \cdot I_x^2 R_{1(75^\circ)}, \quad (12.11)$$

где $R_{1(75^\circ)}$ – сопротивление *одной фазы* обмотки, приведенное к расчетной рабочей температуре двигателя, составляющей 75 °С [сопротивление $R_{1(75^\circ)}$ определить по формуле (11.9) в Л. Р. №2, с. 198]. Величина сопротивления $R_{1(t)} = R_{1(20^\circ)}$ приводится в паспорте двигателя и составляет 1,33 Ом.

Электрические потери *в обмотке ротора* $p_{э2}$ на холостом ходу обусловлены током обратной последовательности, индуцированным в ней вращающимся полем обратной последовательности. Можно принять, что этот ток составляет половину от тока холостого хода I_x , тогда электрические потери в обмотке ротора определяют из выражения $p_{э2} = I_x^2 R'_2 / 4$, где R'_2 – приведенное сопротивление обмотки ротора [см. ниже разд. 4.4, п. 4)].

4.4. Опыт короткого замыкания

В опыте короткого замыкания ротор должен быть неподвижен. Для этого отключить пусковую фазу V от электросети, установив автомат QF в положение «Отключено».

В опыте измеряют следующие величины: подведенное напряжение (вольтметр PVI), ток рабочей обмотки (амперметр $PA3$, его диапазон измерений установлен на 7,5 А); активную мощность, потребляемую

двигателем из электросети (ваттметр PW включен через трансформатор тока TA , его коэффициент трансформации $K_{\text{ТТ}} = 2$). Установить верхнее значение диапазона измерений ваттметра PW по напряжению на 150 В, по току на 5 А, цена деления – 5 Вт/дел.

Опыт короткого замыкания осуществить в следующей последовательности:

1. Установить *рукоятку на шкале* автотрансформатора на *пониженное* напряжение $U_1 \approx 60$ В;
2. При полной остановке двигателя, включить автомат $QF1$: на рабочую обмотку подано напряжение; ротор неподвижен, так как пусковая фаза V отключена от электросети. Двигатель находится в режиме короткого замыкания;
3. Отрегулировать напряжение U_1 так, чтобы в рабочей обмотке протекал номинальный ток $I_{1\text{н}} = 6,6$ А;
4. Занести показания измерительных приборов $PV1$, $PA3$ и PW в табл. 12.2.

Двигатель отключить автоматом $QF1$ от электросети.

Таблица 12.2. – Измерение и расчет и характеристик короткого замыкания

Измерение			Расчет			
$U_{\text{к}}$	$I_{\text{к.д}}$	$P_{\text{к.д}}$	$I_{\text{к}} = I_{1\text{н}}$	$P_{\text{к}}$	$R_{\text{к}}$	R'_2
В	дел.	дел.	А	Вт	Ом	Ом

Расчетные величины определить в следующем порядке:

- 1) Ток короткого замыкания $I_{\text{к}}$ по формуле $I_{\text{к}} = K_{\text{ам}} \cdot I_{\text{к.д}}$, А; (12.12)
- 2) Потери короткого замыкания по формуле:

$$P_{\text{к}} = K_{\text{вт}} \cdot K_{\text{тт}} \cdot P_{\text{к.д}} = K_{\text{вт}} \cdot 2 \cdot P_{\text{к.д}}, \text{ Вт};$$
 (12.13)
- 3) Сопротивление короткого замыкания – $R_{\text{к}} = P_{\text{к}}/I_{\text{к}}^2$; (12.14)
- 4) Приведенное сопротивление обмотки ротора – $R'_2 = R_{\text{к}} - 2 \cdot R_{1(75^\circ)}$. (12.15)

4.5. Опыт нагрузки. Рабочие характеристики

В процессе опыта поддерживать автотрансформатором напряжение, подведенное к рабочей обмотке двигателя, неизменным и равным номинальному значению, $U_{1\text{н}} = 220$ В. Номинальное значение частоты напряжения, 50 Гц, задано сетью.

В опыте измеряют следующие величины: подведенное напряжение (вольтметр $PV1$); ток рабочей обмотки (амперметр $PA3$, его диапазон измерений двигателя установлен на 15 А); активную мощность, потребляемую

двигателем из электросети (ваттметр PW включен через трансформатор тока TA ; его коэффициент трансформации $K_{ТТ} = 2$. Установить верхнее значение диапазона измерений ваттметра PW по напряжению на 300 В, по току на 5 А, цена деления – 10 Вт/дел). Частоту вращения ротора n измерять бесконтактным цифровым тахометром.

Опыт нагрузки выполнить в следующей последовательности:

1. Запустить двигатель на холостой ход (см. разд. 4.1, пп. 1–6);
2. Автоматом $QF2$ подключить обмотку возбуждения LGI генератора постоянного тока к источнику постоянного тока (рис. 12.7) и реостатом $RR_{в.г}$ установить ток в обмотке примерно равным 0,4 А (амперметр $PA4$);
3. Установить пакетные выключатели нагрузочного реостата $RR_{нг}$ (включен в цепь обмотки якоря генератора) в положение «Включено»;
4. Реостатами $RR_{нг}$ и $RR_{в.г}$ отрегулировать электромагнитный момент генератора так, чтобы асинхронный двигатель потреблял из электросети ток, примерно равный $1,2 \cdot I_{1н} = 1,2 \cdot 6,6 \approx 8$ А (амперметр $PA3$);
5. Разгружая двигатель *вплоть до холостого хода*, уменьшать ток в рабочей обмотке двигателя с шагом примерно 0,5–1 А. Записывать в табл. 12.3 показания измерительных приборов PVI , $PA3$ и PW при каждом дискретном значении тока (произвести одно из измерений при номинальном токе $I_{1н} = 6,6$ А).

По данным опыта построить рабочие характеристики двигателя $I_1, P_1, M, \cos \varphi_1, \eta = f(P_2)$.

Таблица 12.3. – Измерение и расчет рабочих характеристик

Измерение				Расчет												
$U_{1н}$	$I_{1.д}$	$P_{1.д}$	n	I_1	P_1	$p_{э1}$	$p_{э2}$	$p_{мг}$	$p_{мх}$	$p_{дб}$	Σp	s	P_2	η	M	$\cos \varphi_1$
В	дел.	дел.	об/мин	А	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	Вт	-	Вт	%	Н·м	-

Расчетные величины определить в следующем порядке:

1) Ток в рабочей обмотке двигателя по формуле: $I_1 = K_{ам} \cdot I_{1,д}$, А. (12.16)

2) Активная мощность, потребляемая двигателем из электросети, по формуле:

$$P_1 = K_{вт} \cdot K_{тт} \cdot P_{1,д} = K_{вт} \cdot 2 \cdot P_{1,д}, \text{ Вт.} \quad (12.17)$$

3) Полезная мощности на валу P_2 и коэффициент полезного действия η ; используется *метод косвенного определения* КПД. Согласно методу вторичную мощность P_2 выражают через первичную мощность P_1 и сумму всех потерь мощности Σp в двигателе:

$$P_2 = P_1 - \Sigma p, \quad (12.18)$$

а коэффициент полезного действия определяют по формуле:

$$\eta = 100 \cdot (1 - \Sigma p / P_1), \%, \quad (12.19)$$

где $\Sigma p = p_{э1} + p_{мг} + p_{мх} + p_{э2} + p_{дб}$.

Составляющие потерь мощности определяют по формулам:

а) Электрические потери в рабочей обмотке статора:

$$p_{э1} = 2 \cdot I_1^2 R_{1(75^\circ)}; \quad (12.20)$$

б) Электрические потери в обмотке ротора:

$$p_{э2} = s \cdot P_{эм} = s [P_1 - (p_{э1} + p_{мг})], \quad (12.21)$$

где $s = (n_1 - n) / n_1$ – скольжение ротора двигателя; $n_1 = 60 f_1 / p = 60 \cdot 50 / 2 = 1500$ об/мин – синхронная частота вращения первой гармоники магнитного поля; $P_{эм}$ – электромагнитная мощность двигателя, она передается со статора на ротор через воздушный зазор посредством вращающегося магнитного поля;

в) Механические $p_{мх}$ и магнитные $p_{мг}$ потери мощности определены в опыте холостого хода при номинальном напряжении $U_{1н} = 220$ В, подведенном к рабочей обмотке двигателя (см. табл. 12.1);

г) Добавочные потери $p_{дб} = 0,005 \cdot P_1 (I_1 / 1,2 \cdot I_{1н})^2$, (12.22)

где P_1 – мощность, потребляемая из сети при токе обмотки статора $I_1 = 1,2 \cdot I_{1н}$.

После определения всех составляющих потерь мощности находят вторичную мощность P_2 по формуле (12.18) и КПД η по формуле (12.19).

4) Вращающий момент двигателя определяют по формуле:

$$M = 9,55 \cdot P_2 / n, \text{ Н} \cdot \text{м.} \quad (12.23)$$

5) Коэффициент мощности трехфазного двигателя в схеме однофазного включения определяют по формуле:

$$\cos \varphi_1 = \sqrt{3} \cdot P_1 / 2 U_{1н} I_1. \quad (12.24)$$

5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы.
4. Номинальные данные асинхронного двигателя.
5. Номинальные данные генератора постоянного тока.
6. Схему испытаний.
7. Результаты опытов и расчетов, представленных в таблицах 12.1–12.3; ниже каждой таблицы приводятся формулы для расчета величин. Затем размещаются графические зависимости (пп. 8.1–8.4), соответствующие таблице.
8. Экспериментальные и расчетные графические зависимости:
 - 8.1. $p_{\text{МГ}} + p_{\text{МК}} = f(U_x^2)$ – график разделения потерь мощности;
 - 8.2. $I_x, P_x, \cos \varphi_x = f(U_x)$ – характеристики холостого хода;
 - 8.3. $I_k, P_k, \cos \varphi_k = f(U_k)$ – характеристики короткого замыкания;
 - 8.4. $I_1, P_1, M, \cos \varphi_1, \eta = f(P_2)$ – рабочие характеристики.

Текст отчета оформить в текстовом процессоре *MS Word* (шрифт *Times New Roman*, 12 пт.). Графики строить в интерактивном графическом пакете *Grapher*. Схему опыта вычертить в интерактивном графическом пакете *AutoCAD*. Отчет подшить в простую папку-скоросшиватель. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

6. Контрольные вопросы

1. Объяснить, как создается вращающий электромагнитный момент при пуске трехфазного асинхронного двигателя, включенного по однофазной схеме.
2. Объяснить порядок пуска трехфазного асинхронного двигателя, включенного по однофазной схеме.
3. Как создается вращающий электромагнитный момент после отключения пусковой обмотки вращающегося трехфазного асинхронного двигателя, включенного по однофазной схеме?
4. Объяснить причину повышения потерь в обмотке ротора трехфазного асинхронного двигателя, включенного по однофазной схеме.

5. Почему максимальный момент в трехфазном асинхронном двигателе, включенном по однофазной схеме меньше, чем при включении по трехфазной схеме.
6. Как зависят электрические и магнитные потери в роторе от частоты его вращения?
7. Какое по характеру сопротивление: активное R , индуктивное X_L или емкостное X_C , обеспечивает наилучшее условие пуска при включении его в цепь пусковой обмотки?

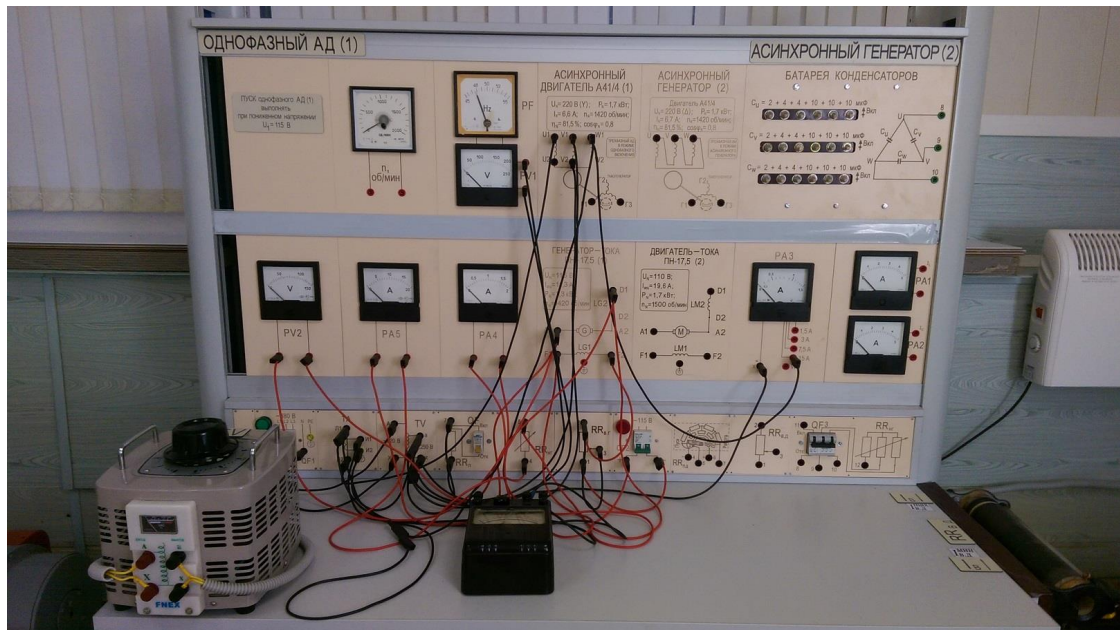


Рисунок 12.8. – Фотография приборной панели лабораторного стенда для исследования трехфазного асинхронного двигателя в схеме однофазного включения



Рисунок 12.9. – Фотография исследуемого агрегата «Однофазный асинхронный двигатель – генератор постоянного тока» (номинальные данные – см. рис. 12.7)

Специальные асинхронные машины, используемые в системах автоматического управления

II.1. Разновидности специальных асинхронных машин

Асинхронные машины широко используются в разнообразных системах автоматических устройств. В зависимости от назначения, условий работы и выполняемых функций к асинхронным машинам автоматических устройств предъявляются различные требования в отношении скоростей вращения, пусковых характеристик, инерционности, условий питания и т. п.

Обычно такие машины имеют номинальную мощность, лежащую в пределах от долей ватта до долей киловатта, и потому носят название асинхронных микромашин.

Далее будут рассмотрены основные типы асинхронных микромашин. Теория их рабочего процесса во многом совпадает с теорией обычных асинхронных машин, поэтому будут рассмотрены особенности их рабочего процесса и устройства.

В зависимости от функций, которые выполняют асинхронные микромашины, работающие в схемах автоматики, вычислительной техники или телемеханики, они могут быть разделены на две группы:

- 1) *основные* – исполнительные, предназначенные для осуществления определенных управляющих функций;
- 2) *вспомогательные* – силовые, используемые для электропривода отдельных узлов автоматизированной системы.

Исполнительные асинхронные микромашины можно подразделить в свою очередь на следующие группы:

1. *Исполнительные двигатели*, предназначенные для преобразования подводимого к ним электрического сигнала (напряжение управления) в механическое перемещение вала.
2. *Тахогенераторы*, служащие для преобразования механического вращения ротора в электрический сигнал (напряжение).
3. *Поворотные трансформаторы*, преобразующие механический угол поворота ротора в электрический сигнал (напряжение) заданной формы.
4. *Машины синхронной связи* (сельсины), служащие для синхронного и синфазного поворота или вращения двух или нескольких механически не связанных между собой роторов.

П.2. Управляемые асинхронные двигатели

Управляемые двухфазные асинхронные двигатели малой мощности широко применяются в точных приборных и следящих системах, в счетно-решающих устройствах. Они используются и в качестве *исполнительных двигателей* автоматических устройств промышленного назначения малой мощности.

Исполнительные асинхронные двигатели питаются обычно от однофазной сети, имеют короткозамкнутый ротор и две обмотки на статоре, сдвинутые в пространстве на 90° эл.:

- 1) рабочую, называемую также обмоткой возбуждения (ОВ), постоянно присоединенную к сети;
- 2) обмотку управления (ОУ), к которой напряжение подводится тогда, когда двигатель должен прийти во вращение.

От *амплитуды и фазы напряжения, подводимого к обмотке управления*, зависят вращающий момент, направление вращения ротора и характер исполнительной функции двигателя. К исполнительным двигателям предъявляются обычно следующие требования: 1) устойчивая работа во всем диапазоне скоростей вращения; 2) изменение скорости вращения в широких пределах при изменении сигнала управления; 3) близкая к линейной зависимость вращающего момента от сигнала управления; 4) большой начальный пусковой момент; 5) быстроедействие; 6) относительно малая мощность управления; 7) отсутствие самопроизвольного хода, т. е. самоторможение ротора при снятии сигнала управления; 8) малая термочувствительность; 9) повышенная надежность; 10) малые габариты и вес.

Схемы включения исполнительных асинхронных двигателей приведены на рис. П.1. Напряжение \underline{U}_2 сети управления может быть в общем случае не равно \underline{U}_1 . В схеме *a* напряжение \underline{U}_y на обмотке управления может меняться как по амплитуде, так и по фазе с помощью специального регулирующего устройства. В схеме *б* меняется амплитуда напряжения, подводимого к обмотке управления.

В обеих схемах в двигателе после подачи сигнала на обмотку управления, возникает в общем случае эллиптическое вращающееся магнитное поле (см. рис. 12.2, с. 233), и ротор двигателя приходит во вращение.

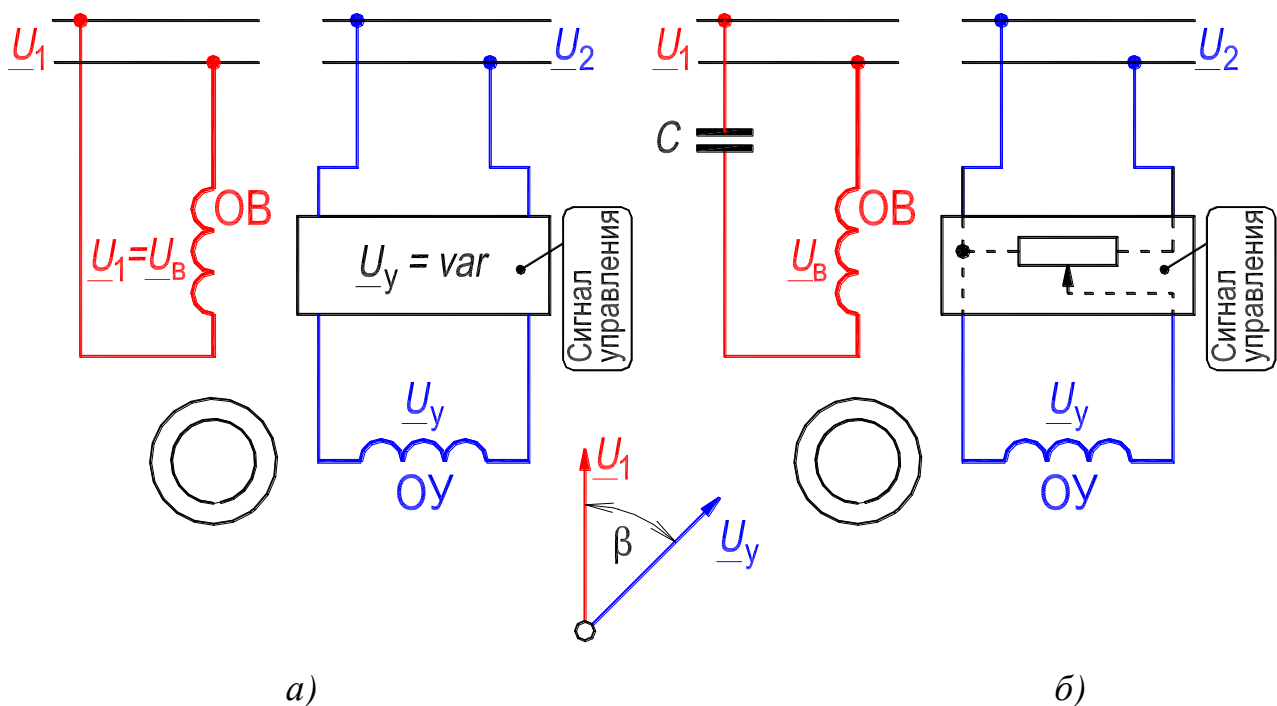


Рисунок П.1. – Схемы включения исполнительного двигателя:

ОВ – обмотка возбуждения; ОУ – обмотка управления

Регулирование скорости вращения исполнительного асинхронного двигателя чаще всего осуществляется путем изменения амплитуды напряжения, подаваемого к обмотке управления при $U_1 = \text{const}$ и $\beta = \text{const}$. Механические характеристики двигателя для этого случая (зависимость вращающего момента M от скорости ротора n при заданном сигнале управления U_y), показаны на рис. П.2,а. На рис. П.2,б приведены регулировочные характеристики двигателя (зависимость скорости ротора n от сигнала управления U_y при заданном моменте сопротивления M)

Как видно из кривых на рис. П.2,а, во всем диапазоне изменений скорости имеет место устойчивая работа исполнительного двигателя (см. Л. Р. №1, разд. 3.8.5).

