

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА»

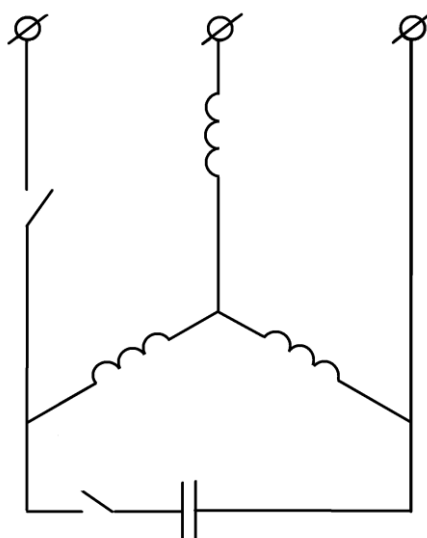
ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

В.Ф. Васильев, В.И. Королёв, М.С. Тимофеев, Е.А. Южакова

АСИНХРОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ В ТРЁХФАЗНОМ (Y) И ОДНОФАЗНОМ РЕЖИМАХ

Часть 1

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2019

УДК 621.313 (075)

ББК 31.291.я7

В 191

Васильев В.Ф., Королёв В.И., Тимофеев М.С., Южакова Е.А. Асинхронный двигатель в трёхфазном (Y) и однофазном режимах: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2019. Часть 1. – 35 с.

Учебное пособие по работе асинхронного двигателя в трёхфазном (Y) и однофазном режимах предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электропривод и автоматика».

Рецензент:

Ковалев Е.Н., канд. техн. наук, ведущий инженер ООО НПО «Санкт-Петербургская электротехническая компания».

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве учебного пособия.

Редактор и техн.редактор Титова Л.Я. Темплан 2019,поз.82

Подп. к печати Формат 60×84/16. Бумага тип. № 1

Печать офсетная. Изд. л.2,25. Печ.л. 2,25. Тираж 30 экз. Изд. № 82

Цена «С». Заказ

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095, СПб., ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2019

© Васильев В.Ф., Королёв В.И.,

Тимофеев М.С., Южакова Е.А., 2019

Введение

Испытания по электрическим машинам для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электропривод и автоматика», выполняются в лаборатории электротехники кафедры автоматизированного электропривода и электротехники. Здесь на стационарных стендах проводятся ознакомительные работы. На стендах, оснащенных новой измерительной аппаратурой, проводятся более углубленные испытания электрических машин, результат которых можно использовать в курсовых проектах.

В учебном пособии кратко рассмотрены основные теоретические сведения и приведены экспериментальные результаты трехфазного асинхронного двигателя (АД), статорная обмотка которого соединена «звездой». Отключение одной фазы приводит этот двигатель к однофазному режиму работы (ОАД). Здесь приводятся результаты достаточно подробных испытаний двигателя. Появляется реальная возможность сравнительного анализа с однофазным конденсаторным двигателем, рассмотренным в учебном пособии: «Асинхронные конденсаторные двигатели, Спб., 2018. Ч.1. - 24с.».

1.Некоторые замечания

Значительная часть электрической энергии, вырабатываемой в развитых странах, преобразуется в промышленности и на транспорте в механическую энергию электрическими двигателями. Существенное место среди них занимают трёхфазные асинхронные двигатели (АД). Особенную популярность они приобрели после масштабного внедрения преобразователей частоты (ПЧ), которые не только регулируют частоту вращения ротора, но и совместно с периферийными устройствами участвуют в автоматизированном процессе. Выпускаются специально обученные преобразователи частоты, например, лифтового, вентиляционного и другого оборудования.

В 1889 году наш соотечественник Михаил Осипович Доливо - Добровольский изобрел трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором. Двигатель оказался настолько удачным, что конструкция его практически не изменилась до настоящего времени, но масса и габариты существенно уменьшились.

В августе 1891 года во Франкфурте-на-Майне (Германия) проходила Всемирная электротехническая выставка. С этой даты, как считают, в мире началась эра интенсивного практического развития электротехники. По результатам выставки решился многолетний спор: трехфазный переменный или постоянный ток?

На выставке были продемонстрированы полномасштабные эксперименты применения трехфазного синхронного генератора, трехфазных трансформаторов, трехпроводная ЛЭП длиной 175 км от Лауфенского водопада до Франкфурта, напряжением 15 кВ и КПД передачи энергии ~75 %.

Знаменитый американский изобретатель и владелец электростанций на постоянном токе Томас Алва Эдисон проиграл.

2. Конструкция и принцип работы АД

Конструкция представлена на рис.1. На неподвижном статоре (поз.6) расположена симметричная обмотка (три фазы). Оси фаз сдвинуты в пространстве на 120° ($p=1$, одна пара полюсов).

Начала фаз C1,C2,C3 (U1,V1,W1) и их концы C4,C5,C6 (U2,V2,W2) выведены на корпус статора (поз.4). От трехфазной сети (A,B,C) к обмотке подводится напряжение 220 В при соединении фаз в треугольник или 380 В - в звезду. Токи фаз сдвинуты во времени на 120° . И при наличии третьего условия равенства чисел витков $W1=W2=W3$, фазные токи создают единое вращающееся с синхронной скоростью $n_1=f_1 60 / p$ об/мин круговое магнитное поле, здесь $f_1=50$ Гц-частота сетевого напряжения. Для сетевой частоты и $f=70$ Гц (от

ПЧ) ниже приводится так называемый синхронный ряд скоростей, представленный в табл.1.

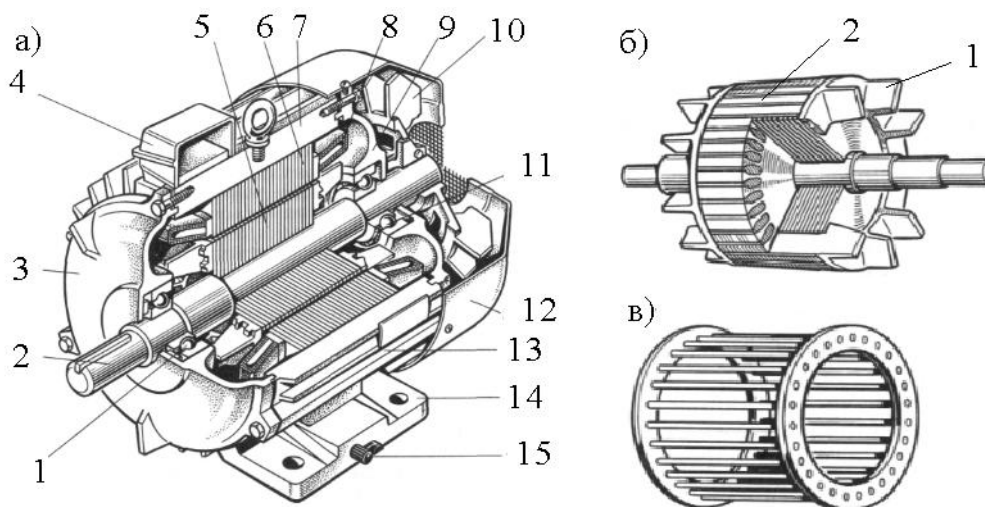


Рис.1. Устройство трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором: а – 1, 11 - подшипники, 2 - вал, 3, 9 - подшипниковые щиты, 4 – коробка выводов, 5 - сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой, 6 – сердечник статора с обмоткой, 7 - корпус, 8 - обмотка статора, 10 - вентилятор, 12 - кожух вентилятора, 13 - наружная оребренная поверхность корпуса, 14 - лапы, 15 - болт заземления; б – 1- литая обмотка, 2- электротехническая сталь; в – короткозамкнутая обмотка ротора без сердечника

Магнитное поле пересекает проводники ротора и, согласно закону электромагнитной индукции (1881 г.), наводит ток $I_{2S} = E_{2S} / z_2$, где E_{2S} - ЭДС, $z_2 = \sqrt{r^2 + x_{2S}^2}$ - полное, r_2 - активное, x_{2S} - индуктивное сопротивления фазы.

Таблица 1

Синхронный ряд скоростей

P		1	2	3	4	5...
$n_1,$ мин ⁻¹	50 Гц	3000	1500	1000	750	
	70 Гц	4200	2100	1400	1050	

Взаимодействие тока и магнитного потока создает (закон Ампера, 1820 г.) вращающий момент $M \sim I_{2S} \cdot \Phi_m$. Следовательно, двигатель преобразует электрическую энергию сети, подводимую к обмотке статора, в механическую энергию вращения вала. Скорость вращения ротора n_2 строго меньше n_1 , т.к. при $n_2 = n_1$ будет отсутствовать пересечение проводников ротора магнитным полем и, как

следствие этому, $E_{2s} = 0$ ($s=0$).

Относительная разность $(n_1 - n_2)/n_1$ называется скольжением s - единственный переменный параметр двигателя. На механической характеристике $M(s)$ (рис.2) показаны реперные точки скольжения для двигателя с одной парой полюсов ($n_1=3000$ об/мин). После подключения к регулируемому источнику питания ротор начинает вращаться с минимальной скоростью $n_{2TP} \sim 450$ об/мин при напряжении ~ 50 В.