Обычно асинхронные исполнительные двигатели проектируются таким образом, что круговое вращающееся поле имеет место только при пуске в ход при сигнале управления $\underline{U}_y = \underline{U}_{y,н} = \underline{U}_1$. При всех других режимах в двигателе образуется эллиптическое поле.

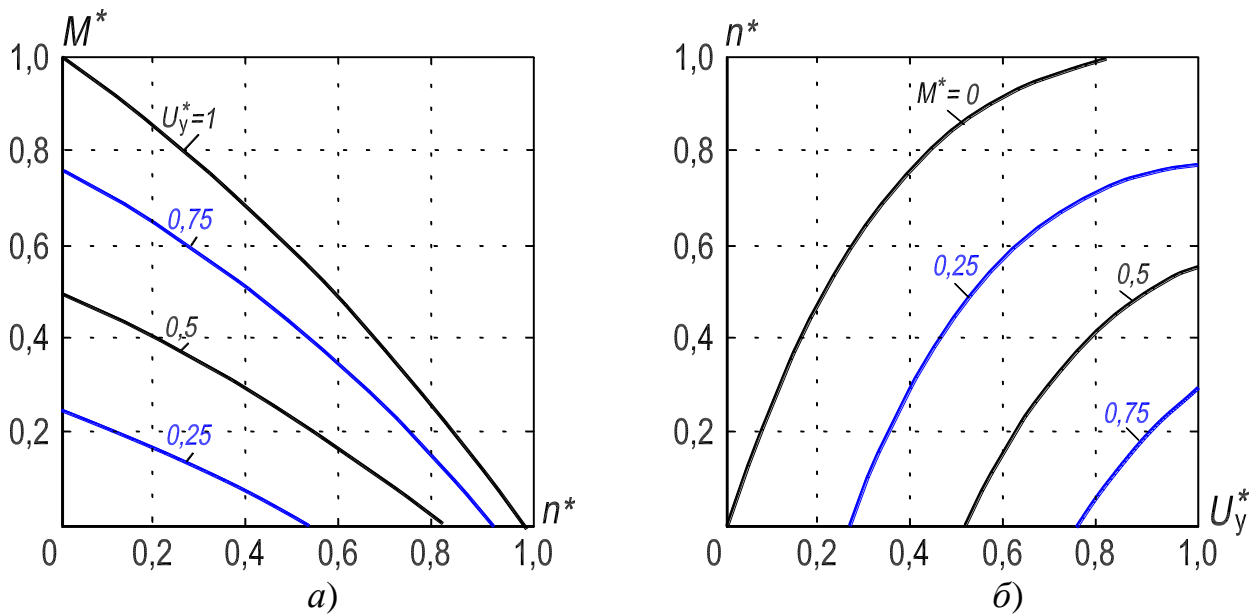


Рисунок П.2. – Вид механических – (а) и регулировочных – (б) характеристик асинхронного исполнительного двигателя при амплитудном управлении.
 Момент, скорость ротора и сигнал управления выражены в относительных единицах:

$$M^* = M/M_H, n^* = n/n_H, U_y^* = U_y/U_{y.H}$$

Линейной зависимости скорости вращения (или скольжения) ротора от сигнала управления не всегда удается достигнуть. Приближение к линейной зависимости тем легче осуществить, чем больше активное и чем меньше индуктивное сопротивление ротора (см. Л. Р. №2, разд. 3.1).

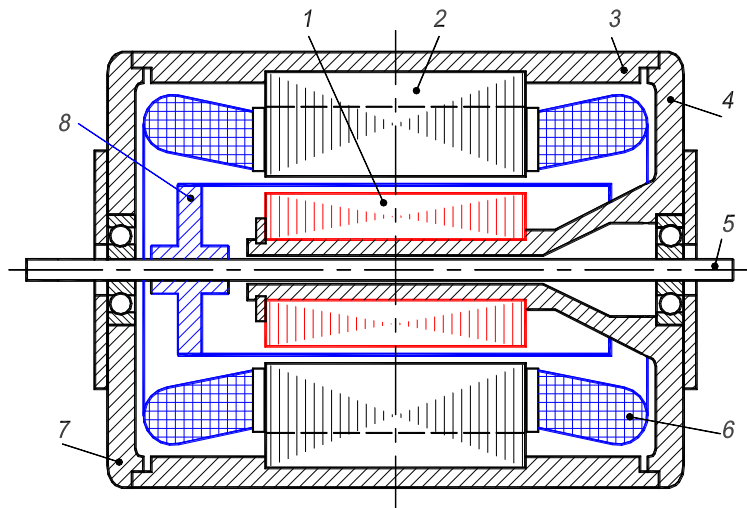


Рисунок П.3. – Конструктивная схема исполнительного асинхронного двигателя с полым ротором: 1 – внутренний неподвижный сердечник статора; 2 – внешний неподвижный сердечник статора; 3 – корпус статора; 4, 7 – подшипниковые щиты; 5 – вал; 6 – обмотка статора; 8 – вращающийся полый ротор

Быстродействие исполнительного двигателя характеризуется временем (считая от момента подачи сигнала), в течение которого его ротор достигает заданной скорости вращения. Это время тем меньше, чем больше пусковой момент двигателя и чем меньше момент инерции ротора. С целью увеличения быстродействия *ротор исполнительного двигателя часто выполняют полым из легкого немагнитного материала (сплава алюминия)* (рис. П.3). Вращающий момент в таком двигателе образуется в результате взаимодействия магнитного поля с вихревыми токами, возникающими в теле ротора. Асинхронные двигатели с полым немагнитным ротором являются наиболее распространенными разновидностями исполнительных двигателей. Их номинальная мощность колеблется в пределах от десятых долей ватта до нескольких сотен ватт, номинальная частота – в пределах от 50 до 1000 Гц. При частоте 50 Гц двигатели имеют $2p = 2$, при $f \geq 400$ Гц $2p = 6$.

Толщина цилиндра полого ротора в зависимости от мощности двигателя выбирается равной от 0,2 до 1 мм. Зазоры между ротором и внешним и внутренним статорами лежат в пределах от 0,15 до 0,25 мм. Таким образом, общий радиальный размер немагнитной части магнитной цепи двигателя равен 0,5–1,5 мм, что приводит к заметному возрастанию намагничивающего тока, достигающего в некоторых случаях 0,8–0,9 номинального тока двигателя.

В некоторых случаях для снижения намагничивающего тока применяют *ферромагнитный полый ротор с омедненной поверхностью*. Используются также обычные ротора с обмоткой типа беличья клетка.

Коэффициент мощности может быть увеличен за счет включения емкости в цепь обмотки возбуждения.

Полый ротор при $s = 1$ имеет относительно большое активное приведенное сопротивление R'_2 и весьма малое индуктивное сопротивление $X'_2 \approx (0,01 \div 0,1)R'_2$, что положительно влияет на характеристики момента двигателя.

Наряду с исполнительными асинхронными двигателями используются исполнительные двигателя постоянного тока [9, с. 112, сл.].

П.3. Тахогенераторы

Тахогенераторы преобразуют скорость механического вращения ротора в электрический сигнал. Они являются электрическими тахометрическими устройствами, включенными в систему автоматического управления.

Тахогенераторы (ТГ) переменного тока обычно представляют собой электрическую асинхронную машину с полым ротором с двумя обмотками на статоре (подобно асинхронному исполнительному двигателю, см. рис. П.3). Обмотка возбуждения (ОВ) присоединяется к сети с неизменным напряжением и частотой, так что $\underline{U}_B = \underline{U}_1$. Вторая обмотка, называемая сигнальной (ОС), сдвинутая пространственно относительно первой на 90 эл. градусов, включается на внешнее нагрузочное сопротивление $Z_{НГ}$ регистрирующего устройства, принимающего сигнал. Вал ТГ жестко соединяется с валом механизма, скорость вращения которого регистрируется тахогенератором.

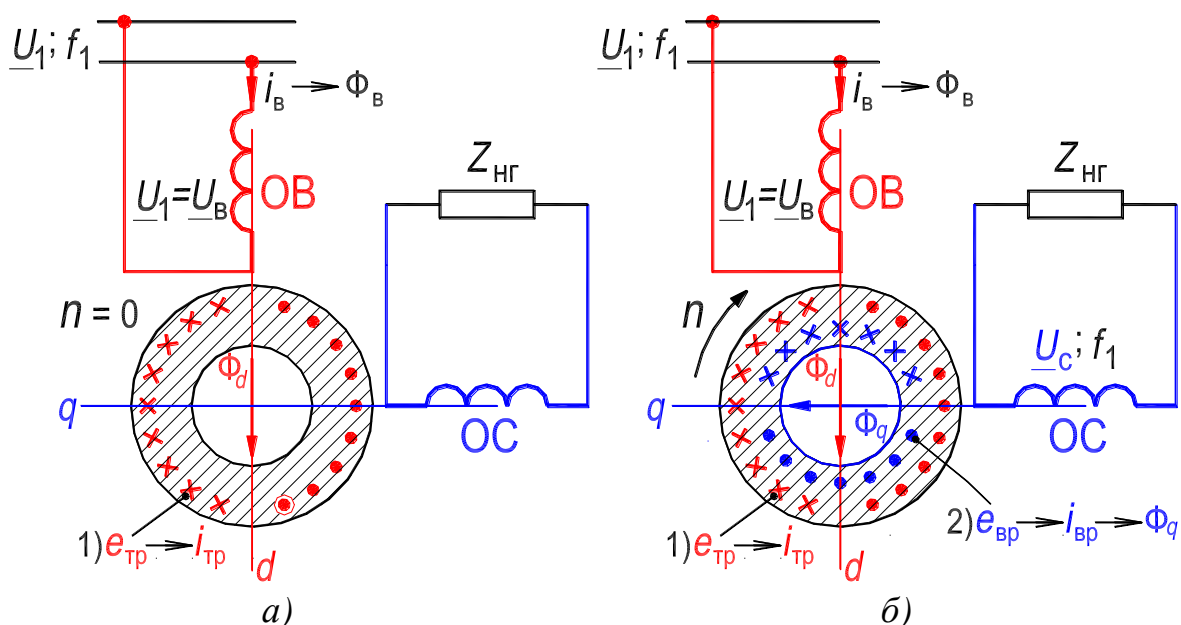


Рис. П.4. – Принципиальная схема асинхронного тахогенератора:

распределение в полном роторе токов трансформации I_{Tr} – (а) и токов вращения I_{Br} – (б)

Электродвижущая сила $E_c \approx U_c$, наводимая в обмотке ОС, должна быть пропорциональна скорости вращения ротора тахогенератора при $\underline{U}_1 = \text{const}$ и иметь постоянную частоту $f_1 = \text{const}$.

При неподвижном роторе (рис. П.4,а) пульсирующий магнитный поток Φ_B (он ориентирован по оси обмотки возбуждения), создаваемый током обмотки возбуждения I_B , индуцирует в роторе трансформаторную ЭДС E_{Tr} , которая создает в роторе ток I_{Tr} . Токи I_B и I_{Tr} создают результирующий продольный поток Φ_d , действующий по продольной оси d , которая совпадает с осью обмотки возбуждения. При неподвижном роторе поток Φ_d не индуцирует ЭДС в сигнальной обмотке, так как обмотки ОВ и ОС, смещенные на 90 градусов, взаимноиндуктивны.

При *вращении ротора* (рис. П.4,б) со скоростью n (ей соответствует угловая частота вращения ротора $\Omega = d\alpha/dt$, α – угол поворота ротора) в нем индуцируется еще ЭДС вращения $E_{вр}$, пропорциональная потоку Φ_d и скорости Ω : $E_{вр} \sim \Phi_d \cdot d\alpha/dt$. Под действием этой ЭДС возникает ток $I_{вр}$ и создаваемый им поперечный магнитный поток Φ_q , ориентированный по поперечной оси q , которые также пропорциональны напряжению U_B и изменяются во времени с частотой сети f_1 . Поперечный магнитный поток Φ_q индуцирует в сигнальной обмотке ЭДС

$$E_c = k_c U_B \Omega = k_c U_B (d\alpha/dt), \quad (\text{П.1})$$

где k_c – коэффициент пропорциональности, зависящий от электрических параметров сигнальной обмотки и ротора. Равенство (П.1) определяет выходную характеристику идеального ТГ: зависимость напряжения на сигнальной обмотке $U_c \approx E_c$ от скорости вращения ротора. Существенное влияние на погрешности ТГ оказывает точность изготовления отдельных его деталей.

Частота ЭДС E_c сигнальной обмотки не зависит от угловой скорости ротора и всегда равна частоте сети f_1 , от которой питается обмотка возбуждения.

Поскольку ЭДС вращения $E_{вр}$ при постоянном потоке Φ_d пропорциональна угловой скорости Ω ротора, то ток $I_{вр}$, магнитный поток Φ_d и ЭДС сигнальной обмотки E_c , связанные с $E_{вр}$ линейной зависимостью, также пропорциональны угловой скорости.

К сигнальной обмотке присоединяется измерительный прибор или элемент системы автоматического регулирования. При этом их сопротивление $Z_{нп}$ выбирается настолько большим, что ток в сигнальной обмотке не создает заметного падения напряжения и $U_c \approx E_c$. Таким образом, в асинхронных ТГ изменяется только действующее значение ЭДС E_c , а частота ЭДС f_1 остается постоянной. Из-за этой особенности асинхронные ТГ применяются много чаще синхронных, в которых изменяются и действующее значение, и частота ЭДС сигнальной обмотки [8, с. 76]. На практике используются также ТГ постоянного тока [9, с. 79, сл.].

П.4. Синусно-косинусные поворотные трансформаторы

Поворотные трансформаторы (ПТ) (их также называют вращающимися) применяются в автоматических и счетно-решающих устройствах для

получения напряжений переменного тока, пропорциональных синусу и косинусу угла поворота ротора α ($\sin \alpha$ или $\cos \alpha$) трансформатора или пропорциональных самому углу поворота α .

По своей конструкции поворотный трансформатор подобен асинхронному двигателю с фазным ротором и имеет на статоре и роторе симметричные двухфазные обмотки со сдвигом в пространстве на 90° эл. (рис. П.5):

- на статоре главная обмотка C_1C_2 , являющаяся обмоткой возбуждения;
- вспомогательная обмотка на статоре C_3C_4 , называемая квадратурной;
- на роторе две вторичные обмотки – синусная P_1P_2 и косинусная P_3P_4 .

Концы обмоток ротора выводятся наружу с помощью контактных колец и щеток или при ограниченном угле поворота α также с помощью гибких проводников.

Угол поворота ротора α принято отсчитывать от оси вспомогательной обмотки C_3C_4 до оси синусной обмотки ротора P_1P_2 .

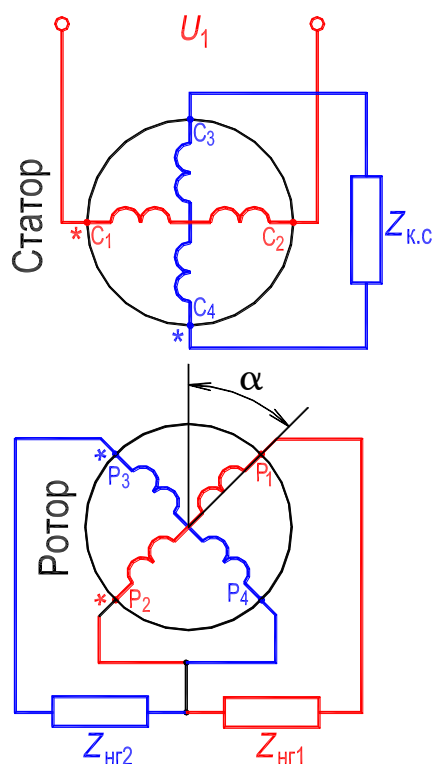


Рисунок П.5. – Схема соединений синусно-косинусного поворотного трансформатора

Сердечники статора и ротора собирают из пластин электротехнической стали или пермаллоя – материала с малым магнитным сопротивлением. Малое по сравнению с магнитным сопротивлением воздушного зазора магнитное сопротивление магнитопровода практически исключает влия-

ние различной степени насыщения при изменении напряжения U_1 на параметры машины. Таким образом, предотвращается ошибка, связанная с изменением параметров поворотного трансформатора при его работе. Жесткие требования предъявляются к точности изготовления и качеству магнитопровода.

Вследствие сдвига фаз обмоток статора (и ротора) на 90° эл. взаимная индуктивность между фазами обмотки статора (и между фазами обмотки ротора) равна нулю. В то же время *взаимная индуктивность между фазами обмоток статора и ротора* должна с возможно большей точностью меняться в зависимости от угла α по синусоидальному закону. Для этого стремятся к тому, чтобы формы кривых магнитных полей обмоток были по возможности ближе к синусоидальной, тогда и ЭДС взаимоиндукции, индуцируемые во вторичных обмотках, будут получаться синусоидальными.

Обмотка возбуждения статора C_1C_2 (рис. П.5) подключается к сети переменного тока со стабилизированным напряжением U_1 с частотой $f_1 = 50$ Гц или с повышенной 400–1000 Гц. Поток возбуждения, создаваемый этой обмоткой, индуцирует в обмотке ротора P_1P_2 ЭДС, пропорциональную $\sin \alpha$, а в обмотке P_3P_4 – ЭДС, пропорциональную $\cos \alpha$. При подключении к одной или к обеим обмоткам ротора нагрузки в них возникают токи, создающие в машине вторичное магнитное поле.

Индуцируемые этим полем ЭДС, могут исказить синусную и косинусную зависимости вторичных напряжений от угла поворота. Во избежание этого необходимо иметь в цепях вторичных обмоток равные сопротивления нагрузки $Z_{нг1} = Z_{нг2}$ либо замкнуть обмотку статора C_3C_4 на сопротивление $Z_{к.с.}$, значение которого равно внутреннему сопротивлению источника питания обмотки C_1C_2 . В обмотке C_3C_4 при этом индуцируется ток, который компенсирует вторичный магнитный поток, действующий перпендикулярно оси обмотки возбуждения C_1C_2 . Указанные мероприятия называются соответственно вторичным и первичным симметрированием поворотного трансформатора.

Изготавливаются также поворотные трансформаторы с печатными обмотками, расположенными на дискообразных или цилиндрических поверхностях статора или ротора [1–4]. Такие обмотки, выполняемые подобно печатным радиомонтажным схемам, позволяют избежать погрешностей, связанных с зубчатой структурой статора и ротора обычного поворотного трансформатора.

П.5. Машины для индукционных систем синхронной связи – сельсины

Электрические машины, выполняющие в системах автоматического управления функции синхронной связи, т. е. обеспечивающие синхронный или синфазный поворот или вращение двух или нескольких механически не связанных осей, носят название сельсинов (это название произошло от первых слогов английского термина **selfsynchronizing**).

Сельсины применяются для контроля и управления в следящих системах и для передачи показаний измерительных приборов. По характеру выполняемых функций сельсины подразделяют на сельсины-датчики и сельсины-приемники. Сельсины используются в паре (сельсин-датчик и сельсин-приемник) в индикаторном или трансформаторном режимах.

На рис. П.6 показана схема включения двух сельсинов при работе их в индикаторном режиме для дистанционной передачи угла.

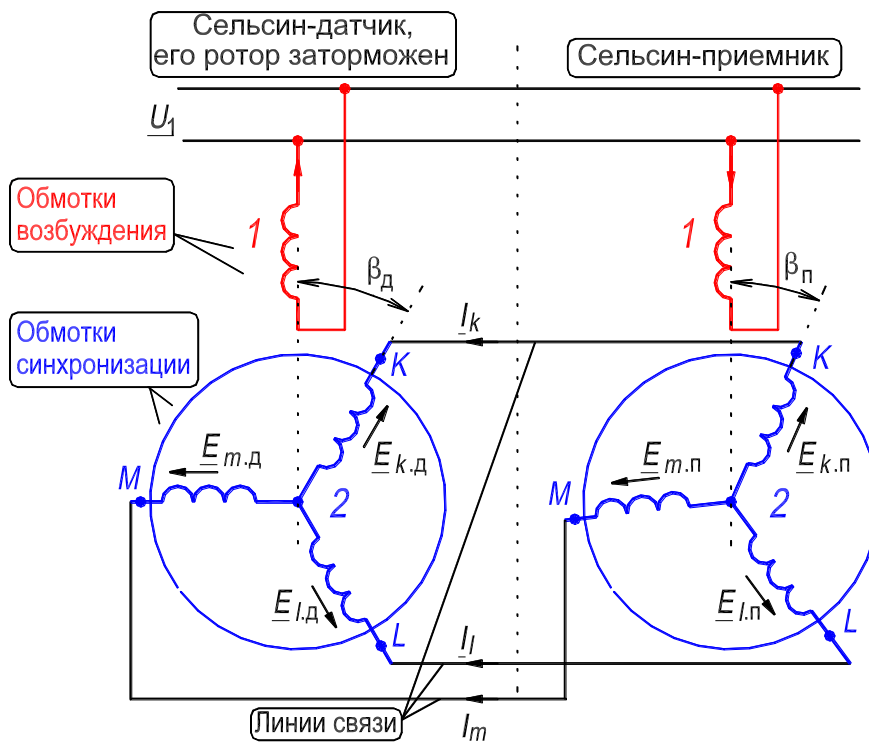


Рисунок П.6. – Схема использования однофазных сельсинов в индикаторном режиме

Сельсины выполняются двухполюсными с явно выраженными полюсами расположенными: 1) на статоре, 2) на роторе. В первом случае (рис. П.6) в пазах неявнополюсного цилиндрического ротора размещаются три обмотки 2 со сдвигом 120° , соединенные в звезду и присоединенные к трем контактными кольцам (на рис. П.6 кольца не показаны). Эти обмот-

ки называют обычно *обмотками синхронизации*.

Во втором случае (рис. П.7) обмотка 1, называемая *обмоткой возбуждения*, размещается на явнополюсном роторе и присоединяется к сети через два контактных кольца и щетки б. Обмотки 2 размещаются в этом случае на неявнополюсном статоре. В некоторых типах сельсинов-приемников на явнополюсном роторе размещают по поперечной оси q короткозамкнутую демпферную обмотку 7 (рис. П.7), которая обеспечивает более быстрое затухание собственных колебаний ротора, возникающих при согласовании системы синхронной передачи.

На рис. П.7 приведен чертеж двухполюсного сельсина с явно выраженными полюсами на роторе.

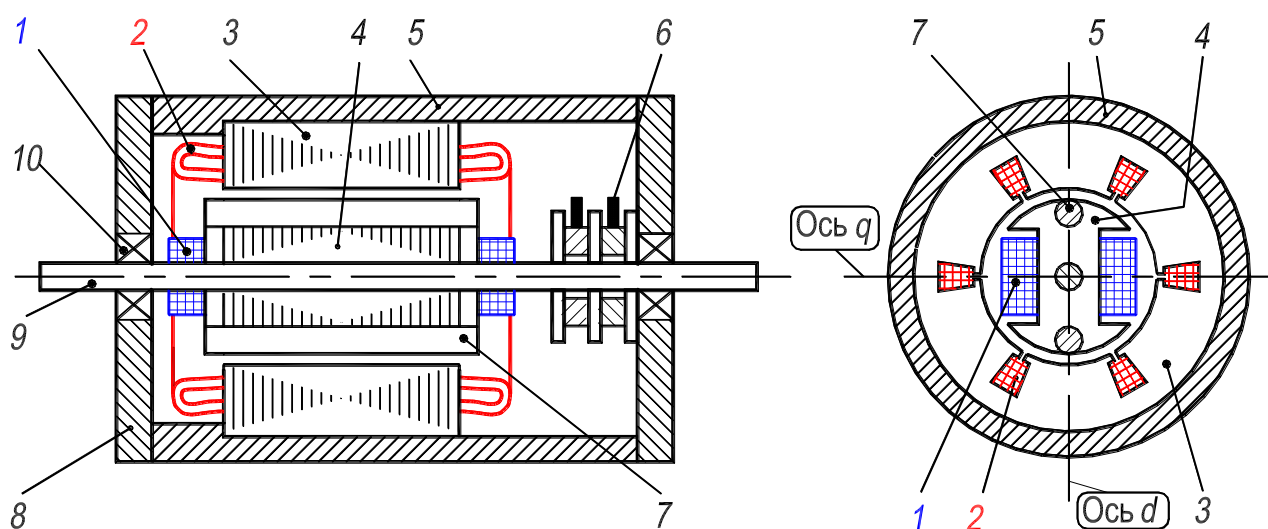


Рисунок П.7. – Конструктивная схема контактного сельсина: 1 – обмотка возбуждения; 2 – трехфазная синхронизирующая обмотка; 3 – сердечник статора; 4 – сердечник ротора; 5 – корпус; 6 – контактное кольцо со щеткой; 7 – демпферная обмотка; 8 – крышка; 9 – вал; 10 – подшипник; ось d – продольная; ось q – поперечная

Рассмотрим условия работы сельсинов в *индикаторном режиме* (рис. П.6). В индикаторном режиме сельсин-приемник не преодолевает внешнего момента сопротивления нагрузки, и на его валу установлена только стрелка, которая на измерительной шкале устанавливается в положении, соответствующем углу поворота. Индикаторный режим используется для указания на расстоянии положения какого-либо регулирующего органа (клапана, задвижки, заслонки, вентиля и т. д.), связанного механически с ротором сельсина-датчика. Передача показаний на пульт управления особенно важна в случаях, когда человек по каким-либо причинам не может подойти к регулирующему органу.

В начальном положении, при $\beta_d = \beta_n = 0$, по однофазным обмоткам **1** сельсина-датчика (С-Д) и сельсина-приемника (С-П) проходят только намагничивающие токи. В цепях обмоток синхронизации **2** все ЭДС в этом случае уравновешены, и потому токи в них равны нулю (рис. П.6). Если ротор сельсина-датчика повернется на угол $\Delta\beta$ (угол рассогласования), то равновесие ЭДС в цепях обмоток **2** нарушится и в них возникнет *однофазный* уравнивающий ток. Взаимодействие токов обмоток **1** и **2** создает в этом случае вращающие моменты, которые в соответствии с правилом Ленца будут стремиться повернуть роторы сельсинов С-Д и С-П в такое согласованное положение, при котором уравнивающий ток в цепях обмоток **2** будет равен нулю, что соответствует $\beta_d = \beta_n$. Так как ротор сельсина-датчика заторможен и вращаться не может, то на угол рассогласования $\Delta\beta$ поворачивается ротор сельсина-приемника, что фиксируется на измерительной шкале поворотом стрелки. Однако из-за наличия сил трения и технологических отклонений разность $\beta_d - \beta_n = \Delta\beta$ обычно не достигает нулевого значения. В зависимости от угла $\Delta\beta$, характеризующего статическую угловую погрешность сельсинов, устанавливают три класса их точности: класс 1 – для $\Delta\beta < 0,75^\circ$, класс 2 – для $\Delta\beta < 1,5^\circ$, класс 3 – для $\Delta\beta < 2,5^\circ$.

В ряде систем автоматического управления сельсины используются в *трансформаторном режиме* (рис. П.8). Этот режим используется при необходимости передать угол поворота управляемому механизму (УМ), который обладает более или менее значительным моментом сопротивления.

В трансформаторной синхронной передаче (рис. П.8) только обмотка возбуждения у сельсина-датчика подключена к сети переменного тока, а у сельсина-приемника не подключена. Вторичные ЭДС, индуцируемые в обмотке ротора сельсина-датчика передаются по линиям связи в обмотку ротора сельсина-приемника. В сельсине-приемнике трехфазная обмотка ротора создает магнитный поток, ось которого занимает по отношению к этой обмотке такое же положение, как у сельсина-датчика. При повороте ротора сельсина-датчика на такой же угол поворачивается магнитный поток сельсина-приемника; этот угол поворота можно зафиксировать по значению индуцируемой ЭДС E_1 в обмотке возбуждения сельсина-приемника. За согласованное положение роторов сельсина-датчика и сельсина-приемника принимается такое положение, при котором ЭДС E_1 равна нулю. При рассогласованном положении роторов ЭДС E_1 не будет равна нулю.

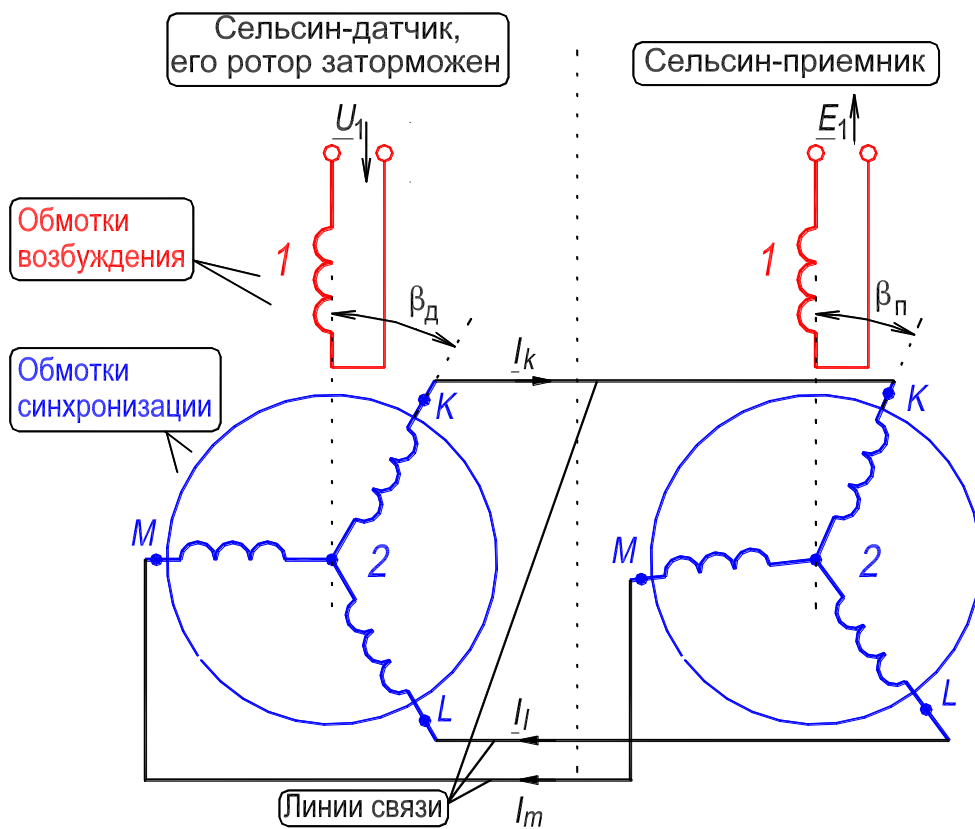


Рисунок П.8. – Схема включения сельсинов при работе в трансформаторном режиме

Пример использования сельсина в трансформаторном режиме для управления следящим приводом приведен на рис. П.9. Исполнительным двигателем является однофазный конденсаторный асинхронный двигатель (ОАД, см. рис. 12.4), который предназначен для поворота на угол рассогласования управляемого механизма УМ. Обмотка управления (ОУ) этого двигателя питается через электронный усилитель от обмотки **1** сельсина-приемника, работающего в трансформаторном режиме. Нормально роторы сельсинов С-Д и С-П ориентированы так, что ЭДС E_1 в сельсине С-П равна нулю. При повороте вала сельсина-датчика С-Д на некоторый угол $\Delta\beta_d$ на обмотке **1** сельсина-приемника Π возникает ЭДС \underline{E}_1 , которая через электронный усилитель подается на обмотку ОУ исполнительного двигателя. Ротор двигателя приходит во вращение, и управляемый механизм (УМ) поворачивается. Это вращение происходит до тех пор, пока ротор

сельсина, связанный с ротором исполнительного двигателя через редуктор (Р), не повернется на угол $\Delta\beta_{\text{п}} \approx \Delta\beta_{\text{д}}$, и снова придет в такое положение, при котором ЭДС $E_1 = 0$.

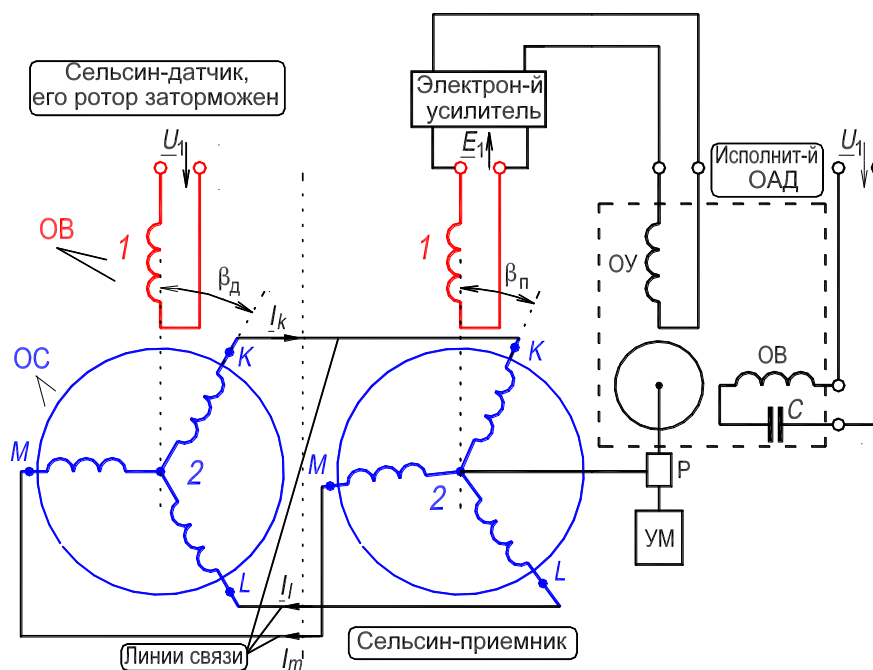


Рисунок П.9. – Управление следящим приводом при помощи сельсинов, работающих в трансформаторном режиме

Сельсины-датчики и сельсины-приемники выполняются контактными (рассмотрены выше) и бесконтактными. В первом случае в зависимости от того, располагаются ли на роторе одна обмотка **1** или три обмотки **2**, сельсин имеет два (рис. П.7) или три контактных кольца с наложенными на них щетками (рис. П.6, П.8 и П.9; контактные кольца и щетки на рисунках не показаны). Наличие двух контактных колец уменьшает осевую длину ротора, однако при этом утяжеляются условия работы контактов, поскольку через обмотку **1** постоянно приходит ток.

По этой причине иногда предпочитают обращенную конструкцию с размещением на роторе трехфазной обмотки **2**. При этом приходится использовать три контактных кольца, но условия работы щеточных контактов облегчаются, так как ток не всегда проходит по обмоткам **2**.

Наряду с контактными сельсинами широкое распространение получили бесконтактные сельсины, у которых обмотки **1** и **2** размещаются на статоре, а ротор не имеет обмоток [3].

Сельсины используются в системах переменного тока с частотой от 50 до 500 Гц. Номинальное напряжение возбуждения колеблется в пределах от 50 до 220 В, потребляемая мощность (при холостом ходе) – от нескольких ватт до 25 Вт.

13. РАБОТА № 4

ТРЕХФАЗНЫЙ АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР

Оглавление

1. Цель работы	265
2. Программа работы	265
3. Основы теории	266
4. Экспериментальное исследование	272
4.1. Пуск двигателя постоянного тока	272
4.2. Расчет значения фазной ёмкости	273
4.3. Опыт холостого хода генератора	275
4.4. Опыт нагрузки. Рабочие характеристики	276
5. Содержание и оформление отчета	279
6. Контрольные вопросы	279
Приложение. График зависимости КПД двигателя постоянного тока от тока якоря	281
Рис. 13.1 Энергетическая диаграмма активной мощности асинхронного генератора	267
Рис. 13.2. Момент асинхронной машины	268
Рис. 13.3. Схема включения асинхронного генератора АГ, возбуждаемого от батареи конденсаторов <i>СВ</i>	269
Рис. 13.4. К иллюстрации процесса самовозбуждения асинхронного генератора на холостом ходу, $I_{нг} = 0$	269
Рис. 13.5, лист 1. Схема включения двигателя постоянного тока смешанного возбуждения	273
Рис. 13.5, лист 2. Схема установки для исследования асинхронного генератора при его работе в автономной сети	274
Рис. 13.6. Фотография приборной панели лабораторного стенда для исследования асинхронного генератора	280
Рис. 13.7. Фотография исследуемого агрегата «Асинхронный генератор – приводной двигатель постоянного тока»	280

1. Цель работы

Ознакомиться с генераторным режимом асинхронной машины. Рассчитать емкость батареи конденсаторов, необходимую для самовозбуждения генератора. Выполнить опыты по снятию характеристик асинхронного генератора в режиме самовозбуждения.

2. Программа работы

2.1. На основании номинальных данных асинхронной машины рассчитать величину емкости конденсаторной батареи, необходимой для самовозбуждения генератора до номинального напряжения.

2.2. Возбудить генератор на холостом ходу до номинального напряжения при синхронной частоте вращения и снять характеристику холостого хода $U_x = f(I_c)$.

2.3. Снять рабочие характеристики асинхронного генератора с самовозбуждением $U_1, I_L, I_c, I_{нг}, f_1, s, \eta_{г} = f(P_1)$, где P_1 – механическая первичная мощность на валу генератора [термин 22].

2.4. Построить и объяснить зависимости $U_x = f(I_c)$ и $U_1, I_L, I_c, I_{нг}, f_1, s, \eta_{г} = f(P_1)$.

3. Основы теории

Для осуществления генераторного режима работы асинхронной машины обмотку статора нужно включить в сеть переменного тока и вращать ротор с помощью приводного двигателя в сторону вращения магнитного поля с частотой n , превышающей синхронную частоту вращения n_1 , $n > n_1$. Скольжение машины s при этом становится отрицательным, $s < 0$:

$$s = [(n_1 - n)/n_1] < 0, \quad (13.1)$$

где $n_1 = f_1/p$, об/с – синхронная скорость вращающегося магнитного поля.

Теоретически частота вращения ротора n может изменяться в пределах $n_1 < n < \infty$, чему соответствует изменение скольжения в пределах $0 > s > -\infty$. Однако по условиям ограничения потерь и нагревания и сохранения высокого КПД в генераторном режиме возможны абсолютные значения скольжения такого же порядка, как и в асинхронном двигателе, т. е. $0 < |s| < 1$.

Так как в генераторном режиме $s < 0$, то активная составляющая тока ротора I_{2a} изменяет свой знак, т. е. становится отрицательной и меняет свою фазу на 180° по сравнению с двигательным режимом. Величина же реактивной составляющей тока ротора I_{2p} не изменяет свой знак. Это положение непосредственно следует из формул

$$I_{2a} = I_2 \cos \psi_2 = (E_{2s}/Z_{2s})(R_2/Z_{2s}) = sE_2 R_2 / (R_2^2 + X_2^2 s^2), \quad (13.2)$$

$$I_{2p} = I_2 \sin \psi_2 = (E_{2s}/Z_{2s})(X_{2s}/Z_{2s}) = s^2 E_2 X_2 / (R_2^2 + X_2^2 s^2), \quad (13.3)$$

где ψ_2 – угол между векторами ЭДС \underline{E}_2' и тока \underline{I}_2' ротора; $E_{2s} = sE_2$ и $X_{2s} = sX_2$ – действующее значение ЭДС и индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора при вращающемся роторе; $E_2 = 4,44f_1 w_2 \Phi_m k_{o2}$ и $X_2 = 2\pi f_1 L_2$ – действующее значение ЭДС и индуктивное сопротивление фазы обмотки ротора при неподвижном роторе, когда $n = 0$, а $s = 1$.