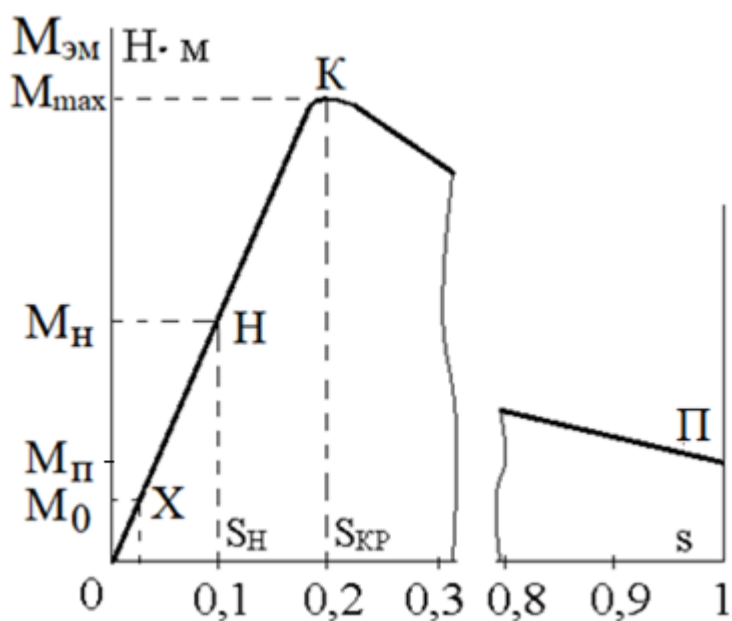


Рис.2. Зависимость электромагнитного момента от скольжения:

X – режим холостого хода, n_{20} , M_0 , s_0 ; H – номинальный режим, n_{2H} , M_{2H} , s_H ;
 K – максимальный режим, n_{2KP} , M_{KP} , s_{KP} ; П – режим пуска, $n_2=0$, $M_{П}$, $s=1$

Максимальная скорость $n_{20}=2976$ об/мин достигается при номинальном напряжении $U_H=380$ В и соответствует точке X (рис. 2) – режим холостого хода. Мощность сети компенсирует все потери (электрические, магнитные, механические) и создаёт вращающий момент холостого хода M_0 .

Рост нагрузки приводит к номинальному режиму H и далее максимально допустимому моменту K (рис. 2). Момент соответствует критическому скольжению s_{KP} .

Это скольжение делит характеристику $M(s)$ на устойчивую - ХК и неуст-

тойчивую часть – КП (рис.2). Запуск двигателя в ход осуществляется чаще всего при номинальном напряжении из точки П ($s = 1$). Под действием своего пускового момента M_{Π} двигатель самостоятельно запускается и переходит на устойчивую часть характеристики КХ.

3. Преобразование энергии в АД

На обмотку статора поступает активная мощность

$$P_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad (1)$$

где U_1, I_1 - линейные напряжение и ток, $\cos \varphi_1$ - коэффициент мощности, φ_1 - угол сдвига между фазными напряжением и током, r_1 - активное сопротивление фазы, r_0 - отвечает за потери в магнитопроводе. Процесс преобразования энергии схематично показан на рис.3. Часть мощности затрачивается на покрытие электрических потерь в обмотке статора $p_{1эл} = 3r_1 I_1^2$ и магнитных потерь в стали статора $p_{мг}$.

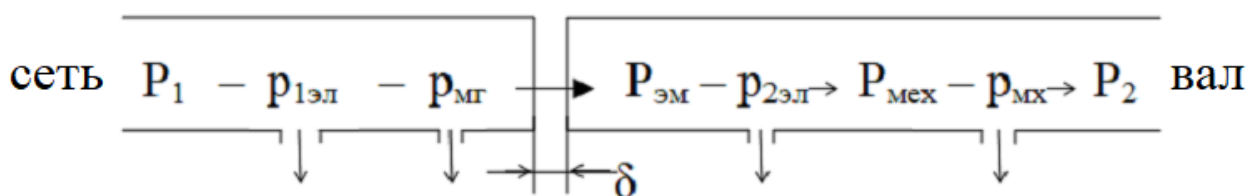


Рис. 3. Энергетическая диаграмма преобразования энергии

Мощность, передаваемая через рабочий (воздушный) зазор δ , называется электромагнитной мощностью

$$P_1 - p_{1эл} - p_{мг} = P_{эм}. \quad (2)$$

Разность этой мощности и мощности омических потерь в обмотке ротора преобразуется в механическую $P_{мех}$ развиваемую двигателем

$$P_{\text{эм}} - p_{2\text{эл}} = P_2 - r_2' I_2'^2 = P_{\text{мех}}, \quad (3)$$

где r_2' , I_2' - параметры ротора, приведенные к обмотке статора.

Процесс преобразования завершится после вычета механических потерь в подшипниках и вентиляционных потерь

$$P_{\text{мех}} - p_{\text{мх}} = P_2 = 9.52 M_2 n_2, \quad (4)$$

где P_2 - полезная механическая мощность (мощность на валу машины).

Можно установить соотношения между электромагнитной, механической мощностями, мощностью потерь в обмотке ротора и моментом. Согласно уравнению (3) определяются потери в обмотке ротора

$$r_2' I_2'^2 = P_{\text{эм}} - P_{\text{мех}} = \Omega_1 M_{\text{эм}} - \Omega_2 M_{\text{эл}} = \Omega_1 M_{\text{эм}} (\Omega_1 - \Omega_2) / \Omega_1 = P_{\text{эм}} s, \quad (5)$$

где $\Omega_1 = 2\pi n_1$, $\Omega_2 = 2\pi n_2 = 2\pi n_1 (1-s)$ – угловые скорости. Из уравнения (5) можно получить следующие выражения:

$$P_{\text{эм}} = r_2' I_2'^2 / s M_{\text{эм}} = r_2' I_2'^2 / \Omega_1 s, \quad (6)$$

$$P_{\text{мех}} = (1-s) P_{\text{эм}}, \quad (7)$$

из равенства (6) следует, что двигатель не работоспособен при $r_2' = 0$.

Важным местом в работе двигателя является его запуск в ход, который осуществляется при $s=1$. Согласно формуле (7) $P_{\text{мех}} = 0$. Но с другой стороны,

$$P_2 = r_2' I_2'^2, \quad M_{\text{эм}} = \frac{r_2' I_2'^2}{2\pi n_1} \quad (8)$$

отличны от нуля. Отсюда следует: электрическая мощность, выделяемая в обмотке ротора, равна механической мощности, под действием которой ротор начинает вращаться.

Работа АД оценивается механической характеристикой, представляющей собой графическую зависимость момента от скольжения (рис.2), и аналитически определяется из схемы замещения

$$M_{\text{ЭМ}} = C_M \cdot \frac{r_2'/s}{(r_1 + r_2'/s)^2 + (x_1 + x_2')^2}, \quad (9)$$

где $C_M = 3pU_1^2 / 2\pi f_1$ – постоянная момента, p – число пар полюсов, U_1 – фазное напряжение, f_1 – частота питающего напряжения, r_1, x_1 – параметры фазы обмотки статора, r_2', x_2' – приведенные параметры обмотки ротора, $r_1 + r_2' = r_K$, $x_1 + x_2' = x_K$ – параметры короткого замыкания рабочей ветви, r_1, x_1, r_0, x_0 – параметры ветви намагничивания Г-образной схемы замещения (рис.4):

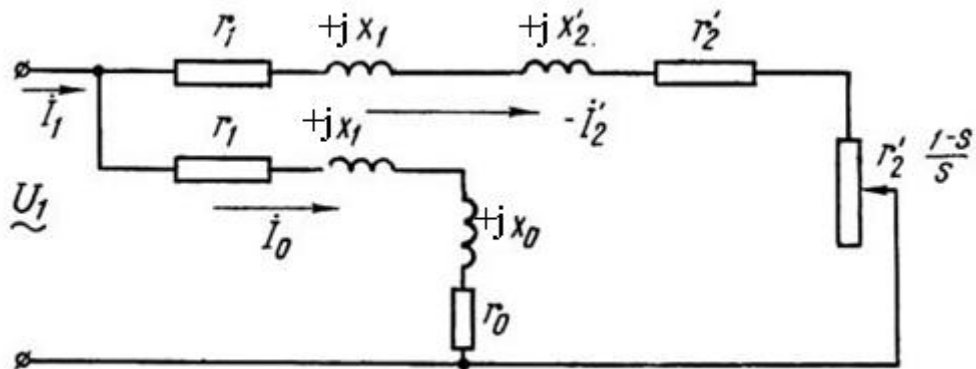


Рис.4. Г-образная схема замещения

Критическое скольжение, при котором $M_{\text{ЭМ}}$ достигает максимальное значение, определяется из условия $dM_{\text{ЭМ}}/ds = 0$:

$$s_{\text{КР}} = r_2' / \sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}. \quad (10)$$

Заменив скольжение в уравнении (9) критическим (10), получим выражение максимального момента:

$$M_{\text{ЭМ max}} = \frac{C_M}{2 \left(r_1 + \sqrt{r_1^2 + x_K^2} \right)}. \quad (11)$$

В расчетах двигателей «средней» мощности сопротивлением r_1 можно пренебречь, выражения (10) и (11) упрощаются:

$$s_{\text{КР}} = r_2' / x_K, \quad M_{\text{ЭМ max}} = C_M / 2x_K. \quad (12)$$

4. Испытания АД при питании от трехфазной сети

Двигатель трехфазный – 4ААМ50В2У3, $f_1=50$ Гц, 220/380 В, 0.67/0.39 А (ток округлен до второго знака), $P_2 = 120$ Вт – полезная механическая мощность, $n_2 = 2700$ об/мин, $\cos \varphi = 0.75$, $\eta = 0.63$.

Расчет номинального режима: подводимая из сети электрическая мощность $P_1 = \sqrt{3} U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = \sqrt{3} \cdot 220 \cdot 0.39 \cdot 0.75 = 193$ Вт (U_1 , I_1 - линейные напряжение и ток), $P_1 = P_2/\eta = 120 / 0.63=190$ Вт. Суммарные потери мощности в номинальном режиме $\Delta p = P_1 - P_2 = 193 - 120 = 73$ Вт, номинальное скольжение $s_n = (n_1 - n_2)/n_1 = (3000 - 2700)/3000 = 0.1$, полезный механический момент $M_2 = P_2/0.105 \cdot n_2=120 / 0.105 \cdot 2700 = 0.42$ Н/м.

4.1. Режим ХХ двигателя

Испытания проводятся по схеме рис.5. От регулируемого трехфазного трансформатора (ЛАТР) подается сетевое напряжение 380 В. На зажимах статора напряжение в процессе испытаний изменяется от номинального до ~ 50 В. Принятые обозначения: I_0 - фазный ток ХХ статорной обмотки при со-

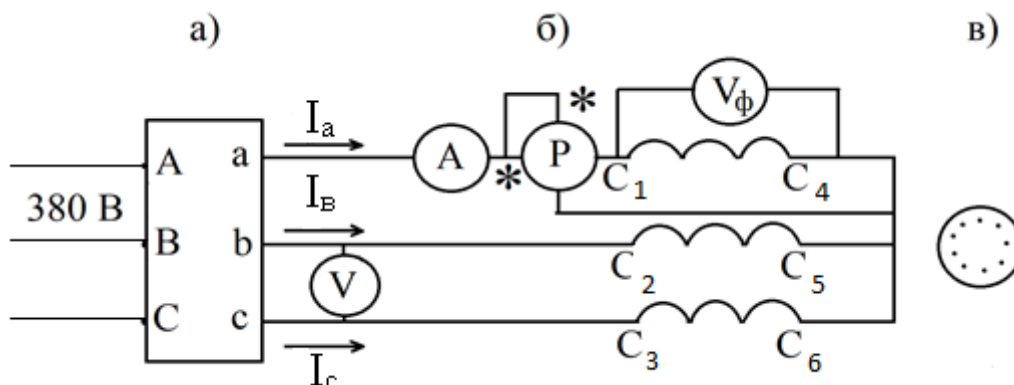


Рис.5 Схема установки:
а - ЛАТР; б- обмотка статора; в- ротор

единении звездой (Y). $P_0 = 3P_\phi$ – мощность, потребляемая двигателем, P_ϕ – фазная мощность, $r_1 = 85 \text{ Ом}$ – сопротивление фазы обмотки, измеренное мультиметром при комнатной температуре (20°C).

Расчет параметров фазы обмотки при номинальном напряжении $U=220 \text{ В}$. Коэффициенты мощности – $\cos \varphi_0 = P_0 / 3U_0I_0 = 53 / 3 \cdot 0.29 \cdot 220 = 0.27$ ($\varphi = 74^\circ$). Сопротивления: полное $z_0 = U_1 / I_0 = 220 / 0.29 = 758 \text{ Ом}$, активное $r_0 = z_0 \cdot \cos \varphi_0 = 758 \cdot 0.28 = 204 \text{ Ом}$, индуктивное - $x_0 = z_0 \cdot \sin \varphi_0 = 758 \cdot \sin 74^\circ = 729 \text{ Ом}$.

Потери в обмотке статора - $p_{1эл} = 3 \cdot I_0^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 0.29^2 \cdot 85 = 21 \text{ Вт}$. Активная составляющая тока $I_{0a} = 0.07 \text{ А}$, реактивная составляющая $I_{0p} = 0.27 \text{ А}$. Разность $P_0 - p_{1эл} = P'_0 = 53 - 21 = 32 \text{ Вт}$ равна сумме механических потерь в стали (магнитные потери) $P'_0 = p_{мг} + p_{мх}$. Для разделения потерь строят зависимость $P'_0 = f(U^2)$ (рис.6). Потери в стали имеют квадратичную зависимость от напряжения, а механические потери не имеют.

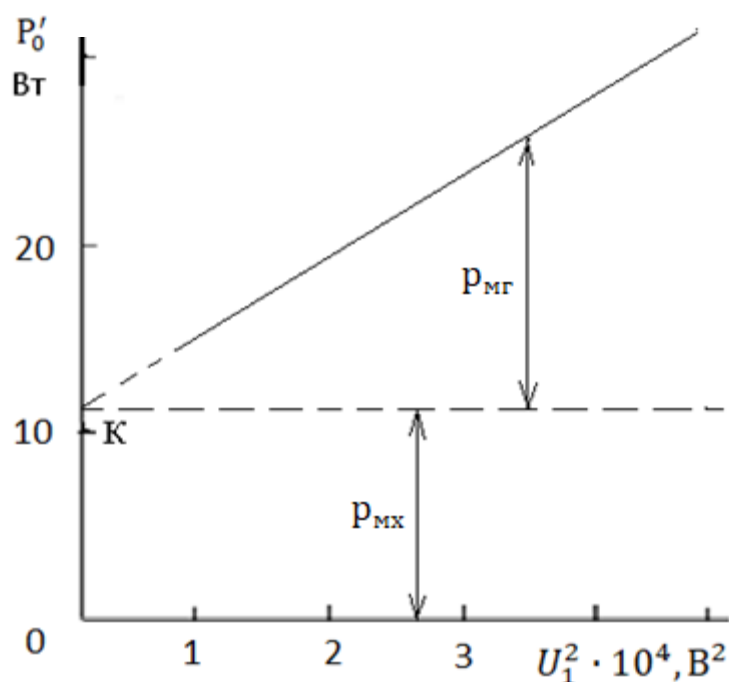


Рис. 6. Разделение магнитных и механических потерь

Зависимость $P'_0(U^2)$ представляет собой практически прямую линию. Пересечение этой линии с осью абсцисс в точке К образует отрезок, в масштабе

мощности равный механическим потерям. Здесь $p_{мх} \sim 12$ Вт, $p_{мг} \sim 20$ Вт при номинальном напряжении (220 В).

4.2. Режим КЗ (ротор заторможен)

Схема испытаний остаётся такой же, как и в опыте ХХ (рис.5). Ротор жестко фиксируется с пьезодатчиком и измеряет электромагнитную мощность

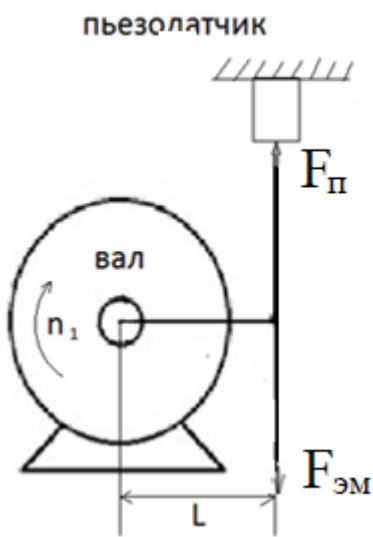


Рис.7. Определение электромагнитного момента

(рис.7). Двигатель становится не вентилируемым. Во избежание перегрева обмоток применяется принудительное охлаждение и ограничивается время проведения опыта. Результаты измерений и расчетов приведены в табл.2.

Принятые обозначения: I_k - фазный ток, U_k - фазное напряжение, $P_k = 3P_{кф}$ - мощность, потребляемая двигателем, $P_{кф}$ - фазная мощность, $r_1 = 85$ Ом.

Расчет параметров обмотки фазы при номинальном токе $I_{кн} = I_n$. Все величины, измеренные при этом номинальном токе, обозначаются с добавлением индекса н : $I_{кн} = 0.39$ А, $U_{кн} = 60$ В, $P_{кн} = 63$ Вт, полное сопротивление $z_{кн} = U_{кн} / I_{кн} = 60 / 0.39 = 154$ Ом,

Таблица 2

Результаты измерений (КЗ) и расчетов

U_k	I	P_k	z_k	r_k	x_k	$p_{элk}$	$P_{эмk}$	$I_{кп}$	$P_{кп}$	M	$\cos\phi_k$	$M_{экс}$
В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Вт	Вт	А	Вт	Н·м	-	Н·м
60	0.39	63	154	138	68	39	14	1.4	847	0.044	0.897	0.066
110	0.67	204	164	151	64	114	80	1.34	816	0.26	0.923	0.248
127	0.78	267	163	146	73	155	102	1.35	801	0.33	0.898	0.292

активное - $r_{кн} = Z_{кн} \cdot \cos \varphi_{кн} = 154 \cdot 0.9 = 138 \text{ Ом}$, индуктивное - $x_{кн} = Z_{кн} \cdot \sin \varphi_{кн} = 154 \cdot \sin 26^\circ = 68 \text{ Ом}$, коэффициент мощности - $\cos \varphi_{кн} = P_{кн} / 3U_{кн} I_{кн} = 63/3 \cdot 0.39 \cdot 60 = 0.9$, $\varphi_k = 26^\circ$.

Электрические потери - $p_{1элкн} = 3 \cdot I_{кн}^2 \cdot r_1 = 3 \cdot 0.39^2 \cdot 85 = 39 \text{ Вт}$, потери в стали $p_{мгкн} \sim 3 \text{ Вт}$, электрические потери в обмотке ротора - $p_{2элкн} = P_{кн} - p_{1элкн} - p_{мгкн} = 63 - 39 - 3 = 21 \text{ Вт}$ (рис.8).