С физической точки зрения изменение фазы активной составляющей тока ротора I_{2a} объясняется тем, что в генераторном режиме поле машины пересекает проводники обмотки ротора с частотой скольжения $(-n_1 s)$, т. е. в противоположном направлении по сравнению с двигательным режимом. Поэтому изменяется знак ЭДС $E_{2s} = sE_2$ обмотки ротора, а, следовательно, и активной составляющей тока ротора.

Вследствие изменения знака активной составляющей тока ротора изменяется также знак активной составляющей тока статора I_{1a} и активной мощности P_1 . Это означает, что асинхронная машина уже не потребляет, как в режиме двигателя, а отдает в сеть активную мощность, т. е. работает в режиме генератора и преобразует потребляемую с вала механическую мощность в электрическую. На рис. 13.1 изображена энергетическая диаграмма асинхронного генератора (сравнить с диаграммой двигателя, см. рис. 10.6, с. 116).

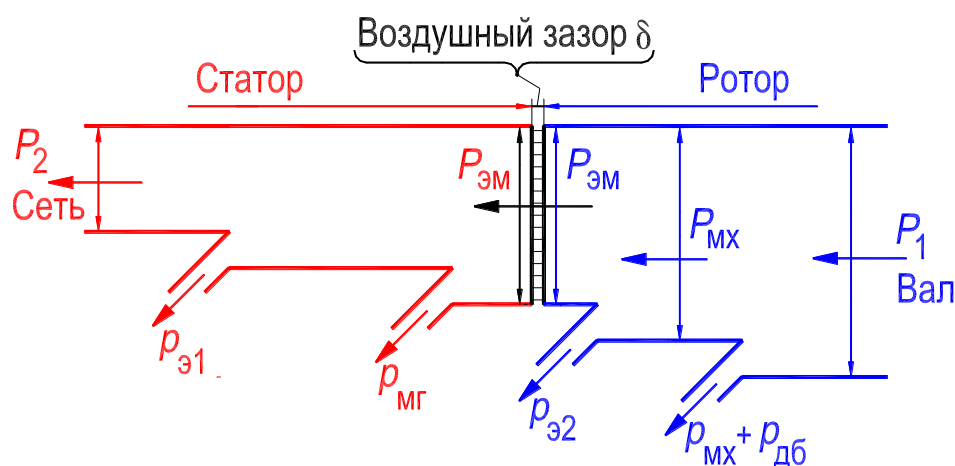


Рисунок 13.1 – Энергетическая диаграмма активной мощности асинхронного генератора

Вместе с тем, так как знак реактивной составляющей тока ротора I_{2p} не изменяется при $s < 0$ [см. формулу (13.3)], то асинхронный генератор, также как и двигатель, потребляет из сети реактивную мощность (что противоречит назначению генератора). Эта мощность расходуется на создание магнитного поля в генераторе. Отметим, что для создания магнитного поля в генераторе требуется реактивный **намагничивающий ток** $I_m = I_1 + I_2'$, **примерно равный току холостого хода** асинхронной машины в режиме двигателя.

Асинхронный генератор может работать только на сеть, в которой имеются электрические машины или устройства, вырабатывающие реактивную мощность [к ним относятся синхронные машины (8, с. 116, сл.), а также батареи конденсаторов]. Такое ограничение является существенным недостатком асинхронного генератора.

Вследствие изменения знака активной составляющей тока ротора [см. формулу (13.2)] изменяется также знак электромагнитного момента,

т. е. он действует против направления вращения ротора навстречу моменту приводного двигателя $M = c_M \Phi_m I_2 \cos \psi_2$.

Поэтому в генераторном режиме асинхронной машины электромагнитный момент будет тормозным. На рис. 13.2 изображена зависимость $M = f(s)$ асинхронной машины для двигательного и генераторного режимов, а также режима электромагнитного тормоза.

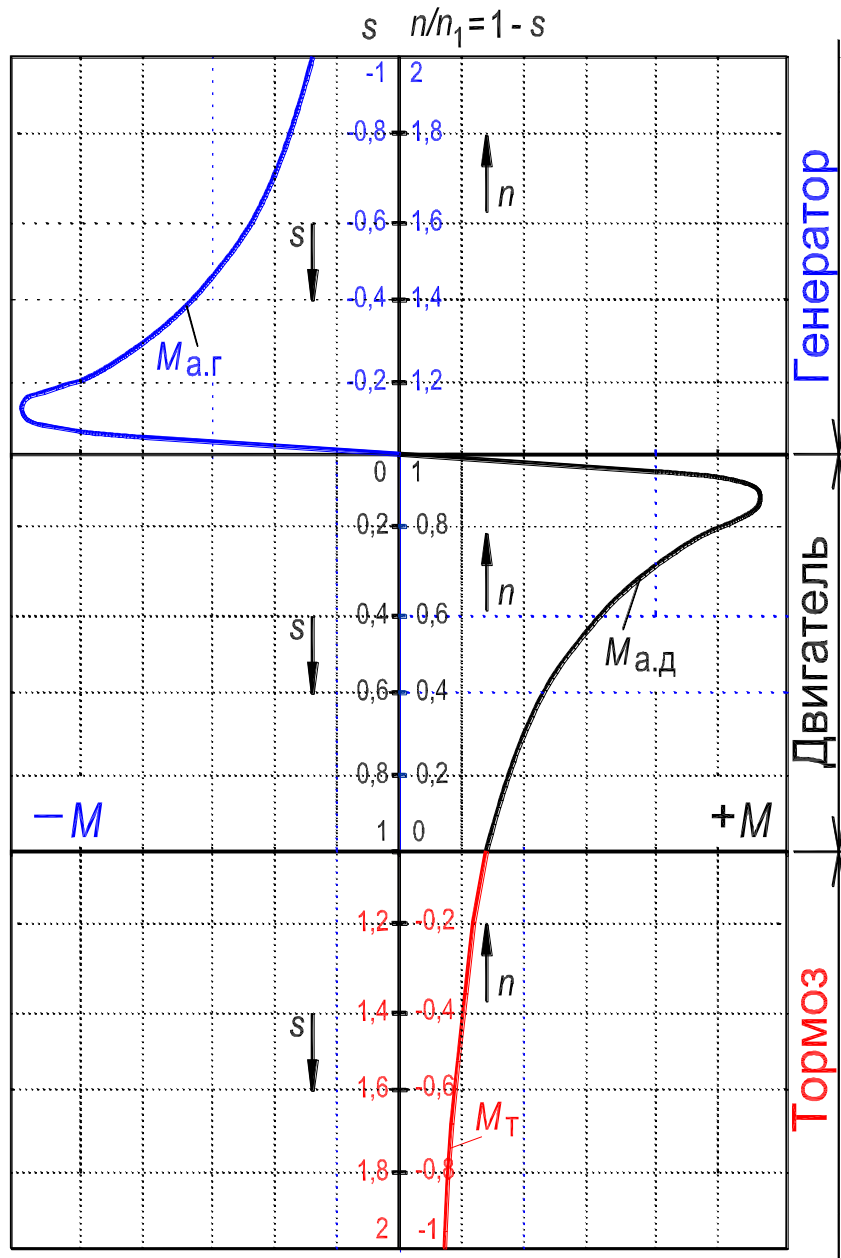


Рисунок 13.2. – Момент асинхронной машины

Различают режим независимого возбуждения асинхронного генератора, в этом случае он работает в общей сети, которая питается от синхронного генератора, а также режим самовозбуждения. Последнее означает,

что генератор получает реактивную мощность для создания магнитного поля от батареи конденсаторов.

В лабораторной работе исследуется асинхронный генератор в автономной* сети в режиме самовозбуждения. Реактивную мощность он получает от батареи конденсаторов CB , подключенной к зажимам обмотки статора (рис. 13.3).

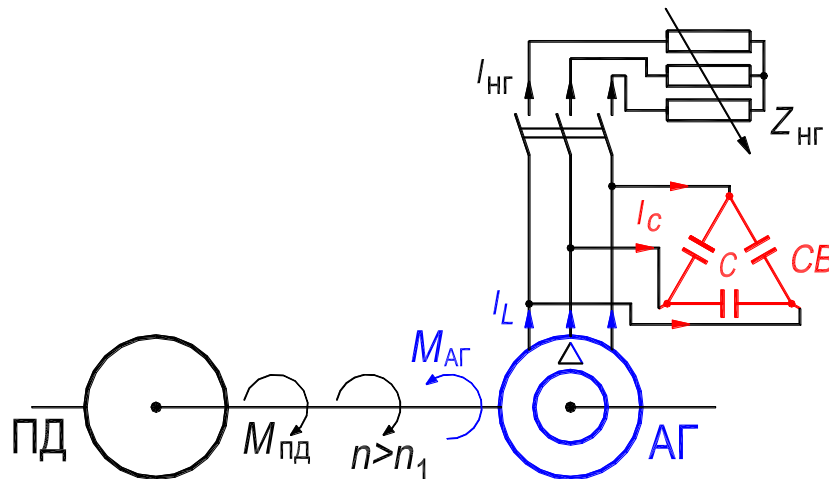


Рисунок 13.3. – Схема включения асинхронного генератора АГ, возбуждаемого на холостом ходу от батареи конденсаторов CB

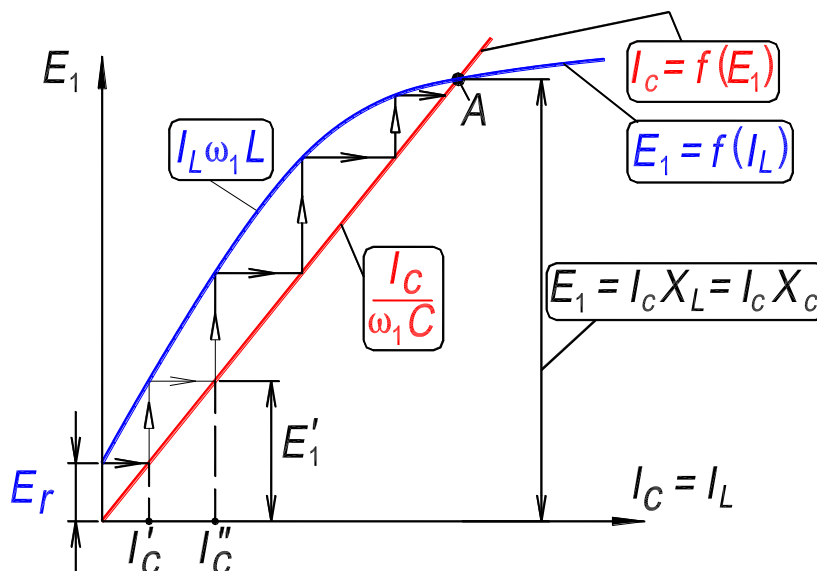


Рисунок 13.4. – К иллюстрации процесса самовозбуждения асинхронного генератора на холостом ходу, $I_{НГ} = 0$

*Под автономной сетью подразумевается такая сеть, которая питается от данного асинхронного генератора и в которой не работают синхронные машины.

Рассмотрим процесс самовозбуждения асинхронного генератора на холостом ходу (нагрузка $Z_{\text{нг}}$ отключена). На рис. 13.4, иллюстрирующем этот процесс, показана характеристика холостого хода генератора $E_1 = f(I_L)$ при частоте $f_1 = \text{const}$ и зависимость тока конденсатора от напряжения на его зажимах $I_c = f(E_1)$. При возбуждении без нагрузки токи обмотки статора I_L и батареи конденсаторов CB I_c равны, $I_L = I_c$, а ток в нагрузке $I_{\text{нг}} = 0$ (см. рис. 13.3). Обязательным условием самовозбуждения является наличие потока остаточного магнетизма ротора. При вращении ротора приводным двигателем с синхронной частотой $n = n_1 = f_1/p$ этот поток индуцирует в обмотке статора ЭДС E_r , которая обуславливает протекание тока I_c' в конденсаторах. Этот ток, протекая и по обмотке статора, усиливает его магнитный поток. В результате индуцируемая в обмотке статора ЭДС возрастет до значения E_1' ($E_1' > E_r$), что вызовет увеличение тока в обмотке статора до значения I_c'' ($I_c'' > I_c'$) и т. д., пока в процессе лавинообразного самовозбуждения ЭДС генератора не достигнет значения соответствующего точке A пересечения обеих характеристик. На рис. 13.4 этот процесс условно показан ступенчатой линией. В точке A самовозбуждение заканчивается и наступает равновесие между напряжениями генератора и конденсаторов, то есть:

$$I_c(X_1 + X_M) = I_c X_c \text{ или } I_c \omega_1 L = I_c / \omega_1 C, \quad (13.4)$$

где $\omega_1 = 2\pi f_1$; $L = (X_1 + X_M) / \omega_1$ – индуктивность генератора; $C = 1 / X_c \omega_1$ – емкость конденсаторов, приведенная к фазному напряжению (см. рис. 13.3)

Из равенства (13.4) может быть найдена зависимость между индуктивностью L и необходимой для возбуждения генератора емкостью C при данной частоте $f_1 = \omega_1 / 2\pi$;

$$LC = 1 / \omega_1^2 = 1 / 4\pi^2 f_1^2. \quad (13.5)$$

При промышленной частоте $f_1 = 50$ Гц получаем $LC \approx 10^{-5}$.

После того как генератор возбуждётся, его можно нагрузить. При подключении нагрузки $Z_{\text{нг}}$ к зажимам обмотки статора генератора (рис. 13.5, лист 2) и неизменной частоте вращения ротора n частота f_1 и напряжение U_1 на зажимах обмотки статора уменьшаются. Это положение анализируется на основе уравнения равновесия напряжения обмотки статора:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_L \underline{Z}_1 \text{ или } \underline{E}_1 = -(\underline{U}_1 - \underline{I}_L \underline{Z}_1) = 4,44 f_1 \omega_1 \Phi_m k_{o1}. \quad (13.6)$$

При протекании тока нагрузки $Z_{нг}$ увеличиваются ток I_L и падение напряжения в обмотке статора $I_L Z_1$, и изменяется состояние магнитной системы (то есть изменяются магнитный поток Φ_m и насыщение магнитопровода), что приводит к увеличению индуктивности L и, следовательно, в соответствии с равенством (13.5), к уменьшению частоты f_1 .

Уменьшение частоты f_1 тока статора при увеличении нагрузки приводит к увеличению емкостного сопротивления $X_c = 1/2\pi f_1 C$ и к уменьшению индуктивного сопротивления $X_L = 2\pi f_1 L = X_1 + X_m$. Такое изменение этих сопротивлений приводит к уменьшению индуцированного напряжения, до которого возбуждается генератор (точка A на рис. 13.4) и при достаточно большой нагрузке оно падает до нуля.

При нагрузке для поддержания неизменной частоты $f_1 = \text{const}$ частоту вращения ротора n необходимо изменять, устанавливая значение скольжения ($-s$) соответственно нагрузке.

Величина фазной емкости, необходимой для возбуждения генератора до номинального напряжения при частоте вращения ротора $n = n_1$ для схемы рис. 13.4 может быть получена из выражения:

$$C_\Phi = 10^6 I_{x,дв} / \sqrt{3} U_{1н} 2\pi f_1, \text{ мкФ}, \quad (13.7)$$

где $I_{x,дв} \approx 3,3$ А – линейный ток холостого хода исследуемой асинхронной машины в двигательном режиме при номинальном напряжении $U_{1н} = 220$ В, $f_1 = 50$ Гц.

В общем случае, для ориентировочного расчета, величина тока холостого хода асинхронного двигателя может быть принята в пределах $I_{x,дв} \approx (0,4 \div 0,6) I_{1н}$.

При изменении величины емкости конденсаторов изменяется наклон зависимости $I_c = f(E_1)$ и генератор возбуждается до другой величины ЭДС (см. рис. 13.4). Если значение сопротивления $X_c = 1/\omega_1 C$ таково, что характеристика $I_c = f(E_1)$ проходит касательно к прямолинейному участку характеристики холостого хода генератора $E_1 = f(I_L)$, то самовозбуждение генератора не происходит.

Мощность конденсаторной батареи самовозбуждающегося асинхронного генератора достаточно велика (до 70–100 % от номинальной мощности генератора), что делает установку дорогой. Асинхронные генераторы применяются ограниченно.

4. Экспериментальное исследование

Исследуется трехфазный асинхронный генератор, работающий на автономную нагрузку. В режиме асинхронного генератора используется трехфазная асинхронная машина (двигатель типа А41/4). Лабораторная установка включает: асинхронную машину в режиме генератора; батарею конденсаторов CB , необходимую для самовозбуждения генератора; нагрузочный реостат $RR_{нг}$; двигатель постоянного тока типа ПН-17,5; пусковой реостат $RR_{п}$, предназначенный для ограничения пускового тока в обмотке якоря двигателя. На рис. 13.5, лист 1 приведена схема включения двигателя постоянного тока смешанного возбуждения и его номинальные данные. На рис. 13.5, лист 2 приведена схема включения асинхронного генератора с самовозбуждением и его номинальные данные. На рис. 13.6 и 13.7 фотографии приборной панели лабораторного стенда и исследуемого агрегата.

Валы приводного двигателя постоянного тока и асинхронного генератора механически сопряжены. Полезная механическая мощность, вырабатываемая двигателем постоянного тока, подводится к валу асинхронного генератора. Электрическая мощность, вырабатываемая генератором, питает автономную нагрузку $RR_{нг}$.

4.1. Пуск двигателя постоянного тока

Пуск двигателя (на холостой ход) осуществить следующим образом (рис. 13.5, лист 1).

1. Установить пусковой реостат $RR_{п}$ в положение «Пуск»;
2. Включить автомат $QF2$: двигатель подключен к сети постоянного тока; плавно перевести реостат $RR_{п}$ в положение «Работа»; якорь двигателя вращается.
3. Регулируя реостат $RR_{в.д}$ в цепи обмотки возбуждения $LM1$ двигателя, установить частоту вращения якоря примерно равной 1500 об/мин. Пуск двигателя завершен.

Измерить частоту вращения бесконтактным цифровым тахометром (отражающая метка расположена на периферии муфты, сопрягающей валы двигателя и асинхронного генератора).

Для отключения двигателя необходимо перевести реостат $RR_{п}$ в положение «Пуск», а затем выключить автомат $QF2$.

4.2. Расчет значения фазной ёмкости

Величину фазной емкости C_{ϕ} , необходимую для самовозбуждения исследуемого генератора до напряжения $U_1 \approx U_{1H} = 220$ В при частоте вращения ротора $n \approx 1500$ об/мин, рассчитать по формуле (13.7) (см. схему на рис. 13.5, лист 2):

$$C_{\phi} = 10^6 I_{x,дв} / \sqrt{3} U_{1H} 2\pi f_1 = 10^6 \cdot 3,3 / \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 100 \cdot \pi \approx 28 \text{ мкФ.}$$

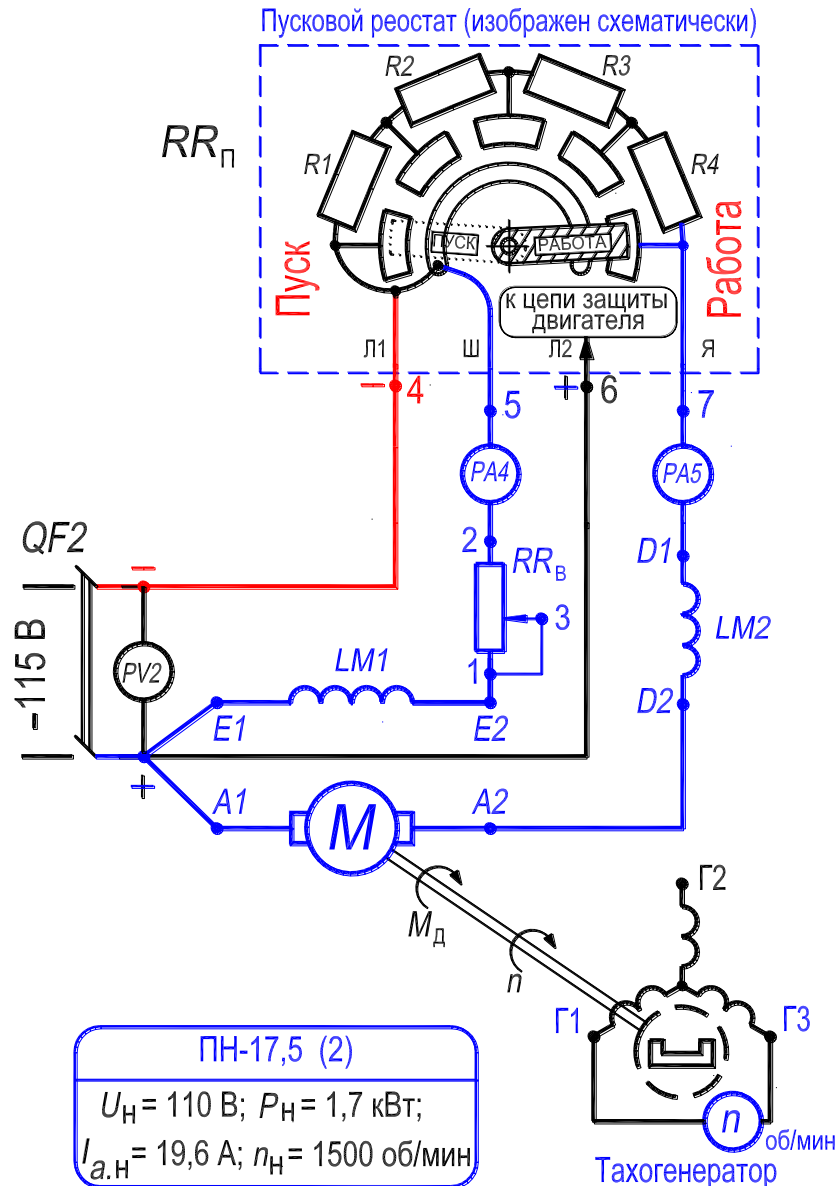
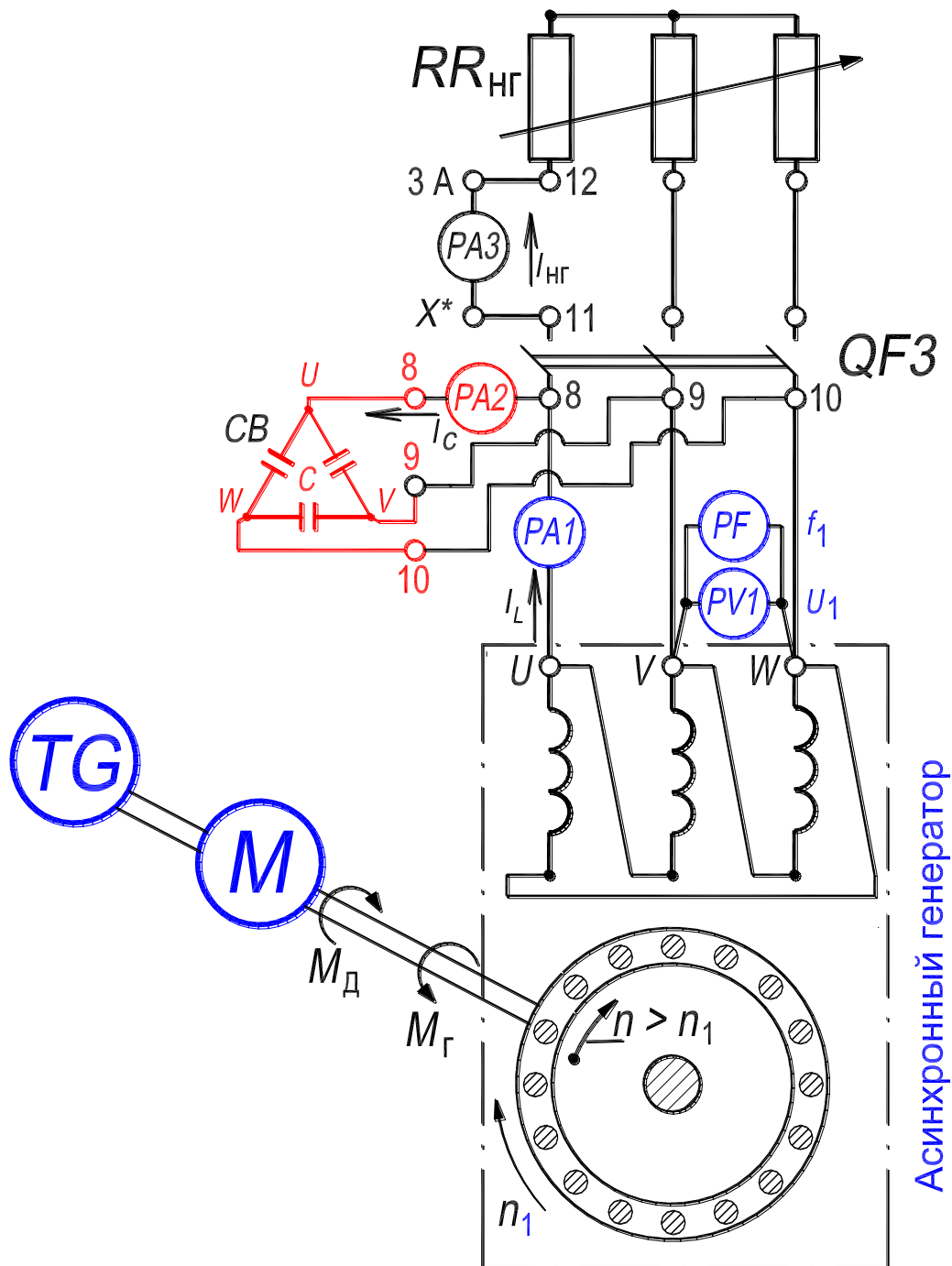


Рисунок 13.5, лист 1. – Схема включения двигателя постоянного тока смешанного возбуждения



A41/4 (2)
$U_H = 220 \text{ В } (\Delta); P_{1H} = 1,7 \text{ кВт};$
$I_{1H} = 6,7 \text{ А}; n_H = 1420 \text{ об/мин};$
$\eta_H = 81,5\%; \cos \varphi_H = 0,8$

Рисунок 13.5, лист 2. – Схема установки для исследования асинхронного генератора при его работе в автономной сети

4.3. Опыт холостого хода генератора

Осуществить опыт холостого хода в следующей последовательности.

1. Автомат $QF3$ установить в положение «Отключен»: нагрузочный реостат $RR_{нг}$ отключен, генератор включен на холостой ход;

2. На батарее конденсаторов CB , включая соответствующие тумблеры, набрать в каждой фазе величину емкости $C_{\phi} = 28$ мкФ, рассчитанную по формуле (13.7);

3. Осуществить пуск двигателя постоянного тока на холостой ход так, как указано в разд. 4.1, пп. 1–3. Асинхронный генератор самовозбудился: напряжение $U_x \approx U_{1н} = 220$ В, частота $f_1 \approx 50$ Гц.

В процессе опыта, регулируя сопротивление реостата $RR_{в.д}$ в цепи возбуждения двигателя, поддерживать частоту вращения ротора генератора постоянной и равной 1500 об/мин. Измерять частоту вращения бесконтактным цифровым тахометром.

4. Уменьшать значение емкости в каждой фазе батареи конденсаторов CB с шагом 2 мкФ. При каждом дискретном значении емкости C_{ϕ} , одинаковом во всех фазах, записать в табл. 13.1 значения: емкости в одной фазе C_{ϕ} , линейного тока I_C батареи конденсаторов CB (амперметр $PA2$) и линейного (фазного) напряжения генератора U_x (вольтметр PVI).

Опыт прекратить, когда генератор теряет самовозбуждение. Отключить двигатель от сети постоянного тока так, как указано в разд. 4.1, п. 4.

По данным опыта построить характеристику холостого хода $U_x = f(I_C)$ генератора.

Таблица 13.1. – Измерение вольт-амперной характеристики

C_{ϕ}	$I_C = I_L$	U_x
мкФ	А	В

4.4. Опыт нагрузки. Рабочие характеристики

Активная мощность, вырабатываемая асинхронным генератором, поступает в нагрузочный реостат $RR_{\text{нг}}$ (рис. 13.5, лист 2).

Частоту вращения ротора генератора в процессе опыта поддерживать неизменной и равной $n = 1500$ об/мин. Для обеспечения постоянства частоты вращения регулировать величину сопротивления $RR_{\text{в.д}}$ в цепи обмотки возбуждения LMI приводного двигателя постоянного тока (рис. 13.1, лист 1). Измерять частоту вращения бесконтактным цифровым тахометром.

Осуществить опыт нагрузки в следующей последовательности.

1. При отключенном автомате $QF3$ и значении емкости $C_{\text{ф}} = 28$ мкФ в каждой фазе [рассчитано по формуле (13.7)], выполнить пуск двигателя постоянного тока так, как указано в разд. 4.1, пп. 1–3. Асинхронный генератор самовозбудился: напряжение $U_{\text{х}} \approx U_{1\text{н}} = 220$ В, частота $f_1 \approx 50$ Гц. *Величину емкости в процессе опыта не изменять.*

2. Включить автомат $QF3$: к вторичной обмотке генератора (это обмотка статора) подключен нагрузочный реостат $RR_{\text{нг}}$.

3. Изменяя величину сопротивления нагрузочного реостата $RR_{\text{нг}}$, установить ток нагрузки $I_{\text{нг}} \approx 2$ А.

4. Уменьшая нагрузку асинхронного генератора *вплоть до холостого хода*, записать в табл. 13.2:

а) показания измерительных приборов, включенных в схему генератора (рис. 13.5, лист 2): $PV1$ (напряжение генератора U_1); $PA1$ (линейный ток генератора I_L); $PA2$ (линейный ток батареи конденсаторов I_C); $PA3$ (ток нагрузки $I_{\text{нг}}$); PF (частота напряжения генератора f_i);

б) показания измерительных приборов, включенных в схему двигателя (рис. 13.5, лист 1): $PV2$ (напряжение сети постоянного тока $U_{\text{ном}}$); $PA4$ (ток возбуждения $I_{\text{в}}$ в обмотке возбуждения LMI); $PA5$ (ток I_a в обмотке якоря).

Последнее измерение осуществить при холостом ходе асинхронного генератора: нагрузочный реостат $RR_{\text{нг}}$ выведен и отключен автоматом $QF3$; ток нагрузки $I_{\text{нг}} = 0$ А, ток генератора равен току батареи конденсаторов, $I_L = I_C$.

Отключить двигатель постоянного тока так, как указано в разд. 4.1, п. 4.

Все тумблера на батарее конденсаторов СВ установить в положение «Отключено».

По данным опыта рассчитать и построить рабочие характеристики асинхронного генератора $U_1, I_L, I_C, I_{нг}, f_1, s, \eta_{г} = f(P_1)$.

Таблица 13.2. – Измерение и расчет рабочих характеристик

Асинхронный генератор									Двигатель постоянного тока				
Измерение					Расчет				Измерение			Расчет	
U_1	I_L	I_C	$I_{нг}$	f_i	P_1	s	$\eta_{г}$	P_2	$U_{н}$	$I_{в}$	$I_{а}$	$\eta_{д}$	P
В	А	А	А	Гц	Вт	–	%	Вт	В	А	А	%	Вт

Расчетные величины определяют в следующем порядке:

- 1) По зависимости $\eta_{д} = f(I_a)$ (см. Прил., с. 281) определить значения КПД $\eta_{д}$ приводного двигателя для соответствующих значений тока якоря I_a ;
- 2) Определить электрическую мощность, потребляемую приводным двигателем постоянного тока

$$P = U_{н}(I_{в} + I_{а}), \text{ Вт};$$

- 3) Определить вторичную механическую мощность на валу приводного двигателя ($\eta_{д}P$) и, соответственно, механическую первичную мощность на валу асинхронного генератора P_1

$$P_1 = \eta_{д}P, \text{ Вт};$$

- 4) Определить вторичную электрическую мощность асинхронного генератора, поступающую с обмотки статора в активную нагрузку $RR_{нг}$ ($\cos \varphi_{нг} = 1,0$)

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_1 I_{нг};$$

5) Определить коэффициент полезного действия асинхронного генератора

$$\eta_{\Gamma} = 100P_2/P_1, \%$$

б) Определить скольжение ротора асинхронного генератора

$$s = (f_i - f_1)/f_i, \text{ ВТ},$$

где $f_1 = f_i = 50$ Гц – частота напряжения асинхронного генератора при токе нагрузки; $I_{\text{нг}} = 0$, $I_L = I_C$, $U_1 \approx U_{1\text{н}} = 220$ В (результаты измерений в последней строке табл. 13.2); f_i – текущее значение частоты при токе нагрузки $I_{\text{нг}} > 0$.

По опытным и расчетным данным построить и анализировать рабочие характеристики асинхронного генератора с самовозбуждением U_1 , I_L , I_C , $I_{\text{нг}}$, f_1 , s , $\eta_{\Gamma} = f(P_1)$.

5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Содержание.
3. Программу лабораторной работы.
4. Номинальные данные асинхронного двигателя.
5. Номинальные данные двигателя постоянного тока.
6. Схемы испытаний.
7. Результаты опытов и расчетов, представленных в таблицах 13.1 и 13.2; ниже каждой таблицы приводятся формулы для расчета величин. Затем размещаются графические зависимости, соответствующие таблице (см. далее пп. 8.1, 8.2).
8. Экспериментальные и расчетные графические зависимости:
 - 8.1. $U_x = f(I_C)$ – характеристика холостого хода;
 - 8.2. $U_1, I_L, I_C, I_{нг}, f_1, s, \eta_{г} = f(P_1)$ – рабочие характеристики;

Текст отчета оформить в текстовом процессоре *MS Word* (шрифт *Times New Roman*, 12 пт.). Графики строить в интерактивном графическом пакете *Grapher*. Схему опыта вычертить в интерактивном графическом пакете *AutoCAD*. Все отчеты по лабораторным работам раздела Асинхронные машины подшить в одну общую простую папку – скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

6. Контрольные вопросы

1. Что является основным условием перевода асинхронной машины в генераторный режим?
2. Из каких соображений выбирается величина емкости конденсаторов, необходимая для самовозбуждения асинхронного генератора?
3. Почему с увеличением тока нагрузки уменьшается частота напряжения генератора с самовозбуждением?
4. Как влияет характер нагрузки на величину и частоту напряжения?
5. Как поддерживать постоянными величину и частоту напряжения генератора при изменениях нагрузки?
6. Для каких целей можно использовать асинхронный генератор с самовозбуждением?

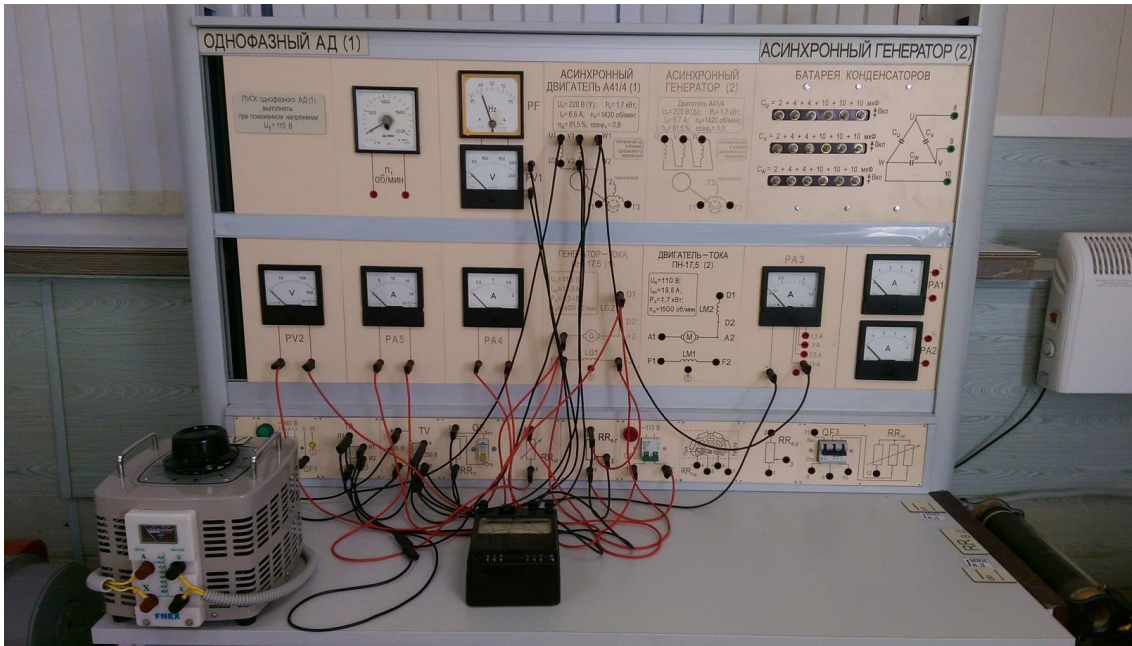


Рисунок 13.6. – Фотография приборной панели лабораторного стенда для исследования асинхронного генератора

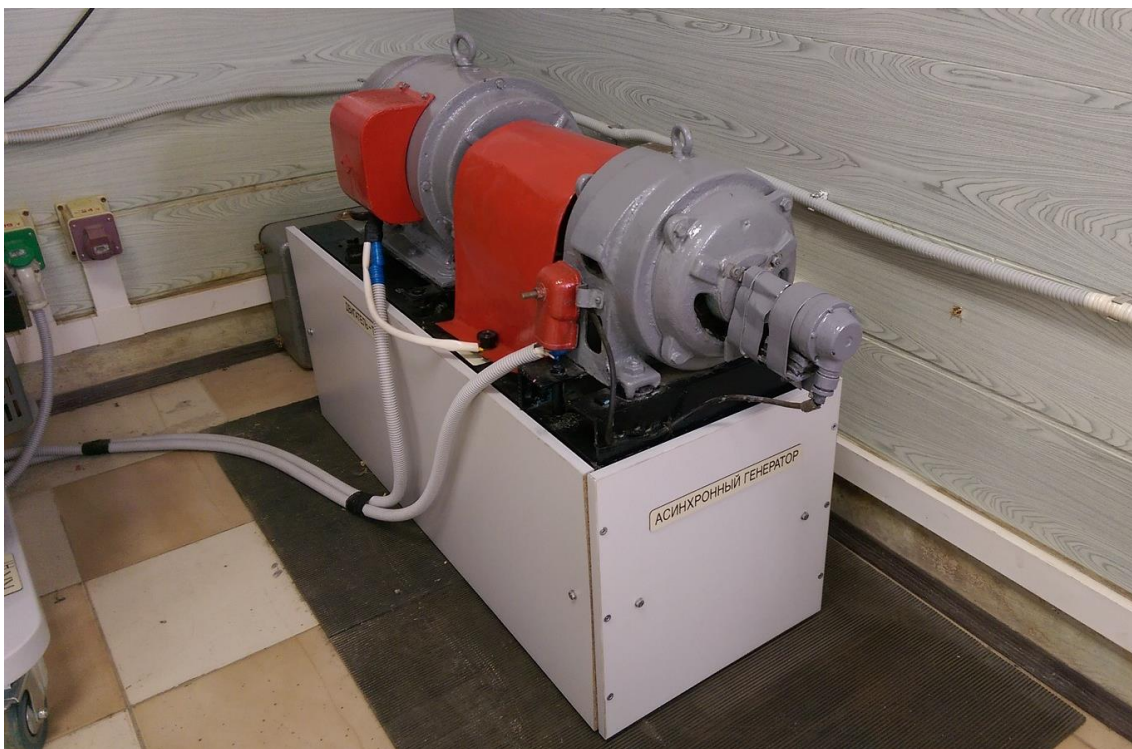
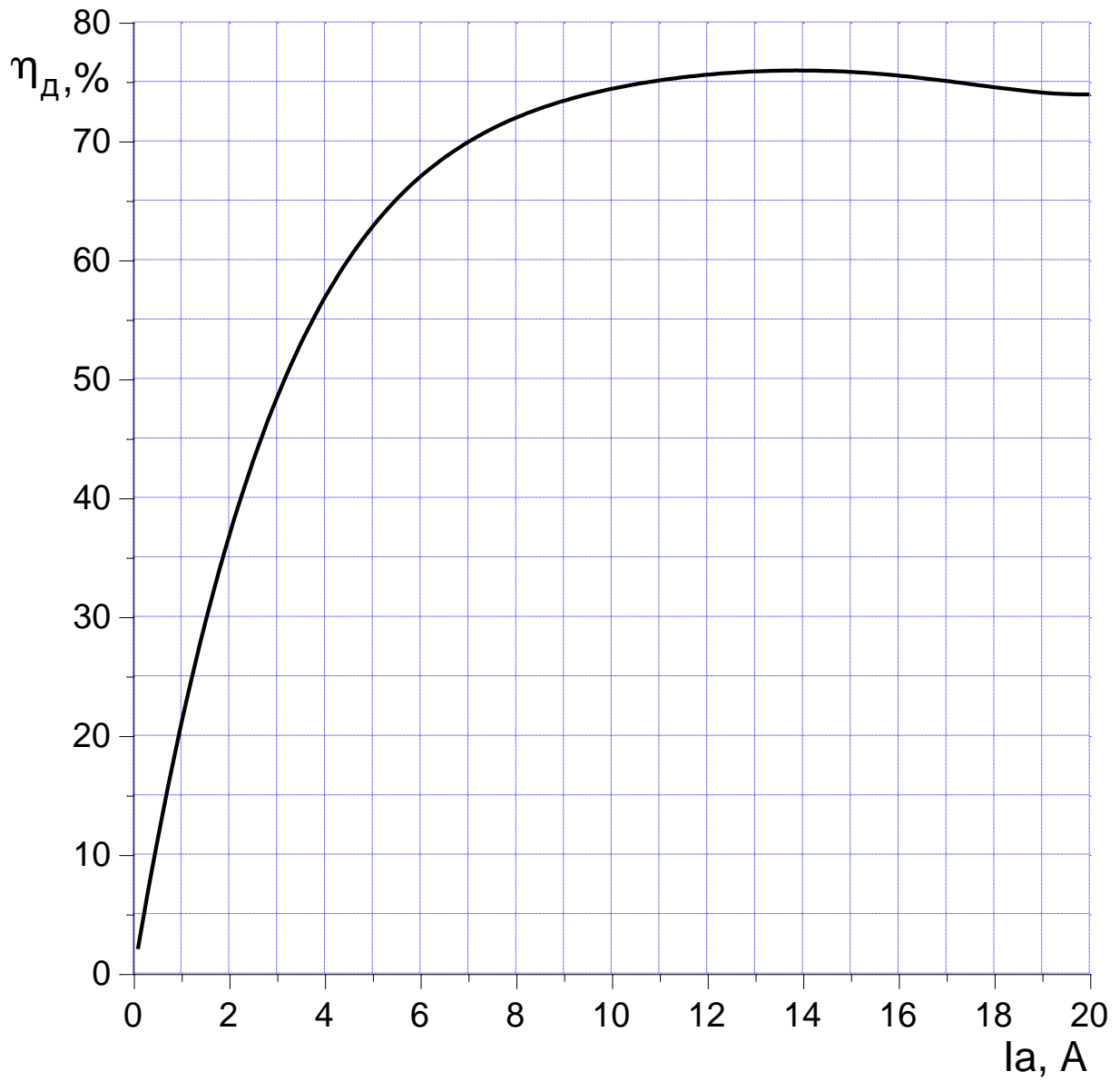