Как следует из выражения (7) при $n_2=0$, а также из рис.8, механическая мощность $P_{мех}=0$. Следовательно, как ранее отмечалось на с.8, вся тепловая мощность, выделяемая в обмотке ротора, эквивалентна механической.

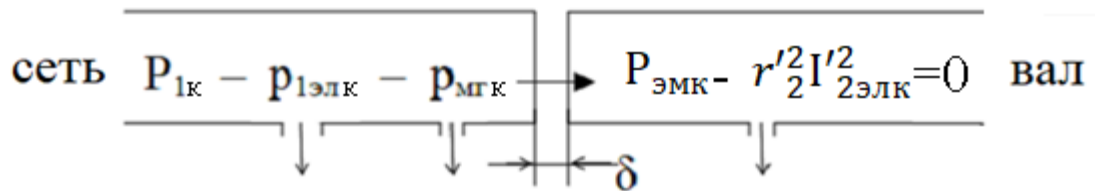


Рис.8. Энергетическая диаграмма преобразования энергии (КЗ)

Согласно расчету электромагнитный момент равен

$$M_{пкн} = \frac{P_{2элкн}}{0.105 \cdot n_1} = \frac{21}{0.105 \cdot 3000} = 0.066 \text{ Н/м.}$$

Расчет данных для двух последующих измерений приводится в последнем столбце табл. 2.

4.3. Испытание АД при нагрузке

Результаты измерений представлены в табл.3 и по ним построены зависимости основных параметров от нагрузки.

Данные нагрузки

n_2	I	P	U ₋	I ₋	P ₋
об/мин	А	Вт	В	А	Вт
2952	0.29	69	50	0.27	14
2831	0.32	135	100	0.62	62
2760	0.35	192	120	0.64	77
2680	0.4	219	130	0.8	104
2592	0.46	285	145	0.84	120
2545	0.48	306	150	0.9	135

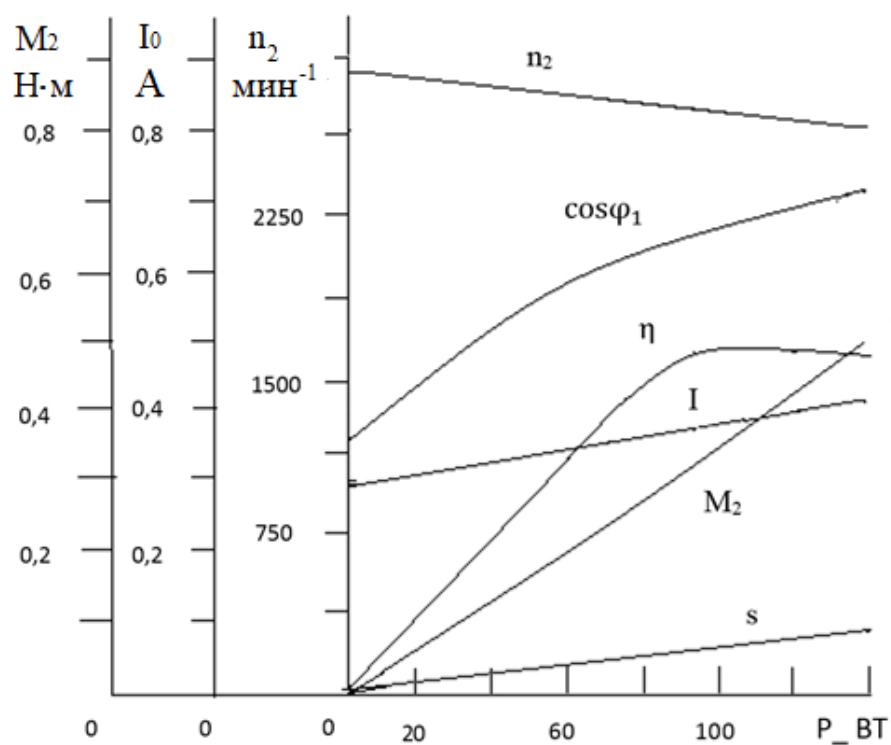


Рис. 9. Рабочие характеристики двигателя

5. Однофазный асинхронный двигатель (ОАД или ОД)

Переход в однофазный режим целесообразно осуществить без останова двигателя, работающего в режиме ХХ, отключением автомата B_1 при разомкнутом B_2 (рис.10). При этом необходимо помнить о существенной асимметрии таких двигателей. Для безопасности приборов заранее следует снизить сетевое напряжение, не допуская останова двигателя, загрузить ваттметры и быть готовым переключить один из них, в фазе которого обмотка перейдет в генераторный режим. Для продолжения работы следует восстановить номинальное напряжение.

5.1. Режим ХХ

Для получения максимальной информации об электромагнитных процессах в цепь каждой фазы (А, В, С) включаются амперметры I_1, I_2, I_3 , вольтметры U_1, U_2, U_3 и электродинамические ваттметры P_1, P_2, P_3 . Кроме этого, к клеммам

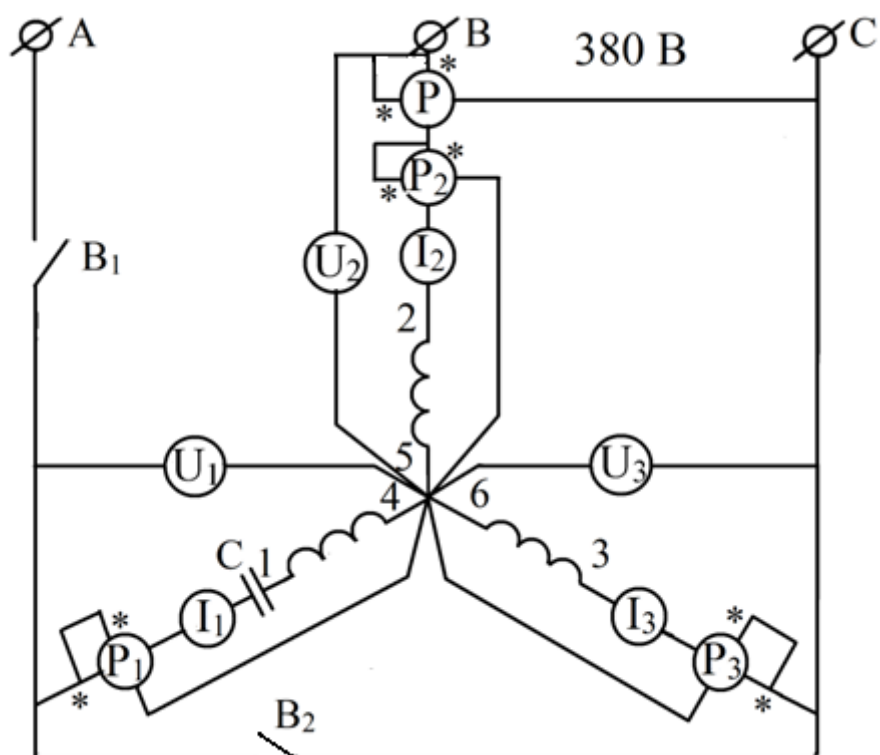


Рис.10. Схема обмотки статора

В и С подсоединяется контрольный ваттметр Р, измеряющий алгебраическую сумму мощностей фаз ($P_1 + P_2 + P_3$). Результаты опыта сведены в табл.4.

В первой строке таблицы для наглядности и сопоставления с однофазным двигателем приводятся уже известные результаты трехфазного двигателя. По средним значениям мощностей и токов определяются параметры фазы обмотки статора: полное сопротивление - $z = U / I_\phi = 220 / 0.29 = 772$ Ом, активное сопротивление, обусловленное омической диссипацией в обмотке и стали - $r = P_\phi / I_\phi^2 = 17.6 / 0.29^2 = 217$ Ом, индуктивное - $X = \sqrt{z^2 - r^2} = \sqrt{772^2 - 217^2} = 741$ Ом; $\cos \phi = P_\phi / U I_\phi = 17.6 / 220 \cdot 0.29 = 0.28$. Из последнего выражения угол сдвига между фазными напряжением и током $\phi = 74^\circ$. МДС обмотки статора трехфазного двигателя $I = 1.5 I_m = 1.5 \cdot 0.29 \cdot \sqrt{2} = 0.6$ А (в масштабе тока).

Таблица 4

Холостой ход однофазного двигателя

С	n_2	P_1	I_1	P_2	I_2	P_3	I_3	Р
мкФ	мин ⁻¹	Вт	А	Вт	А	Вт	А	Вт
-	2980	$I_{cp} = 0.29$ А, $P_{cp} = 17.6$ Вт						53
0	2964	- 2	~ 0	- 2	0.4	67	0.4	64
2	2977	24	0.24	4	0.28	25	0.36	53
3	2976	44	0.4	20	0.25	0	0.35	67
8	2910	108	0.84	56	0.62	-50	0.3	114

Информация по однофазному двигателю приводится во второй строке этой таблицы. Без конденсатора и отключённом автомате В2 фазы В и С соединены последовательно и по ним протекает ток $I = 0.4$ А.

Как следует из табл.4, не только обмотка фазы В, но и отключенная от сети обмотка фазы А, незначительно генерируют. Вся мощность, поступающая из сети, сосредоточена в фазе С ($P_3 = 67$ Вт). Входной ваттметр Р показывает на 3- 4 Вт меньше, чем P_3 , тем самым подтверждая генерацию фаз А и В. Существенно изменились и параметры обмоток: $z_2 = U_2 / I_2 = 215 / 0.4 = 538$ Ом,

$r_2 = P_2 / I_2^2 = 2 / 0.4^2 = 12 \text{ Ом}$, $x_2 \sim 538 \text{ Ом}$, $\cos \varphi_2 = -P_2 / U_2 I_2 = -2 / 215 \cdot 0.4 = -0.023$, $\varphi_2 = 91^\circ$; $z_3 = U_3 / I_3 = 230 / 0.4 = 575 \text{ Ом}$, $r_3 = P_3 / I_3^2 = 67 / 0.4^2 = 419 \text{ Ом}$, $\cos \varphi_3 = P_3 / U_3 I_3 = 67 / 230 \cdot 0.4 = 0.72$, $\varphi_3 = 43^\circ$, $x_3 = z_3 \sin \varphi_3 = 575 \cdot \sin 43^\circ = 392 \text{ Ом}$.

Показатели ОД ($C = 0$), относительно трехфазного двигателя, снизились примерно на 20 %. Частота вращения ротора уменьшилась на 16 об/мин и поступление энергии из сети возросло на 11 Вт (табл.5, строка 2). Причиной снижения эффективности работы, вероятно, является генерация обмоток и появление обратно вращающегося магнитного поля.

После подключения ёмкости ($C=2 \text{ мкФ}$) генерация обмоток исчезла, токи и мощности распределились по фазам более равномерно, увеличилась частота вращения ротора, повысился $\cos \varphi$ и двигатель заработал как трехфазный (табл.4, строка 1 и 3).

По результатам расчёта сопротивлений и фазовых углов, проведенных выше, построены векторные диаграммы (рис.11). Двухфазное питание статора естественным путём создает смещение векторов $I_{\square 2}$ и $I_{\square 3}$ и при $C=0 \Psi$ ($I_{\square 2} \square I_{\square 3}$) $= 70^\circ$ (рис. 11а), такой двигатель имеет пусковой момент и запускается в ход самостоятельно (но величина напряжения трогания ротора выше, чем у трехфазного).

Последовательное включение фазосмещающей емкости в пусковую обмотку (фаза А), как отмечалось, повышает эффективность работы двигателя. После замыкания В2 ток поступает в фазу А и проходит через конденсатор, создавая не только смещение между векторной суммой токов $I_{\square 1} + I_{\square 3} = I_{\square 13}$ и вектором $I_{\square 2}$, но и ликвидирует генерацию и уменьшает модули токов I_3, I_2 и, как следствие, потребление энергии из сети (рис.11 б). Здесь $I_{\square 13}$ читается так: суммарный вектор тока параллельно соединенных фаз А ($I_{\square 1}$) и С ($I_{\square 3}$).

Векторные диаграммы позволяют наглядно продемонстрировать динамику процесса работы машины, реально видеть смещение векторов тока от изменения нагрузки или, например, величины емкости.

Зависимости мощностей и токов в фазах от величины емкости конденса-

торов показаны на рис.12. Кстати, здесь (при $C \leq 1 \text{ мкФ}$) четко прослеживается генерация в фазах А и В, отмеченная выше.

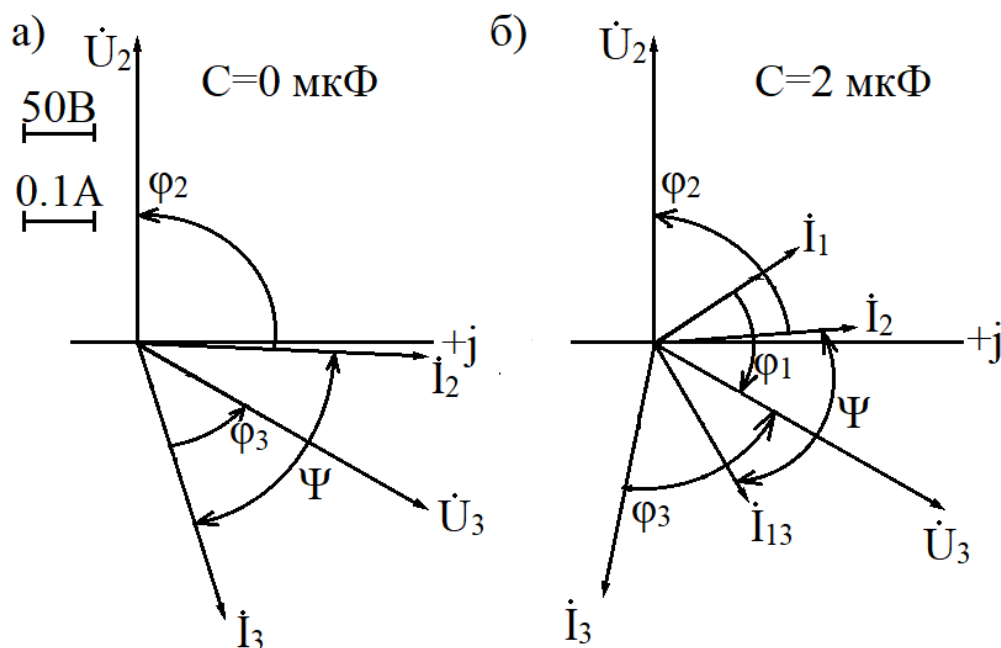


Рис.11. Векторные диаграммы – режим XX: а – $C=0 \text{ мкФ}$. $I_{\square 2} = 0.4 e^{j92^\circ} \text{ А}$, $\varphi_2 = 92^\circ$,

$I_{\square 3} = 0.4 e^{j43^\circ} \text{ А}$, $\varphi_3 = 43^\circ$, $\Psi = 70^\circ$, $n_2 = 2964 \text{ об/мин}$; б – $C = 2 \text{ мкФ}$. $I_{\square 1} = 0.24 e^{-j64^\circ}$,

$\varphi_1 = -64^\circ$, $I_{\square 2} = 0.28 e^{j86^\circ}$, $\varphi_2 = 86^\circ$, $I_{\square 3} = 0.36 e^{j72^\circ}$, $\varphi_3 = 72^\circ$, $\Psi = 65^\circ$, $n_2 = 2977 \text{ об/мин}$

На всем интервале изменения емкости ($0 \div 8 \text{ мкФ}$) входной ваттметр P

а)

б)

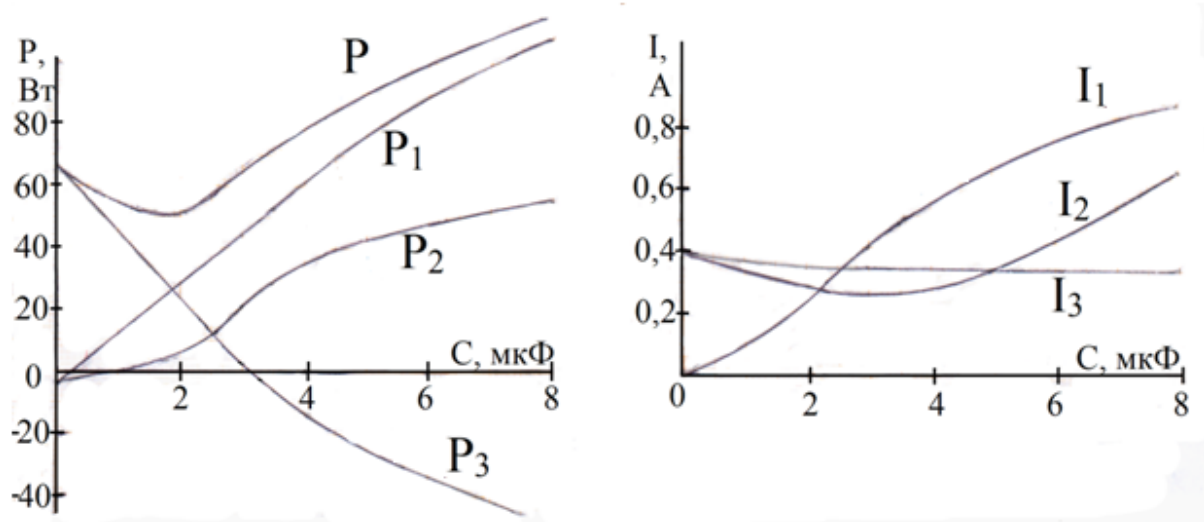


Рис.12. Мощности (а) и токи (б) фаз ОД в режиме XX

отслеживает суммарную алгебраическую активную мощность. Причем имеется экстремум ($C \sim 2 \mu\text{F}$), когда сетевая мощность минимальная (рис.12 а).

В отсутствии емкости мощность фазы C максимальная (вторая строка табл.4). По мере роста емкости она уменьшается и кривая P_3 пересекает действительную ось ($P_3 = 0$, $\varphi_3 = 90^\circ$) и после $C > 3 \mu\text{F}$ переходит в режим генерации, достигая максимальной величины при $C = 8 \mu\text{F}$ (последняя строка табл.4). Возникает опасность резонанса в фазе А ($I_1 \sim 0.84 \text{ A}$, последняя строка табл.4).

Векторная диаграмма на рис.13 соответствует опыту глубокой генерации фазы C и демонстрирует неэффективность работы двигателя. Здесь вектор тока \dot{I}_{13} (единственный случай из всех ранее проведенных опытов) опережает \dot{I}_2 .