Рисунок 13.7. – Фотография исследуемого агрегата «Асинхронный генератор – приводной двигатель постоянного тока» (номинальные данные – см. рис. 13.5, лист 1 и 2)

Приложение

График зависимости коэффициента полезного действия η_d
двигателя постоянного тока от тока якоря I_a



14. РАБОТА №5

ТРЕХФАЗНАЯ АСИНХРОННАЯ МАШИНА С НЕПОДВИЖНЫМ РОТОРОМ

Оглавление

1. Цель работы	283
2. Программа работы	283
3. Основы теории	284
3.1. Асинхронная машина с фазным ротором как трансформатор	284
3.2. Фазорегулятор	287
3.3. Регулируемая реактивная катушка	289
3.4. Индукционный регулятор	292
4. Экспериментальное исследование	295
4.1. Исследование индукционного регулятора (ИР)	295
4.1.1. Проверка симметрии ИР и определение ЭДС обмотки статора ..	295
4.1.2. Определение зависимости вторичного напряжения от углового положения ротора	296
4.1.2.1. Определение зависимости U_2 по данным эксперимента .	296
4.1.2.2. Определение зависимости $U_{2,гр}$ по векторной диаграмме	297
4.1.2.3. Определение зависимости $U_{2,р}$ на основе аналитического расчета	298
4.1.3. Внешняя характеристика	298
4.2. Исследование регулируемой реактивной катушки (РРК)	299
4.2.1. Зависимость тока РРК от углового положения ротора	299
5. Содержание и оформление отчета	301
6. Контрольные вопросы	301
Рис. 14.1. Схема асинхронной машины с фазным ротором как трансформатора	285
Рис. 14.2. Схема фазорегулятора и векторные диаграммы при холостом ходе	288
Рис. 14.3. Схема регулируемой реактивной катушки	290
Рис. 14.4. Схема и векторная диаграмма индукционного регулятора	293
Рис. 14.5. Схема лабораторной установки для исследования индукционного регулятора.....	296
Рис. 14.6. Схема лабораторной установки для исследования регулируемой реактивной катушки	300
Рис. 14.7. Фотографии приборной панели лабораторного стенда и трехфазной асинхронной машины с неподвижным ротором	302
Рис. 14.8. Червячная передача	302

1. Цель работы

Ознакомиться с особенностями использования асинхронной машины в качестве индукционного регулятора (ИР) и регулируемой реактивной катушки (РРК), со схемами соединения ее обмоток, освоить методику экспериментального получения характеристик, уяснить основные свойства машины, работающей в качестве ИР и РРК.

2. Программа работы

Исследование индукционного регулятора

- 2.1. Записать паспортные данные машины, обосновать выбор обмотки ротора в качестве первичной.
- 2.2. Проверить симметрию первичных и вторичных напряжений.
- 2.3. Измерить фазную ЭДС обмотки статора.
- 2.4. Провести опыт холостого хода регулятора, построить зависимость вторичного напряжения U_2 регулятора от угла поворота ротора, $U_2 = f(\beta^\circ \text{ эл.})$.
- 2.5. Построить векторную диаграмму напряжений регулятора для одной фазы и на ее основании построить зависимость $U_{2.\text{гр}} = f(\beta^\circ \text{ эл.})$.
- 2.6. Определить эту же характеристику $U_{2.\text{р}} = f(\beta^\circ \text{ эл.})$ аналитически.
- 2.7. Провести опыт нагрузки регулятора, построить внешнюю характеристику $U_2 = f(I_2)$.

Исследование регулируемой реактивной катушки

- 2.8. Провести опыт и построить зависимость тока регулируемой реактивной катушки от угла поворота ротора $I = f(\beta^\circ \text{ эл.})$.

3. Основы теории

Асинхронная машина с фазным ротором, помимо основного назначения (асинхронный двигатель), используется *при заторможенном роторе* в качестве:

- 1) поворотного трансформатора для регулирования *фазы напряжения* (фазорегулятор);
- 2) поворотного автотрансформатора для плавного регулирования *величины напряжения* переменного тока (индукционный регулятор);
- 3) регулируемой реактивной катушки для плавного регулирования *величины переменного тока* (регулируемое индуктивное сопротивление).

Регулирование во всех трех случаях достигается *за счет поворота заторможенного ротора*, который осуществляется с помощью самотормозящейся червячной передачи (рис. 14.8).

В лабораторной работе исследуется асинхронная машина с фазным ротором, используемая в качестве индукционного регулятора (ИР), а также регулируемой реактивной катушки (РПК).

Далее рассматриваются асинхронная машина с фазным ротором как трансформатор, а также принципы действия фазорегулятора, регулируемой реактивной катушки и индукционного регулятора.

3.1. Асинхронная машина с фазным ротором как трансформатор

Рассмотрим трехфазную асинхронную машину с неподвижным (заторможенным) фазным ротором. У машины с фазным ротором обмотка статора и обмотка ротора практически не отличаются друг от друга. Обмотка статора первичная и включается в трехфазную сеть с фазным напряжением $U_1 = U_{1л}/\sqrt{3}$, а к фазам вторичной обмотки (это обмотка ротора) через контактные кольца и щетки подключается нагрузка с сопротивлением $Z_{нг}$. На рис. 14.1 приведена электрическая схема асинхронной машины с фазным ротором как трансформатора.

При указанных условиях асинхронная машина работает как трансформатор, но *с вращающимся магнитным полем*, скорость n_1 которого прямо пропорциональна частоте f_1 (при числе пар полюсов $p > 1$ скорость $n_1 = f_1/p$), а при $p = 1$ скорость $n_1 = f_1$. Отметим, что в классическом трансформаторе магнитное поле *неподвижно в пространстве, но пульсирует во времени* с частотой f_1 питающего напряжения. Можно показать, что амплитуда вра-

щающегося поля остается неизменной (при пренебрежении высшими гармониками), а амплитуда пульсирующего поля изменяется во времени.

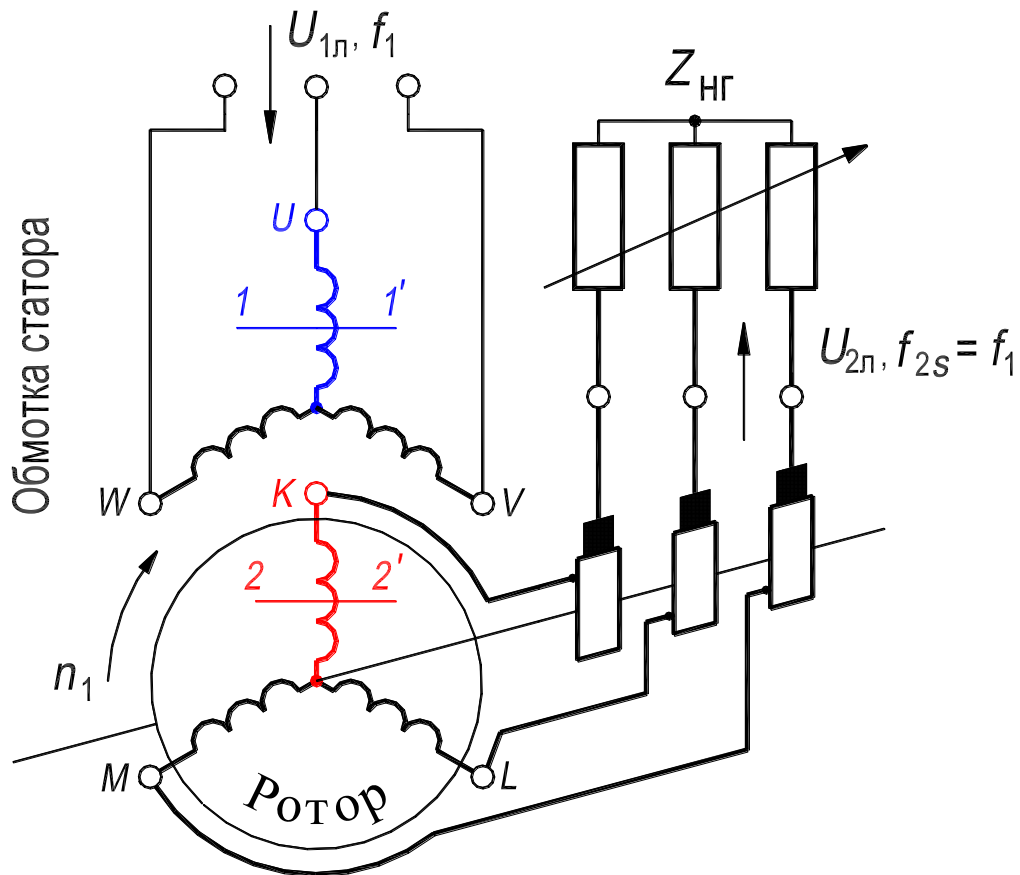


Рисунок 14.1. Схема асинхронной машины с фазным ротором как трансформатора (ротор заторможен, скольжение $s = 1$)

Ток I_1 обмотки статора создает МДС обмотки, которая имеет частоту вращения $n_1 = f_1/p$, об/с. Ток I_2 обмотки неподвижного ротора создает МДС этой обмотки, которая также имеет частоту вращения $n_1 = f_1/p$. Числа пар полюсов p обмотки статора и обмотки ротора должны быть всегда одинаковыми. Таким образом, МДС обмоток статора и ротора взаимно неподвижны. Эти МДС создают результирующий магнитный поток Φ машины, который вращается с частотой n_1 . Значение индукции магнитного поля зависит не только от величины МДС, но и от магнитного состояния машины (магнитная система может быть нелинейной насыщенной или линейной ненасыщенной).

Очевидно, что при неподвижном роторе, как и у классического трансформатора, напряжение обмотки ротора имеет такую же частоту f_1 , что и напряжение обмотки статора. Результирующий магнитный поток Φ

машины индуцирует в обмотке статора и в обмотке ротора ЭДС, действующие значения которых соответственно равны:

$$E_1 = 4.44f_1w_1\Phi_mk_{o1}, \quad (14.1)$$

$$E_2 = 4.44f_1w_2\Phi_mk_{o2}, \quad (14.2)$$

где Φ_m – амплитуда результирующего вращающегося магнитного потока, k_{o1}, k_{o2} – обмоточные коэффициенты соответственно обмоток статора и ротора. Численные значения коэффициентов зависят от схемных особенностей обмоток асинхронной машины и практически всегда несколько меньше единицы. Отметим, что у классического трансформатора значения этих коэффициентов равны единице.

Первичное напряжение U_1 , приложенное к обмотке статора, расходуется на падение напряжения I_1Z_1 и уравнивается ЭДС E_1 этой обмотки, то есть

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + \underline{I}_1\underline{Z}_1. \quad (14.3)$$

Вторичное напряжение U_2 на нагрузке возникает вследствие индуцирования в обмотке ротора ЭДС E_2 . Это напряжение, как и у классического трансформатора, меньше ЭДС на величину падения напряжения на сопротивлении обмотки ротора Z_2 , то есть

$$\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - \underline{I}_2\underline{Z}_2. \quad (14.4)$$

За счет взаимодействия вращающегося магнитного поля с активной составляющей тока ротора возникает электромагнитный вращающий момент, который приложен к ротору, но будет уравниваться тормозной системой. При неподвижном роторе асинхронная машина не преобразует электрическую энергию в механическую или обратно, то есть является электромагнитным, а не электромеханическим преобразователем.

Отметим, что на базе трансформатора с вращающимся магнитным полем можно реализовать преобразователь числа фаз и умножитель частоты, а также управляемый реактор, причем не поворачивая ротор. Ротор будет оставаться неподвижным, и выполнять только функцию магнитопровода. Эти устройства получаются более компактными и конструктивно простыми, чем при их изготовлении на базе классического трансформатора с пульсирующим полем [12].

3.2. Фазорегулятор

Фазорегулятором называется асинхронная машина с фазным ротором, предназначенная для плавного регулирования фазы выходного напряжения U_2 переменного тока за счет поворота ротора.

Фазорегулятор представляет собой, рассмотренный в разд. 3.1 трансформатор с вращающимся полем (рис. 14.1), ротор которого вручную или при помощи вспомогательного (исполнительного) двигателя может быть повернут относительно статора на требуемые углы в пределах 360° эл. Поэтому такой фазорегулятор может быть также назван – *поворотный трансформатор*.

Напомним, что один электрический градус меньше одного геометрического градуса в p раз, то есть $1^\circ \text{ эл.} = 1^\circ \text{ геом.}/p$. В лабораторной работе исследуется асинхронная машина, имеющая шестиполюсные обмотки, $2p = 6$, и, следовательно, справедливо равенство $1^\circ \text{ эл.} = 1^\circ \text{ геом.}/3$.

Назначение фазорегулятора – регулировать фазу напряжения U_2 вторичной обмотки относительно напряжения первичной обмотки U_1 за счет поворота *заторможенного* ротора. Фаза напряжения U_2 зависит от взаимного расположения обмоток ротора и статора, то есть является функцией углового положения ротора. Возможны три характерных варианта расположения этих обмоток (рис. 14.2,*а, б, в*):

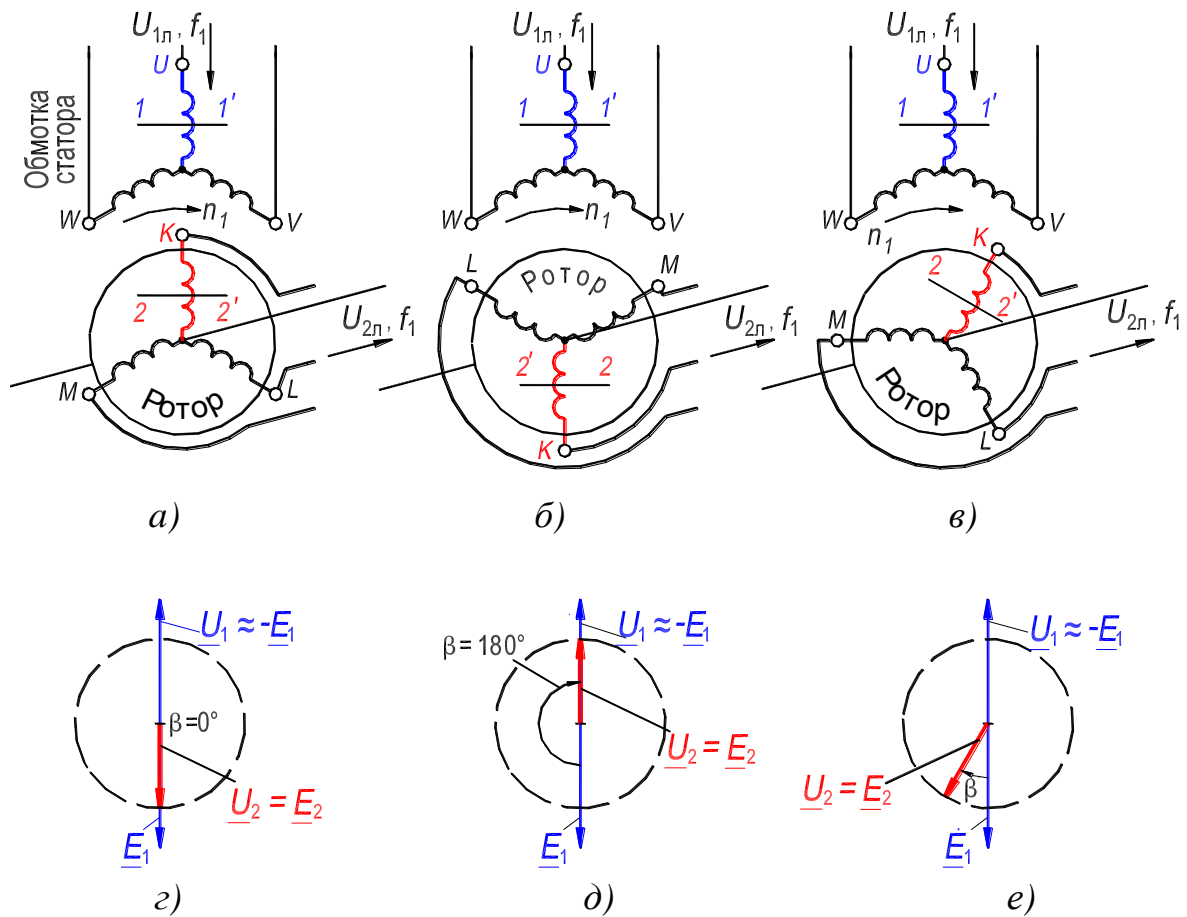


Рисунок 14.2. – Схема фазорегулятора и векторные диаграммы при холостом ходе [червячная передача (см. рис. 14.8), контактные кольца и щетки не показаны]

1) Оси пар соответствующих фаз обмоток статора и ротора в пространстве совпадают. Этот вариант расположения обмоток представлен на рис. 14.2,а. На рис. 14.2 оси пары фаз U и K обозначены соответственно $1-1'$ и $2-2'$;

2) Оси пар соответствующих фаз обмоток статора и ротора сдвинуты в пространстве на 180° эл. Этот вариант расположения обмоток представлен на рис. 14.2,б. Для удобства анализа рис. 14.2 изображен в предположении, что число пар полюсов $p = 1$, тогда 1° эл. = 1° геом. и $n_1 = f_1 = 50$ об/с;

3) Оси пар соответствующих фаз обмоток статора и ротора сдвинуты в пространстве на произвольный угол β° эл. = β° геом. Этот вариант расположения обмоток представлен на рис. 14.2,в.