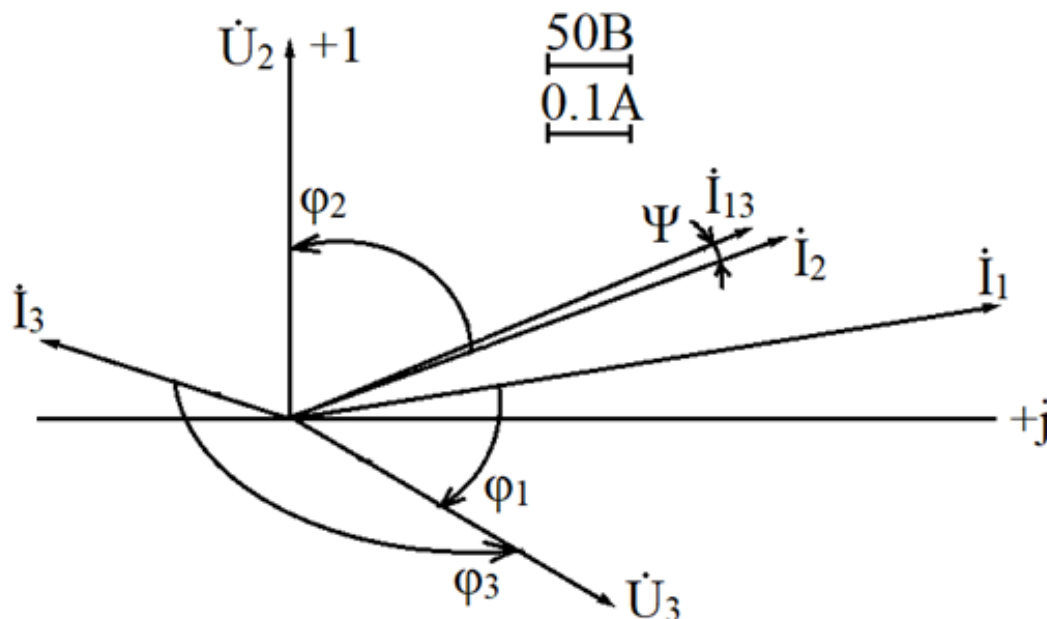


Рис.13. Векторная диаграмма, режим XX, $C = 8 \text{ мкФ}$:
 $I_1 = 0.84 \text{ A}$, $\varphi_1 = 39^\circ$; $I_2 = 0.62 \text{ A}$, $\varphi_2 = 70^\circ$; $I_3 = 0.3 \text{ A}$, $\varphi_3 = 168^\circ$; $\Psi(I_2 \square I_{13}) = 2^\circ$

Следует обратить внимание (для последующего сопоставления) на кривую тока I_3 фазы С (рис.12 б), величина которого во всем диапазоне изменения емкости монотонно уменьшается с 0.4 A до 0.3 A , а генерация непрерывно возрастает.

5.2. Режим неизменной нагрузки ($P_{\text{н}} = \text{const}$)

Нагрузкой является асинхронный двигатель, работающий в режиме электромагнитного тормоза. Потребляемая им мощность из сети постоянного напряжения $P_{\text{н}} = U_{\text{н}} I_{\text{н}}$. Результаты опытов сведены в табл.5 и по ним построены зависимости мощностей и токов фаз (рис. 14) и частоты вращения ротора, напряжений и КПД (рис.15) от емкости при неизменной нагрузке $P_{\text{н}} = 50 \text{ Вт}$.

После пуска двигателя в ход произошло перераспределение мощностей по фазам. Сохранилась незначительная генерация в фазе А. В « работу включилась » фаза В, и даже без ФЭ КПД равен 34% . Суммарная мощность

$P = P_1 + P_2 + P_3$ имеет ярко выраженный экстремум при $C \sim 2$ мкФ (рис. 14 а) и КПД здесь достигает максимального значения 42 % (рис. 15).

Таблица 5

Режим нагрузки ($P_- = \text{const}$)

C	n_2	P	P_1	I_1	P_2	I_2	P_3	I_3	U_k	U_1	U_3	U_2
мкФ	мин ⁻¹	Вт	Вт	А	Вт	А	Вт	А	В	В	В	В
0	2771	149	-2	~ 0	50	0.47	95	0.47	300	143	207	195
1	2817	125	12	0.1	43	0.40	71	0.38	360	170	210	203
2	2850	120	20	0.2	50	0.36	50	0.28	365	-	220	215
3	2866	125	35	0.35	60	0.35	28	0.21	370	219	208	229
4	2863	148	59	0.48	80	0.39	7	0.16	380	235	200	243
5	2856	176	72	0.57	111	0.48	-13	0.14	360	247	189	257
6	2848	210	86	0.66	137	0.54	-25	0.14	350	252	176	267
8	2742	286	92	0.72	202	0.72	-16	0.17	280	234	167	280

Мощность P_3 , как и в режиме ХХ, уменьшается и переходит в генераторный режим после $C > 4$ мкФ, достигая максимума при ~ 6 мкФ. И после того как ток I_3 начинает повышаться (в режиме ХХ монотонно понижался) после $C > 5.5$ мкФ (рис.14 б), генерация обмотки уменьшается до $P_3 \sim 16$ Вт ($C = 8$ мкФ, КПД ~ 17 %).

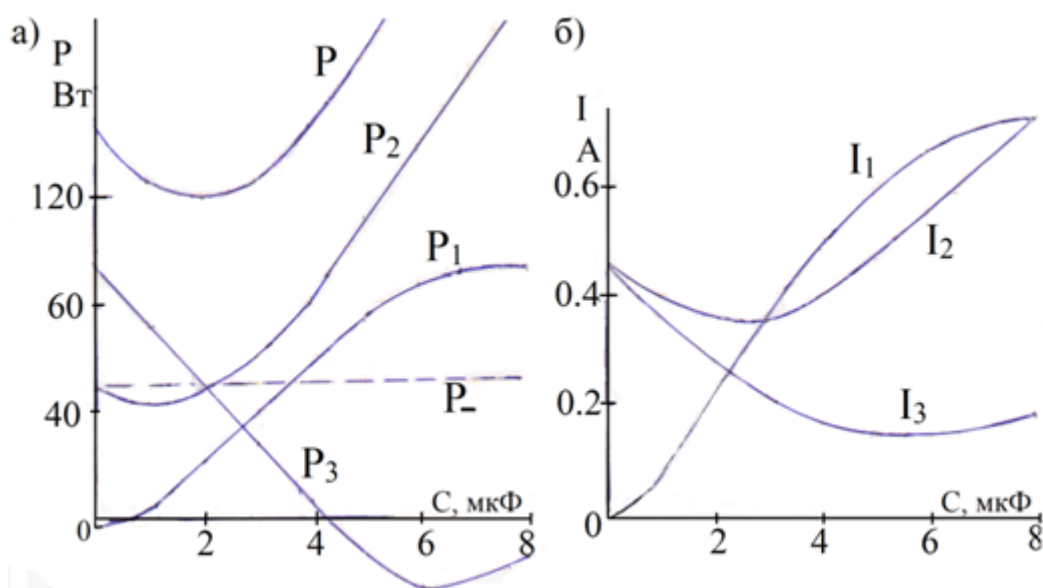


Рис.14.Зависимости: а – мощностей, б – токов от фазосмещающей емкости в режиме нагрузки

Для рассматриваемой здесь нагрузки однофазный двигатель реально можно использовать с емкостным ФЭ в пределах изменения емкости от 1 до 3.5 мкФ с гарантированным КПД не менее 35 %. Варьируя в разумных пределах нагрузку и емкость, можно повысить КПД.

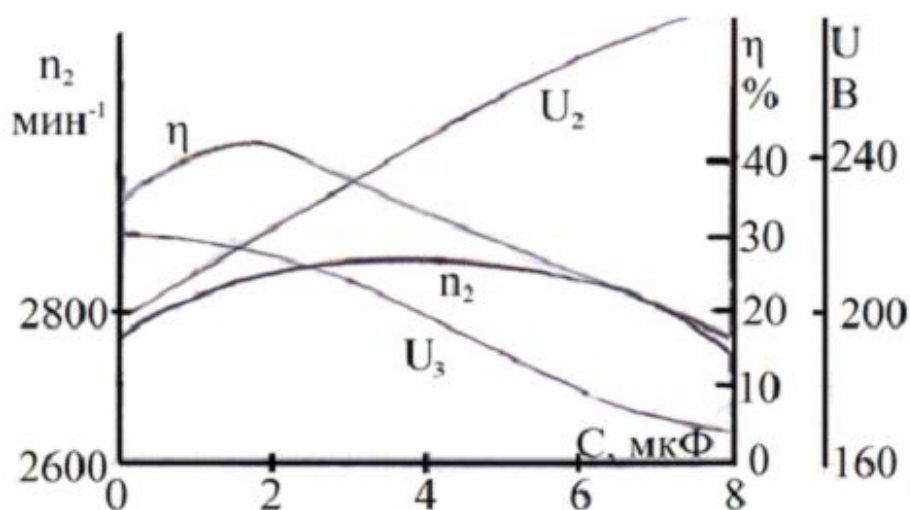


Рис. 15. Частота вращения ротора (n_2), напряжений фаз (U_2 , U_3), КПД (η) при постоянной нагрузке

Частота вращения ротора (рис.15) изменяется от минимального значения 2742 об/мин (8 мкФ) до максимального 2866 об/мин (~ 3 мкФ), т.е. в пределах 124 об/мин. В действительности с учетом указанного выше реального изменения емкости, интервал скорости не более 50 об / мин.

К обмотке статора ОД от сети подводится двухфазное напряжение $U_{\square л} = U_{\square 2} + U_{\square 3} = U_2 + U_3 e^{-j120^\circ} = \text{const}$. Модули напряжений U_2 и U_3 , как следует из рис.15, существенно различаются при естественно неизменном сетевом напряжении 380 В.