В первом варианте расположения обмоток результирующий магнитный поток Φ индуцирует в обмотках статора и ротора ЭДС E_1 и E_2

[см. формулы (14.1) и (14.2)], которые достигают амплитудных значений одного и того же знака одновременно, то есть совпадают по фазе (рис. 14.2,з).

Во втором варианте расположения обмоток результирующий магнитный поток Φ также индуцирует в обмотках статора и ротора ЭДС E_1 и E_2 , но они одновременно достигают амплитудных значений противоположных знаков, то есть, сдвинуты по фазе на временной угол 180 градусов (рис. 14.2,д).

В третьем варианте расположения обмоток (общий случай) амплитудному значению ЭДС E_1 в обмотке статора будет соответствовать мгновенное значение ЭДС $E_2 \cdot \cos \beta$ в обмотке ротора, то есть эти ЭДС сдвинуты по фазе на временной угол β градусов (рис. 14.2,е).

Годографом вектора \underline{E}_2 будет окружность (на рис. 14.2,з,д,е она показана пунктиром). При любом значении угла β амплитуда ЭДС обмотки ротора остается неизменной.

Отметим, что векторные диаграммы на рис. 14.2,з,д,е приведены в предположении равенства нулю сопротивлений обмоток статора и ротора, $Z_1 = Z_2 = 0$ [см. уравнения (14.3) и (14.4), которые представлены графически на диаграммах с учетом допущения].

Фазорегуляторы применяют с главным образом в лабораториях, в частности, при испытаниях счетчиков электрической энергии и других приборов и аппаратов.

3.3. Регулируемая реактивная катушка

Регулируемой реактивной катушкой называется асинхронная машина с фазным ротором, предназначенная для плавного регулирования величины переменного тока за счет поворота ротора.

Регулируемая реактивная катушка (РРК), также как и фазорегулятор, представляет собой, рассмотренный в разд. 3.1 трансформатор с вращающимся полем. Однако, в отличие от фазорегулятора, обмотки статора и ротора РРК имеют не только взаимноиндуктивную (магнитную) связь, но также должны быть соединены электрически. Как правило, обмотки соединяются последовательно (рис. 14.3). Ротор РРК, как и фазорегулятора, вручную или при помощи вспомогательного (исполнительного) двигателя может быть повернут относительно статора на требуемые углы.

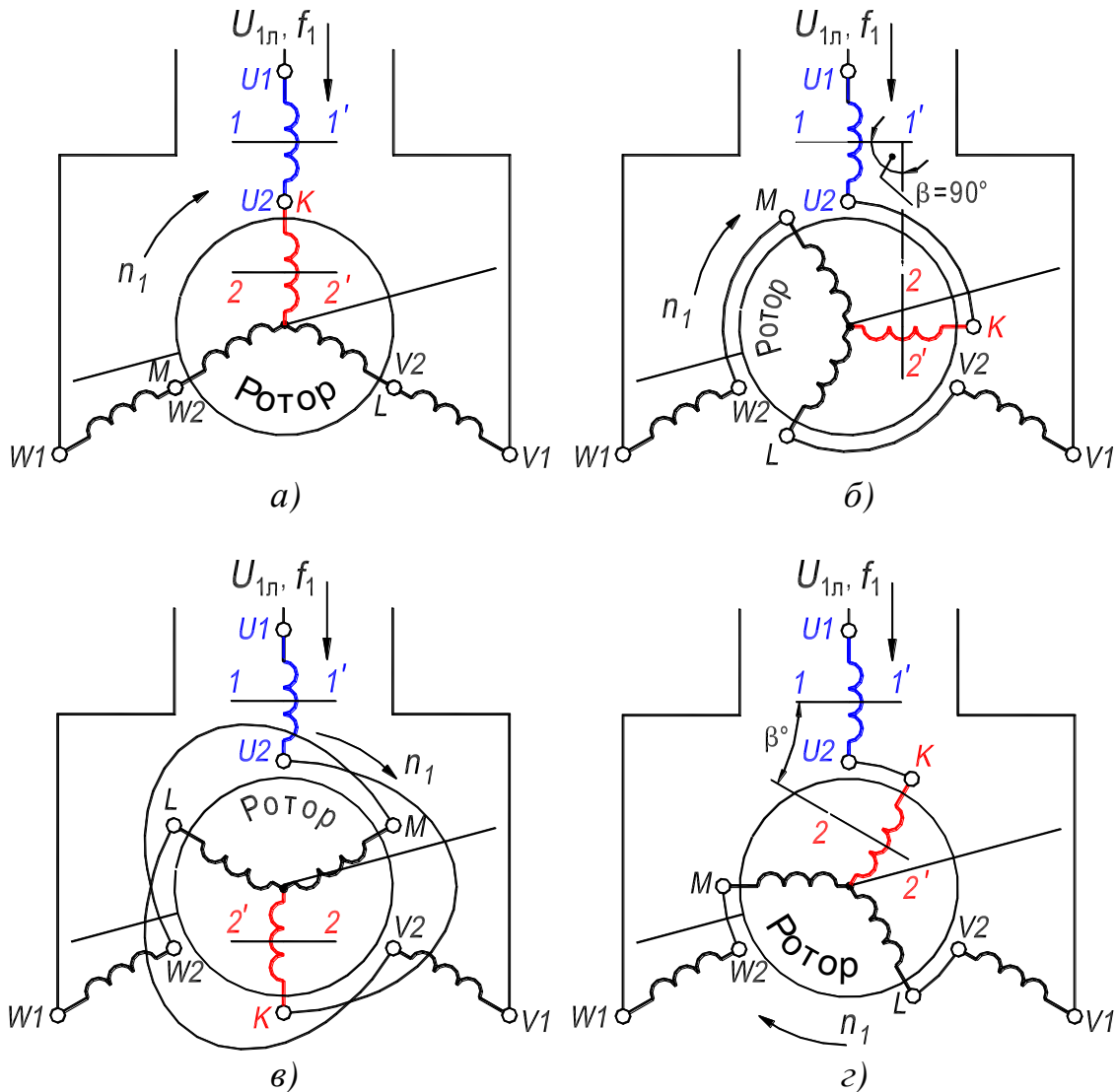


Рисунок 14.3. – Схема регулируемой реактивной катушки

[червячная передача (см. рис. 14.8), контактные кольца и щетки не показаны]

Назначение РРК – регулировать величину тока I обмоток за счет поворота заторможенного ротора. От взаимного расположения обмоток ротора и статора зависит величина сопротивления взаимной индукции X_m между обмотками статора и ротора, и соответственно величина тока в них:

$$X_m = \omega_1 m = 2\pi f_1 m, \quad (14.5)$$

где ω_1 – угловая частота колебаний тока I , $\omega_1 = 2\pi f_1 = 100\pi$; $m = M \cos \beta$ – мгновенное значение взаимной индуктивности, M – наибольшее значение взаимной индуктивности, которое имеет место при равном нулю углу сдвига осей пар соответствующих фаз обмоток статора и ротора, $\beta = 0^\circ$.

- Возможны четыре характерных варианта расположения обмоток (рис. 14.3):
- 1) Оси пар соответствующих фаз обмоток статора и ротора в пространстве совпадают, $\beta = 0^\circ$. Этот вариант расположения обмоток представлен на рис. 14.3,а. На рис. 14.3 оси пары фаз U и K обозначены соответственно $1 - 1'$ и $2 - 2'$. Взаимная индуктивность максимальная, $m = +M$, так как весь вращающийся магнитный поток Φ пересекает поперечное сечение катушек фаз обмоток;
 - 2) Оси пар соответствующих фаз обмоток статора и ротора сдвинуты в пространстве на 90° эл. Этот вариант расположения обмоток представлен на рис. 14.3,б. Для удобства анализа рис. 14.3 изображен в предположении, что число пар полюсов $p = 1$. Взаимная индуктивность равна нулю, $m = 0$, так как магнитный поток Φ не пересекает поперечное сечение катушек фаз обмоток ротора, а ориентируется вдоль их сечения;
 - 3) Оси пар соответствующих фаз обмоток статора и ротора сдвинуты в пространстве на 180° эл. Этот вариант расположения обмоток представлен на рис. 14.3,в. Взаимная индуктивность $m = -M$, так как в этом случае, как и в первом, весь магнитный поток Φ пересекает поперечное сечение катушек фаз обмоток, но в противоположном направлении;
 - 4) Оси пар соответствующих фаз обмоток статора и ротора сдвинуты в пространстве на произвольный угол β° эл. $= \beta^\circ$ геом. Этот вариант расположения обмоток представлен на рис. 14.3,г. Взаимная индуктивность $m = M \cos \beta$, так как только часть магнитного потока равная $\Phi_m \cos \beta$ пересекает поперечное сечение катушек фаз обмоток.

Таким образом, взаимная индуктивность и поток взаимной индукции между обмотками статора и ротора изменяются пропорционально $\cos \beta$, что определяет *параболический характер изменения тока I* в обмотках РРК при повороте ротора. Необходимо отметить, что за счет поворота ротора плавно регулируется реактивная (индуктивная) составляющая тока, и соответственно реактивная мощность, потребляемая РРК.

Заметим также, что на базе трансформатора с *вращающимся* магнитным полем можно реализовать РРК не поворачивая ротор. Он будет оставаться неподвижным и выполнять только функцию магнитопровода. Изменение реактивной мощности в таком устройстве (оно называется *управляемый реактор*) достигается за счет изменения магнитного насыщения и сопротивления ярм

статора и ротора при их подмагничивании постоянным магнитным полем [12].

Управляемые реакторы используются в линиях электропередачи, в распределительных электросетях и системах электроснабжения промышленных предприятий для улучшения режимов их работы.

3.4. Индукционный регулятор

Индукционным регулятором называется асинхронная машина с фазным ротором, предназначенная для плавного регулирования напряжения переменного тока за счет поворота ротора [термин 6] (ГОСТ 27471–87. Машины электрические вращающиеся. Термины и определения).

Наряду с термином *индукционный регулятор* используется также термин *потенциал-регулятор*.

Индукционный регулятор (ИР) реализуется по типу асинхронной машины с фазным заторможенным ротором, причем обмотка статора и обмотка ротора соединены по *автотрансформаторной* схеме (рис. 14.4,а). Назначение индукционного регулятора – плавно регулировать напряжение переменного тока на его выходе за счет поворота ротора. Индукционный регулятор также называется *поворотным автотрансформатором*.

Ротор ИР, также как и фазорегулятора и регулируемой реактивной катушки, может быть повернут относительно статора вручную или при помощи вспомогательного (исполнительного) двигателя на требуемые углы.

В качестве первичной чащи используется обмотка ротора, которая подсоединяется к питающей сети параллельно. Обмотка статора включается последовательно между сетью и нагрузкой (рис. 14.4,а). Возможны другие схемы включения обмоток. Напряжение регулируется устройством на нагрузке.

При включении индукционного регулятора в сеть с фазным напряжением U_1 токи в обмотке ротора создают вращающийся магнитный поток, который в фазах обмотки ротора индуцирует ЭДС E_1 ($E_1 \approx -U_1$), а в фазах обмотки статора – ЭДС E_2 . Фаза ЭДС E_2 относительно ЭДС E_1 изменяется и зависит от угла сдвига β осей пар соответствующих фаз обмоток статора и ротора. Эта зависимость такая же, как и в фазорегуляторе (см. разд. 3.2 и рис. 14.2).

Фазное напряжение на нагрузке U_2 (это вторичное напряжение ИР) определяется геометрической суммой по существу двух ЭДС: E_1 и E_2 . Если не учитывать падение напряжения в обмотках, то фазное напряжение на выходе индукционного регулятора представляется в виде:

$$\underline{U}_2 = \underline{U}_1 + \underline{E}_2 \cos \beta. \quad (14.6)$$

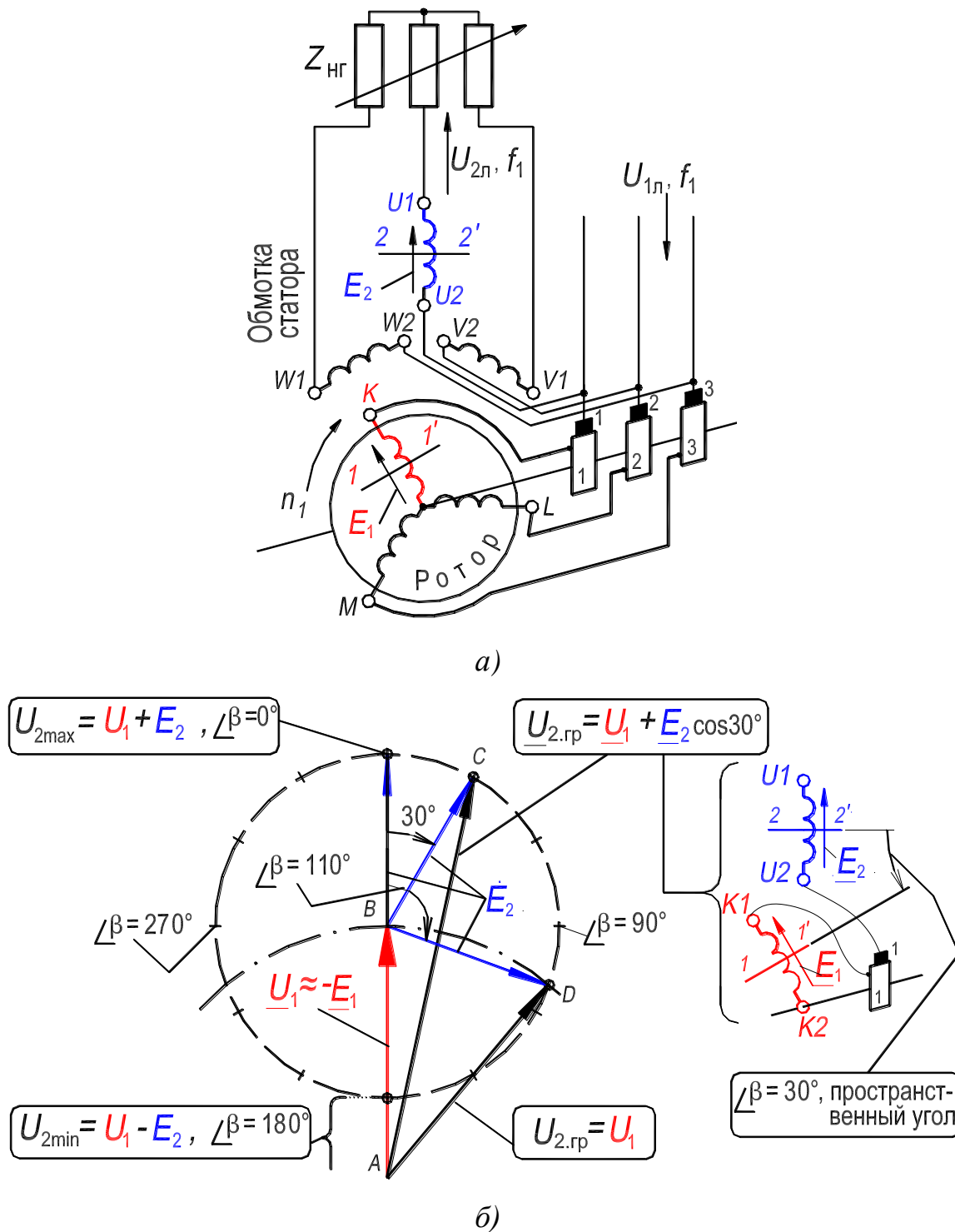


Рисунок 14.4. – Схема (а) и векторная диаграмма (б) индукционного регулятора [червячная передача не показана (см. рис. 14.8)]

При совпадении осей пар соответствующих фаз обмоток статора и ротора угол $\beta = 0^\circ$ и напряжение на выходе ИР наибольшее, $U_{2\max} = U_1 + E_2$. Если оси пар соответствующих фаз обмоток статора и ротора смещены на угол $\beta = 180^\circ$ (для удобства анализа считаем, что $p = 1$), то напряжение на выходе ИР наименьшее, $U_{2\min} = U_1 - E_2$.

При повороте ротора на произвольный угол β напряжение на выходе ИР будет принимать промежуточные значения, $U_{2\min} < U_2 < U_{2\max}$. Изменение напряжения U_2 от углового положения ротора при холостом ходе ИР представлено на рис. 14.4,б. Годографом векторов \underline{E}_2 и \underline{U}_2 является окружность (показана пунктирной линией).

4. Экспериментальное исследование

Индукционный регулятор (ИР) и регулируемая реактивная катушка (РРК) представляют собой асинхронную машину с фазным ротором, ротор которой заторможен посредством самотормозящейся червячной передачи (рис. 14.8). При вращении червячной передачи, ротор плавно поворачивается относительно статора.

4.1. Исследование индукционного регулятора

Схема индукционного регулятора приведена на рис. 14.5. На рис. 14.7 – фотографии приборной панели лабораторного стенда и исследуемого регулятора. В качестве первичной использована обмотка ротора, которая подсоединена к питающей электросети параллельно. Обмотка статора – вторичная и включена последовательно между сетью и нагрузкой. Обмотки статора и ротора соединены между собой на щетках.

Ротор поворачивается вручную посредством червячной передачи. Угол поворота ротора, выраженный в электрических градусах, в p раз больше угла поворота ротора, измеренного в геометрических градусах; $1^\circ \text{эл.} = 1^\circ \text{геом.}/p$, где $p = 3$ – число пар полюсов обмоток.

4.1.1. Проверка симметрии ИР и определение ЭДС обмотки статора

Осуществить опыт при холостом ходе ИР в следующей последовательности.

- 1) Пакетный выключатель $QS1$ установить в положение «Отключено»: нагрузочный реостат $RR_{\text{нГ}}$ отключен, ИР переведен на холостой ход;
- 2) Включить автомат $QF2$: на обмотки ИР подано напряжение электросети $U_1 = 127 \text{ В}$;
- 3) Посредством червячной передачи выставить ротор в положение, при котором линейное напряжение U_2 на выходе регулятора равно линейному напряжению U_1 на его входе, $U_2 = U_1 = 127 \text{ В}$ (вольтметр $PV1$) (см. точку D на рис. 14.4,б).
- 4) Измерить и записать в табл. 14.1 значения:
 - а) линейных напряжений сети на входе ИР (начала фаз $U1, V1, W1$ обмотки статора или начала фаз K, L, M обмотки ротора);
 - б) линейных напряжений на выходе регулятора (концы фаз $U2, V2, W2$ обмотки статора);
 - в) фазной ЭДС $E_2 = U_{U1-U2}$ обмотки статора.