Анализ работы ОД проводится методом векторных диаграмм (ВД). Они построены по экспериментальным данным табл.6 и показаны на рис.16. Каждая ВД характеризуется реперной точкой. Такой точкой является переход из сим-

метричного трехфазного в однофазный существенно несимметричный режим работы двигателя (табл.6 а), достаточно подробно описанный в разделе 5.1.

Таблица 6

Описание векторных диаграмм

№	n	C	P ₁	P ₂	P ₃	I ₁	I ₂	I ₃	I ₁₃	φ ₁	φ ₂	φ ₃	Ψ
	мин ⁻¹	мкФ	Вт	Вт	Вт	А	А	А	А	гр.	гр.	гр.	гр.
а	2981	0	-2	-2	67	~0	0.4	0.4	-	-	92	43	70
б	2977	2	24	4	25	0.24	0.28	0.36	0.28	-64	86	72	65
в	2760	0	-2	50	95	0	0.47	0.47	-	-	56	17	81
г	2850	2	20	50	50	0.2	0.36	0.28	0.33	-61	49	32	68
д	2870	4.2	60	86	0	0.5	0.35	0.15	0.38	-60	0	90	72
е	2845	6	86	137	-25	0.66	0.54	0.14	0.6	-59	180	32	32
ж	2745	8	92	202	-16	0.72	0.72	0.17	0.55	-57	124	63	63

ВД рис. 16 а соответствует этому несимметричному режиму и является базовой (исходной) диаграммой последующему анализу. Величина фазного угла $\Psi(I_2 \square I_3) \sim 70^\circ$ определяется, как отмечалось выше, двухфазным питанием и параметрами обмоток. Из диаграммы следует: проекция I_2 на действительную ось определяет, индуцируемую обратным магнитным полем, активную составляющую I_{2a} противофазно $U \square_2$, снижает эффективность работы двигателя.

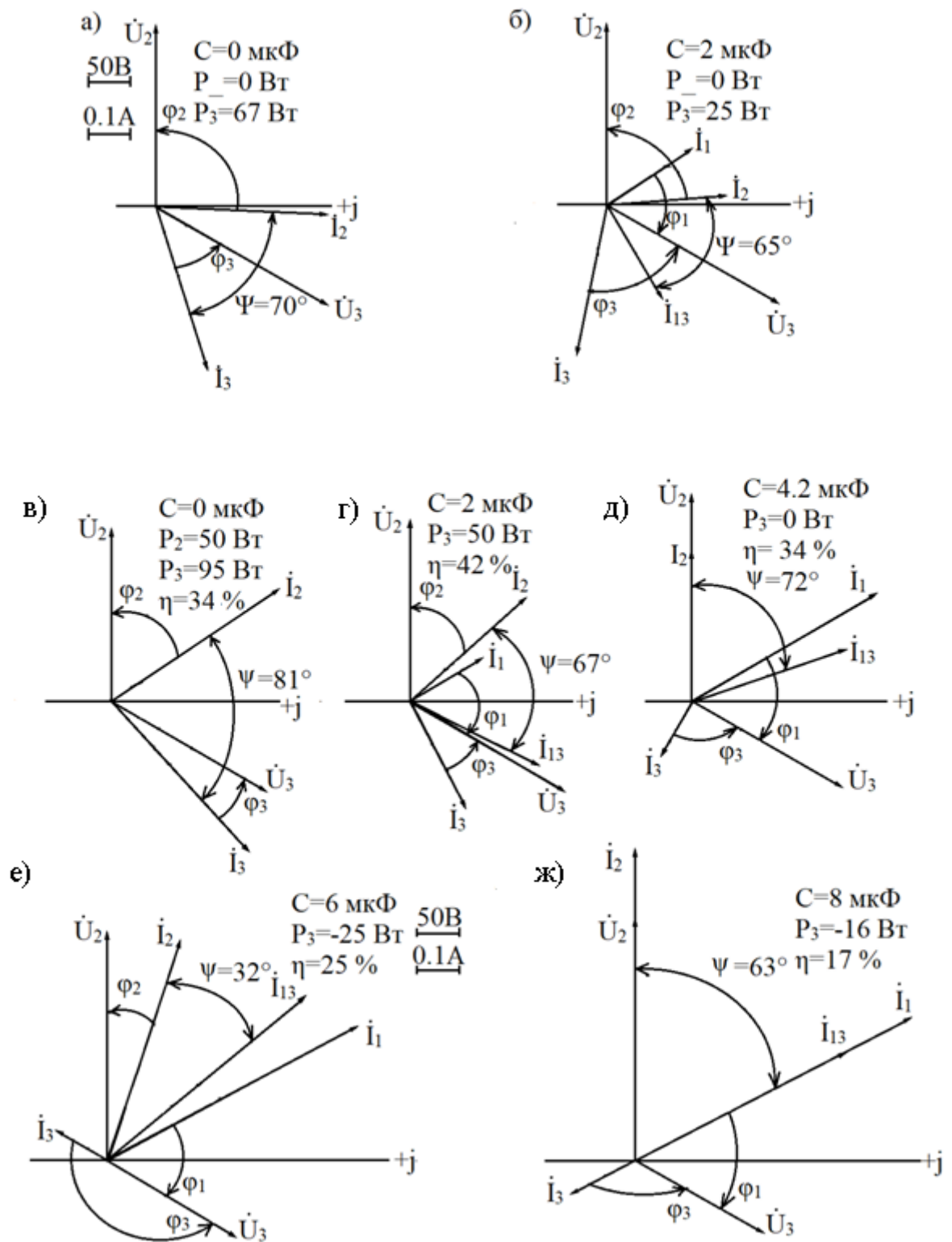


Рис. 16. Векторные диаграммы ОАД:

а, б – режим ХХ; в, г, д, е, ж – режим неизменной нагрузки

ВД рис. 16 б. После включения емкости исчезает генерация в фазах А и В (табл. 6 б), более равномерно распределяются мощности по фазам, уменьшаются токи и фазовый угол Ψ до 65° (положительный фактор). В результате подводимая мощность и частота вращения ротора практически не отличаются от таковых трехфазного двигателя. Эти две векторные диаграммы соответствуют режиму ХХ, а все последующие объединяются одной и той же нагрузкой $P_- = 50 \text{ Вт} = \text{const}$. Каждая из них отличается номиналом емкости в пределах от 0 до 8 мкФ ($x_c = \infty \div 400 \text{ Ом}$).

ВД рис. 16 в. Нагрузка «выключила» генерацию в фазе В, но она сохранилась в отключенной от сети фазе А (табл. 6 в, $P_1 = -2 \text{ Вт}$). Переход от 16 а к 16 в закончился позитивно, так как даже при отсутствии ФСЭ и $I_1=0$ КПД $\eta = P_- \cdot 100 / (P_2+P_3) = 34 \%$. Фазовый угол $\Psi (\dot{I}_2 \square \dot{I}_3) = 81^\circ$ изменился естественным путем не только по причине двухфазного питания, но и в результате действия нагрузки P_- .

ВД рис. 16 г. После включения конденсатора емкостью 2 мкФ в фазу А и подсоединения ее к фазе С появляется активно-емкостный ток I_1 . Результирующий ток $I \square_{13} = I \square_1 + I \square_3$, параллельно соединенных фаз, имея практически активный характер ($\varphi_{13} \sim -5^\circ$), сместился к $I \square_2$, уменьшая и угол Ψ до 67° и, как следствие, мощности из сети (табл. 6 г). Этот процесс изменения угла Ψ с помощью конденсатора и называется регулированием.

Расчет входного $\cos \varphi$ при максимальном КПД: согласно табл. 6 г подводимая к обмотке статора мощность $P = P_1 + P_2 + P_3 = U_{\text{л}} I_{\text{ф}} \cos \varphi_{\text{вх}}$, где $I_{\text{ф}} = (I_2 + I_{13}) / 2$, $\cos \varphi_{\text{вх}} = P / U_{\text{л}} I_{\text{ф}} = 120 / 380 \cdot 0.345 = 0.91$ ($\varphi_{\text{вх}} = 24^\circ$), $\eta = P_- / P = 50 \cdot 100 / 120 = 42 \%$, $n_2 = 2874 \text{ об/мин}$.

Подобный расчет этого же двигателя в трехфазном исполнении:
 $P_1 = 3 U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} \cos \varphi_1$, $\cos \varphi_1 = P_1 / 3 U_{\text{ф}} I_{\text{ф}} = 117 / 3 \cdot 220 \cdot 0.3 = 0.59$ ($\varphi_1 = 54^\circ$),
 $\eta = P_- / P_1 = 50 \cdot 100 / 117 = 43 \%$, $n_2 = 2844 \text{ об/мин}$.

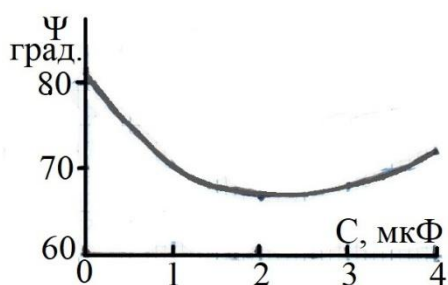
Рис. 16 д. Следующая характерная точка - пересечение кривой мощности P_3 (рис. 14 а) действительной оси. В точке пересечения ($C=4.2 \text{ мкФ}$) $P_3 = 0$ и ха-

рактический ток I_3 в этой фазе индуктивный ($\varphi_3=90^\circ$). Далее наступает генерация, достигающая максимальной величины -25 Вт (рис. 14 а), и вектор генерируемого тока $I_{\square 3}$ противофазен напряжению $U_{\square 3}$ (рис.16 е). Дальнейший рост емкости (уменьшение сопротивления) приводит к увеличению тока I_3 (рис. 14 б). В результате генерация уменьшается (заметим в режиме ХХ монотонно растет) до

- 16 Вт ($C=8$ мкФ) и вследствие этого уменьшается φ_3 до 124° (рис. 16 ж). Как следует из двух последних ВД и табл.6 е, ж генерация существенно уменьшает эффективность работы двигателя.