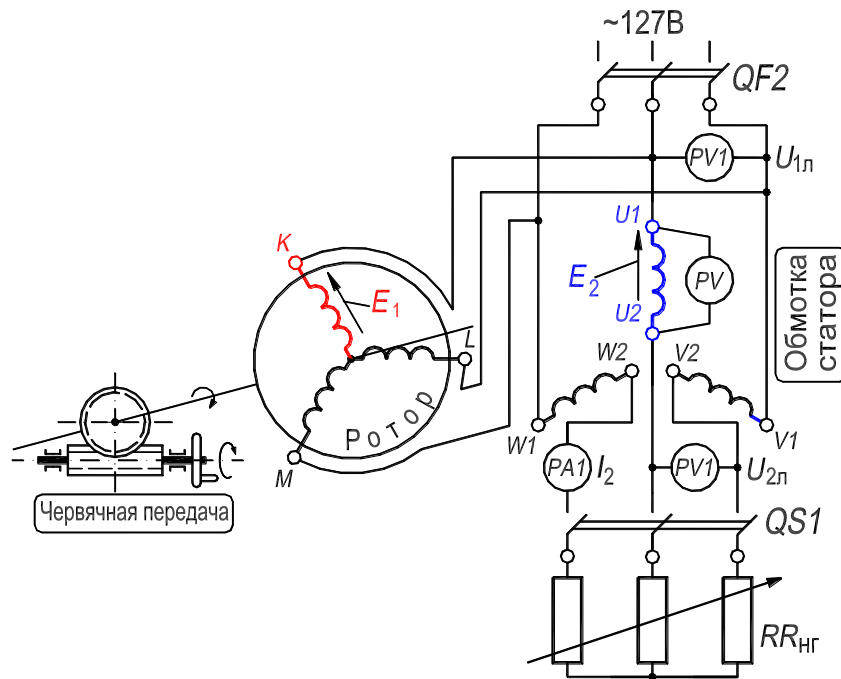


Рис. 14.5. Схема лабораторной установки для исследования ИР (обмотки соединены встречно; ротор заторможен; щетки и контактные кольца не показаны)

Таблица 14.1. – Проверка симметрии ИР

Линейные напряжения						Коэффициенты несимметрии напряжений			Фазная ЭДС обмотки статора
На входе ИР			На выходе ИР						
U_{U1-V1}	U_{V1-W1}	U_{W1-U1}	U_{U2-V2}	U_{V2-W2}	U_{W2-U2}	α_1	α_2	α_3	$E_2 = U_{U1-U2}$
В	В	В	В	В	В	–	–	–	В

Коэффициенты несимметрии напряжений, обусловленной регулятором, определить по формулам:

$$\alpha_1 = (U_{U1-V1} - U_{U2-V2})/U_{U1-V1};$$

$$\alpha_2 = (U_{V1-W1} - U_{V2-W2})/U_{V1-W1};$$

$$\alpha_3 = (U_{W1-U1} - U_{W2-U2})/U_{W1-U1}.$$

От углового положения ротора зависит фаза ЭДС E_2 , действующее значение ее остается без изменений, $E_2 = \text{const}$.

4.1.2. Определение зависимости вторичного напряжения от углового положения ротора

4.1.2.1. Определение зависимости U_2 по данным эксперимента

Осуществить опыт при холостом ходе ИР в следующей последовательности.

- 1) Пакетный выключатель $QS1$ установить в положение «Отключено»: нагрузочный реостат $RR_{нГ}$ отключен, ИР переведен на холостой ход;

2) Включить автомат $QF2$: на обмотки ИР подано напряжение электросети $U_1 = 127 \text{ В}$;

3) Посредством червячной передачи выставить ротор в положение, при котором линейное напряжение на выходе регулятора равно максимальному, $U_2 = U_{\max}$ (вольтметр $PV1$; в этом положении *стрелка на шкале червячной передачи расположена на “ U_{\max} ”, см. рис. 14.7,б). Принять, что это положение ротора соответствует началу отсчета угла поворота ротора, то есть $\beta = 0^\circ$ (угол β измеряется между осями пар соответствующих фаз обмоток статора и ротора, а именно: U и K , V и L , W и M);*

4) Плавно поворачивать ротор [$0^\circ \leq (\beta^\circ \text{ геом.}) \leq 120^\circ$] и через каждые 30° эл. (*шкала на червячной передаче проградуирована в электрических градусах*) измерять и записывать в табл. 14.2 значения:

а) линейного напряжения $U_{1л} = U_{U1-V1}$ на входе регулятора;

б) линейного напряжения $U_{2л} = U_{U2-V2}$ на выходе регулятора.

Построить экспериментальную зависимость $U_{2л} = f(\beta^\circ \text{ эл.})$ линейного напряжения на выходе регулятора от углового положения ротора.

Таблица 14.2. – Измерение и расчет зависимости вторичного напряжения ИР от положения ротора

β° геом.	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
β° эл.	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	360
$U_{1л}$	В												
$U_{2л}$	В												
$U_{2л.гр}$	В												
$U_{2л.р}$	В												

4.1.2.2. Определение зависимости $U_{2л.гр} = f(\beta^\circ \text{ эл.})$ по векторной диаграмме

Линейное значение напряжения $U_{2л.гр}$ на выходе регулятора может быть определено графически на основе векторной диаграммы, которая строится в соответствии с уравнением

$$\underline{U}_{2л.гр} = \sqrt{3} \cdot \underline{U}_{2.гр} = \sqrt{3} \cdot (\underline{U}_1 + \underline{E}_2). \quad (14.7)$$

Порядок построения диаграммы (рис. 14.4,б).

1) Принять масштаб напряжения $m_u = 12 \text{ В/см}$: в этом масштабе строится диаграмма;

2) Изобразить вертикально отрезок AB , соответствующий фазному напря-

жению $U_1 = U_{1л}/\sqrt{3}$ на входе регулятора (значение линейного напряжения $U_{1л}$ – см. табл. 14.2), длина отрезка составляет $|U_1|/m_u$;

3) Провести окружность с центром в точке B : ее радиус BC соответствует в масштабе m_u фазной ЭДС E_2 обмотки статора, $BC = |E_2|/m_u$ (значение E_2 – см. табл. 14.1); отрезок AC в масштабе соответствует фазному напряжению $U_{2л.гр}$ на выходе регулятора;

4) Сделать на окружности засечки, соответствующие значениям угла β° эл., приведенным в табл. 14.2. Каждой засечке соответствует текущее положение точки C , а также положение отрезков BC и AC . Искомое *линейное* напряжение на выходе регулятора определяется по выражению $U_{2л.гр} = \sqrt{3} \cdot m_u \cdot AC$;

5) Определить значения линейного напряжения $U_{2л.гр} = \sqrt{3} \cdot m_u \cdot AC$ для всех дискретных значений угла (β° эл.) и записать в табл. 14.2.

4.1.2.3. Определение зависимости $U_{2л.р} = f(\beta^\circ \text{ эл.})$ на основе аналитического расчета

Значение линейного напряжения на выходе регулятора можно рассчитать по формуле:

$$U_{2л.р} = \sqrt{3} \cdot [(U_{1л}/\sqrt{3} + E_2 \cos \beta)^2 + (E_2 \sin \beta)^2]^{1/2},$$

где $U_{1л}$ – линейное напряжение на входе регулятора (табл. 14.2); E_2 – фазная ЭДС обмотки статора (табл. 14.1); угол β измерен в электрических градусах.

Рассчитать по формуле (14.8) значения линейного напряжения $U_{2л.р}$ для всех дискретных значений угла (β° эл.) и записать в табл. 14.2.

При сопоставлении значений напряжения $U_{2л}$, $U_{2л.гр}$ и $U_{2л.р}$ на выходе регулятора (см. табл. 14.2), необходимо принять во внимание, что при построении векторной диаграммы не учитывалось падение напряжения в обмотке ротора регулятора.

4.1.3. Внешняя характеристика

Внешняя характеристика индукционного регулятора $U_{2л} = f(I_2)$ представляет зависимость вторичного напряжения на выходе регулятора $U_{2л}$ от тока нагрузки I_2 при постоянных значениях: напряжения на входе регулятора, $U_{1л} = \text{const}$; угла поворота ротора, $\beta = \text{const}$; коэффициента мощности

нагрузки, $\cos \varphi_2 = \text{const}$.

Осуществить опыт при нагрузке в следующей последовательности (рис. 14.5).

- 1) Пакетный выключатель $QS1$ установить в положение «Отключено»: регулятор установлен на холостой ход;
- 1) Включить автомат $QF2$: на обмотки ИР подано напряжение электросети $U_{1л} = 127 \text{ В}$;
- 2) Посредством червячной передачи выставить ротор в положение, при котором линейное напряжение $U_{2л}$ на выходе регулятора равно линейному напряжению $U_{1л}$ на его входе, $U_{2л} = U_{1л} = 127 \text{ В}$ (вольтметр PVI ; см. точку D на рис. 14.4,б). Ток нагрузки $I_2 = 0$. Записать значения $U_{2л}$ и I_2 в табл. 14.3. В процессе опыта положение ротора не изменять;
- 3) Пакетный выключатель $QS1$ установить в положение «Включено»: к выходу регулятора подсоединен нагрузочный реостат $RR_{нг}$; нагрузка активная, $\cos \varphi_2 = 1.0$;
- 4) Переключая пакетные выключатели нагрузочного реостата $RR_{нг}$ увеличивать ток I_2 до значения примерно равного $1,2 \cdot I_{2н}$ обмотки статора. Записать значения напряжения и тока, соответствующие 5–7 точкам, в табл. 14.3 и построить внешнюю характеристику индукционного регулятора $U_{2л} = f(I_2)$.

Таблица 14.3. – Внешняя характеристика ИР

$U_{2л}$	В								
I_2	А								

4.2. Исследование регулируемой реактивной катушки

Схема для исследования РРК приведена на рис. 14.6. В схеме, представленной на рисунке, обмотки статора и ротора соединены (на щетках) последовательно.

4.2.1. Зависимость тока РРК от углового положения ротора

Осуществить опыт в следующей последовательности.

- 1) Автомат $QF2$ установить в положение «Отключено»;
- 2) Посредством червячной передачи выставить ротор в положение, при котором стрелка на шкале червячной передачи расположена на « U_{max} ». При

этом положении ротора ток в обмотках РРК *должен иметь* минимальное значение, $I = I_{\min}$;

3) Включить автомат *QF2*: на обмотки РРК подано напряжение электросети $U_{1л} = 127$ В. Уточнить положение ротора, соответствующее $I = I_{\min}$ (амперметр *PA1*). Принять, что это положение ротора соответствует началу отсчета угла поворота ротора, то есть $\beta = 0^\circ$;

4) *Плавно* поворачивать ротор по часовой стрелке [$0^\circ \leq (\beta^\circ \text{ геом.}) \leq 60^\circ$] и через каждые 30° эл. измерять и записывать в табл. 14.4 значения тока

5) Вернуть ротор в исходное положение, соответствующее углу $\beta = 0^\circ$;

6) *Плавно* поворачивать ротор против часовой стрелки [$-60^\circ \leq (\beta^\circ \text{ геом.}) \leq 0^\circ$] и через каждые 30° эл. измерять и записывать в табл. 14.4 значения тока I .

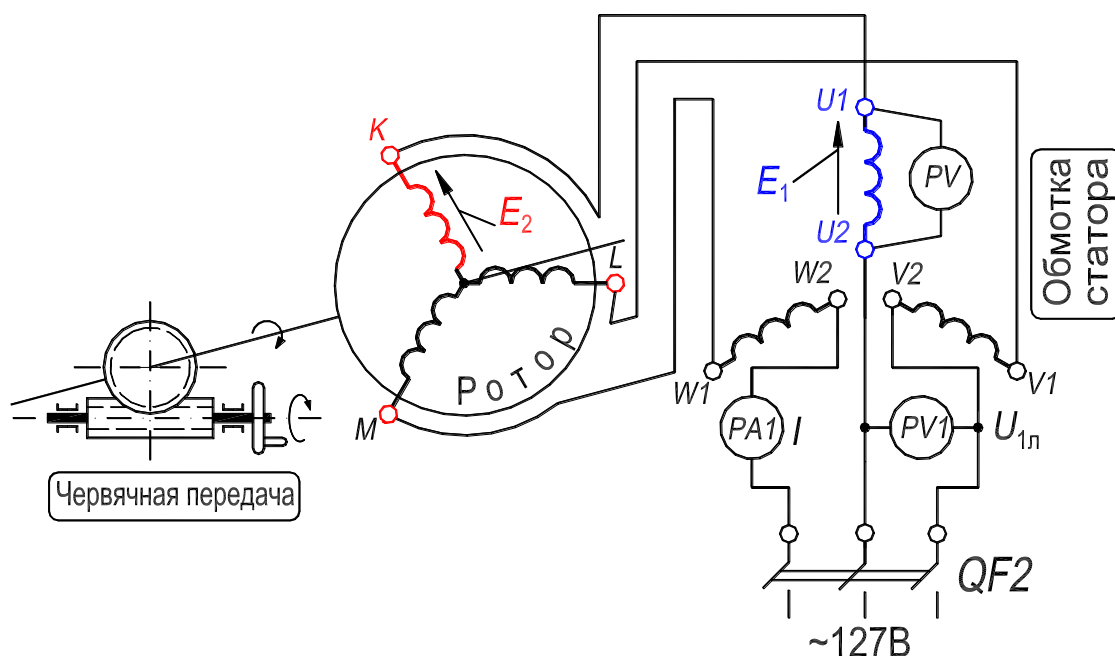


Рисунок 14.6. – Схема лабораторной установки для исследования РРК (обмотки соединены встречно; ротор заторможен; щетки и контактные кольца не показаны)

Построить зависимость $I = f(\beta^\circ \text{ эл.})$.

Таблица 14.4. – Зависимость тока РРК от положения ротора

$\beta^\circ \text{ геом.}$	-60	-50	-40	-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50	60
$\beta^\circ \text{ эл.}$	-180	-150	-120	-90	-60	-30	0	30	60	90	120	150	180
$I, \text{ A}$													

5. Содержание и оформление отчета

Отчет должен содержать:

1. Титульный лист.
2. Оглавление.
3. Программу лабораторной работы.
4. Номинальные данные асинхронного двигателя с фазным ротором.
5. Номинальные данные индукционного регулятора.
6. Схемы испытаний ИР и РРК (рис. 14.5 и 14.6).
7. Результаты опытов и расчетов, представленных в таблицах 14.1–14.4; ниже каждой таблицы приводятся формулы для расчета величин. Затем размещаются графические зависимости, соответствующие таблицам (см. далее пп. 8.1–8.4).
8. Экспериментальные и расчетные графические зависимости:
 - 8.1 $U_{2л} = f(\beta^\circ \text{ эл.})$ – график зависимости напряжения на выходе ИР от углового положения ротора (см. разд. 4.1.2.1);
 - 8.2. Векторная диаграмма индукционного регулятора (см. разд. 4.1.2.2.);
 - 8.3. $U_{2л} = f(I_2)$ – внешняя характеристика индукционного регулятора (см. разд. 4.1.3);
 - 8.4. $I = f(\beta^\circ \text{ эл.})$ – график зависимости тока РРК от углового положения ротора (см. разд. 4.2.1).

Текст отчета оформить в текстовом процессоре *MS Word* (шрифт *Times New Roman*, 12 пт.). Графики строить в интерактивном графическом пакете *Grapher*. Схему опыта вычертить в интерактивном графическом пакете *AutoCAD*. Все отчеты по лабораторным работам раздела Асинхронные машины подшить в одну общую простую папку-скоросшиватель с прозрачной обложкой. Листы отчета в файл / файлы не вставлять.

6. Контрольные вопросы

1. Назначение, устройство и электрическая схема: 1) индукционного регулятора; 2) регулируемой реактивной катушки.
2. Принцип действия: 1) индукционного регулятора; 2) регулируемой реактивной катушки.
3. Достоинства и недостатки индукционного регулятора.
4. Причина более частого использования в качестве первичной обмотки ИР обмотки ротора.

5. Понятие об электрическом угле поворота ротора.
6. Причина изменения выходного напряжения ИР при изменении величины его нагрузки.



a)



б)

Рисунок 14.7. – Фотографии приборной панели лабораторного стенда – (a) и трехфазной асинхронной машины с неподвижным ротором – (б): $p = 3$

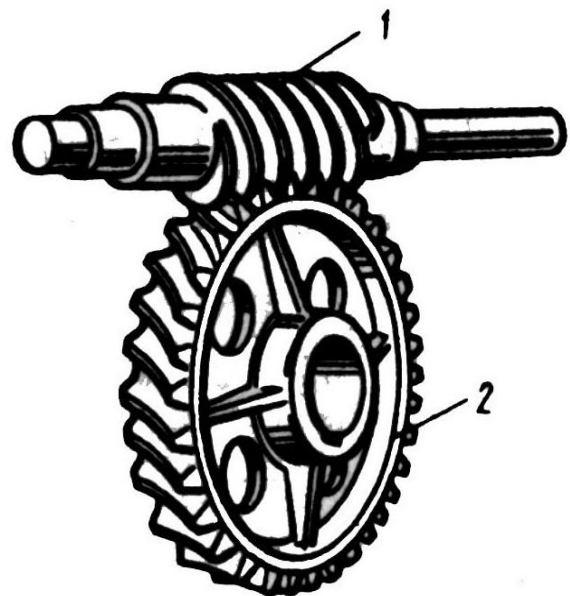


Рисунок 14.8. – Червячная передача: червяк – 1, зубчатое колесо – 2

Литература

1. Копылов И. П. Электрические машины: Учебник. – 5-е изд., перераб. – М.: Высшая школа, 2006.
2. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины: В 2-х т. Тома 1 и 2. Учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд-во МЭИ, 2004.
3. Вольдек А. И. Электрические машины. – Л.: «Энергия», 1978.
4. Петров Г. Н. Электрические машины. В 3-х частях. Ч. 2. Асинхронные и синхронные машины. Учебник для вузов – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1963.
5. Проектирование электрических машин : учебник для вузов / под ред. И. П. Копылова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Издательство Юрайт, 2011.
6. Забудский Е. И. Конструкция и технология сборки электрических машин. В 5-ти частях. Ч. 1. Трансформаторы. Ч. 2. Асинхронные машины. Ч. 3. Синхронные машины. Ч. 4. Машины постоянного тока. Ч. 5. Электростанции: Видеофильм. – М.: МГАУ, 2004 (разработано в Power Point). <http://zabudsky.ru/index1.html>.
7. Забудский Е. И. Электрические машины. Ч. 1. Трансформаторы. Учебное пособие для вузов. – М.: МГАУ, 2002. – 166 с. <http://zabudsky.ru/soderghanie.html>.
8. Забудский Е. И. Электрические машины. Ч. 3. Синхронные машины. Учебное пособие для вузов. – М.: МГАУ, 2008. – 195 с. http://zabudsky.ru/Sm_Up.html.
9. Забудский Е. И. Электрические машины. Ч. 4. Машины постоянного тока. Учебное пособие для вузов. – М.: МГАУ, 2014. – 160 с. http://zabudsky.ru/MPT_UP.html.
10. Забудский Е. И. Математическое моделирование управляемых электроэнергетических устройств: Учебное пособие для вузов. – Ульяновск: УЛГТУ, 1998. – 120 с. <http://zabudsky.ru/Up1.html>.
11. Забудский Е. И. Анализ управляемых электроэнергетических устройств методом конечных элементов: Учебное пособие для вузов. – Москва: МГАУ, 1999. – 141 с. <http://zabudsky.ru/Up2.html>.
12. Забудский Е. И. Совмещенные регулируемые электромагнитные реакторы: Монография. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 436 с. <http://zabudsky.ru/regreak.html>.
13. Забудский Е. И. Учебно-методический комплекс по дисциплине «Электрические машины» (Интернет-реализация, <http://zabudsky.ru>).
14. Справочник по электрическим машинам. В 2-х т. / Под общ. ред. И.П. Копылова и Б.К. Клокова. М.: Энергоатомиздат, 1988, 1989.
15. ГОСТ 27471–87. Машины электрические вращающиеся. Термины и определения.
16. ГОСТ Р 52776–2007. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики.
17. ГОСТ 31606–2012. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные мощностью от 0,12 до 400 кВт включительно. Общие технические требования.
18. ГОСТ 9630–80. Двигатели трехфазные асинхронные напряжением свыше 1000 В. Общие технические условия.
19. ГОСТ 7217–87. Машины электрические вращающиеся. Двигатели асинхронные. Методы испытаний.
20. ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ» <http://nd.gostinfo.ru/default.aspx>.

URL-адреса заводов, производящих асинхронные двигатели

URL-адрес	Наименование предприятия
http://www.vemp.ru	Владимирский электромоторный завод, г. Владимир
http://www.eldin.ru	Ярославский электромашиностроительный завод, г. Ярославль

Учебное издание

Евгений Иванович Забудский

Электрические машины

Часть 2 Асинхронные машины

Учебное пособие

Издается в авторской редакции

Оригинал-макет *Светлана Минченко*

Дизайн обложки *Полина Шапошникова*

Подписано в печать 24.07.2017. Формат 70x100/16.

Усл.-печ. л. 17,7. Тираж 100 экз. Заказ № 9

ООО «Мегаполис»

www.m-megapolis.ru; Тел.: +7 (499) 391-34-54

E-mail: zakaz@m-megapolis.ru

125413, Москва, ул. Флотская, д. 17, корп. 2

Отпечатано в ПАО «Т8 Издательские Технологии»

Тел.: +7 (499) 322-38-31

109316, Москва, Волгоградский проспект, д. 42, корп. 5