Векторные диаграммы строго отслеживают токи и мощности фаз при изменении емкости, что подтверждается ранее проведенным выводом по анализу

работы двигателя.



На рис. 17 показан график реального регулирования фазового угла $\Psi(I_2 \square I_{13})$ емкостным ФСЭ при неизменной нагрузке $P_=50$ Вт. Оптимальный угол 67° для данной мощности достигается при $C \sim 2$ мкФ.

В конденсаторном двигателе (КД), как Рис.17. Зависимость $\Psi = f(C)$ известно, оптимальный угол между токами ра-

бочей и пусковой обмоток равен 90° . Для сопоставления здесь приводятся результаты (табл. 7) экспериментов КД50 (50 Вт, 0.38 А, 2780 об/мин, $C=4$ мкФ - const) в режиме ХХ ($P_=0$) и двух нагрузках.

Таблица 7

Конденсаторный двигатель

ХХ	$\Psi = 156^\circ$	0.23 А	2949 об/мин	$P_=0$
Ном. режим	$\Psi = 102^\circ$	0.38 А	2740 об/мин	$P_=51$ Вт
Макс. нагрузка	$\Psi = 93^\circ$	0.5 А	2520 об/мин	$P_=71$ Вт

5.3. Рабочий режим ОАД

Рабочие характеристики ОД снимают по той же схеме (рис.10). В фазу А включается конденсатор емкостью 3 мкФ, выключатель В1 разомкнут, а В2 замкнут. После подачи линейного напряжения 380 В двигатель самостоятельно запускается и в режиме ХХ ротор достигает такой же скорости, как и в трехфазном двигателе. В данной ситуации (величина емкости и минимальная нагрузка), вероятно, создаются предпосылки создания кругового вращающегося магнитного поля.

Изменяем величину регулируемого напряжения на статоре тормозного двигателя от минимальной до заранее рассчитанной мощности. Эта величина равна приблизительно ~ 65 % от номинальной мощности трехфазного двигателя, т.е. ~ 78 Вт. На практике часто величину ФСЭ, вследствие сложности расчета, определяют экспериментально, путем подбора емкости и дополнительного включения активного ФСЭ для более тонкой регулировки.

На эффективность работы двигателя влияет не только величина и характер ФСЭ, но и частота вращения ротора, питание – однофазное или двухфазное, число витков и сечение проводов пусковой обмотки и т.д.

Результаты опытов представлены в табл.8 и по ним построены графики зависимости мощностей и токов фаз (рис.18) и рабочие характеристики (рис.20).

Согласно проведенной серии опытов фазу В, через которую проходит весь ток двигателя, можно назвать главной; фазу А, обмотка которой соединена последовательно с фазосмещающим конденсатором – конденсаторной фазой, а обмотку фазы С – вспомогательной. Две последние фазы, включенные параллельно, совместно создают (регулируют) суммарный вектор тока $I_{\square 13}$, который должен «правильно» располагаться на плоскости рисунка относительно вектора тока главной обмотки $I_{\square 2}$, т.е. они определяют фазовый угол Ψ ($I_{\square 2} \square I_{\square 13}$).

Или коротко: В - главная, а А + С - регулировочные обмотки.

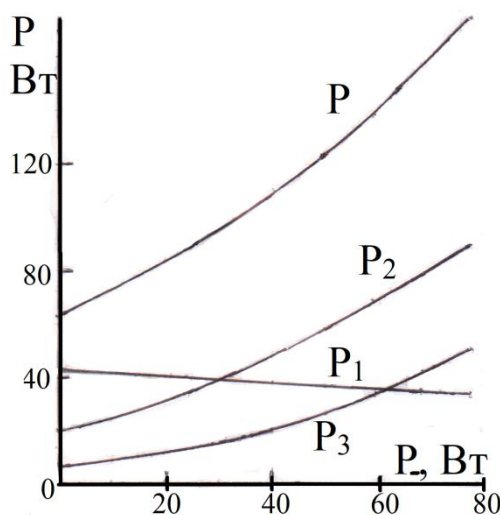
Таблица 8

Результаты опыта в режиме нагрузки

n_2 мин ⁻¹	P_1 Вт	I_1 А	P_2 Вт	I_2 А	P_3 Вт	I_3 А	U_k В	U_1 В	U_3 В	U_2 В	P_- Вт
2981	42	0.38	20	0.24	7	0.37	420	242	224	227	0
2951	41	0.36	30	0.26	11	0.3	400	235	218	227	15
2935	41	0.36	34	0.26	14	0.3	400	232	217	228	24
2889	39	0.34	51	0.32	21	0.22	380	222	209	227	40
2869	38	0.34	59	0.34	27	0.21	370	217	207	227	50
2832	36	0.32	69	0.38	34	0.21	360	209	203	227	59
2794	36	0.3	79	0.42	43	0.22	340	201	199	226	68
2746	34	0.3	90	0.48	51	0.28	330	194	197	225	77
2746	Однофазный : $P = P_1 + P_2 + P_3 = 175$ Вт, $\eta = 44$ %										77
2775	Трехфазный : $P = 3P_\phi = 165$ Вт, $\eta = 47$ %										

С ростом нагрузки токи фаз изменяются по-разному. Ток главной фазы I_2 (рис. 18 б) от режима ХХ до максимальной нагрузки увеличился в два раза (с 0.24 до 0.48 А), тогда как ток конденсаторной фазы I_1 уменьшился (с 0.38 до 0.3 А). Ток вспомогательной фазы имеет ярко выраженный минимум при

а)



б)

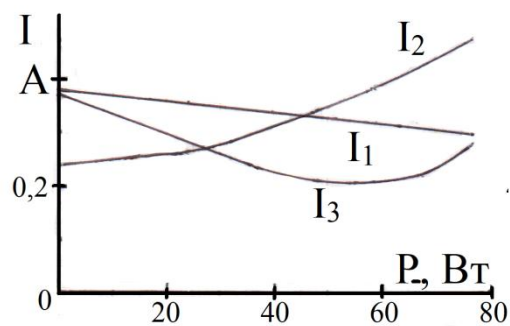


Рис.18. Режим нагрузки при постоянной емкости $C = 3$ мкФ:

а – мощностей фаз; б – токов фаз

$P_{\Sigma} = 55$ Вт, но в режиме ХХ и максимальной нагрузке токи I_1 и I_3 практически равны (рис. 18 б).

Мощности по фазам, как и токи, распределяются неравномерно. Согласно данным (табл.8, третья строка снизу) мощность, развиваемая главной фазой (90 Вт), почти равна сумме двух других фаз (~ 85 Вт).

Максимальный КПД (рис. 20) достигается практически при максимальной нагрузке, т.е. кривая КПД не имеет экстремума. Для повышения эффективности работы двигателя, только при максимальной мощности (77 Вт), необходимо увеличить величину емкости по некоторым соображениям до 4 – 4.5 мкФ (приблизженный расчет – $C \sim 5$ мкФ).

На рис.19 демонстрируются ВД в режиме ХХ и максимальной нагрузке (77 Вт).

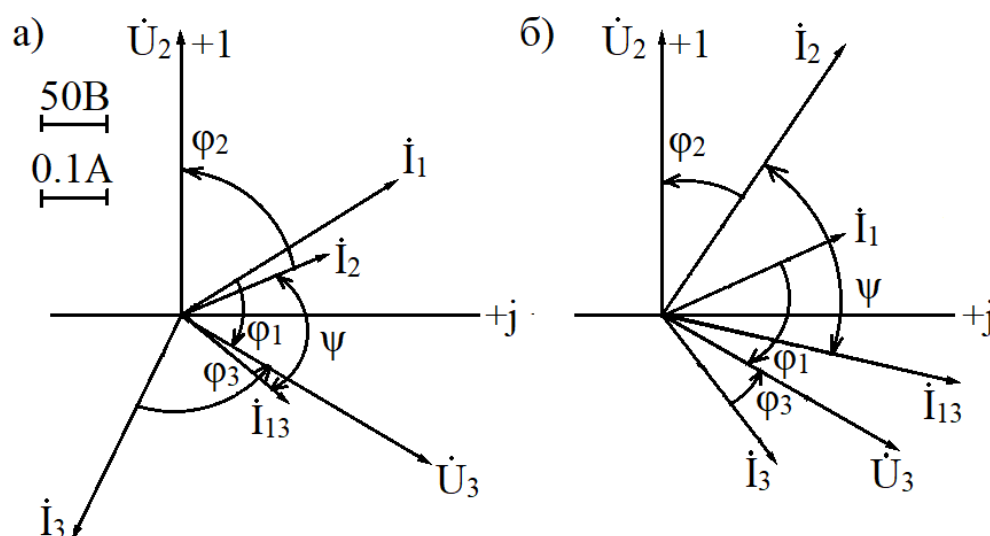


Рис. 19. Векторные диаграммы при $C = 3$ мкФ :
 а – ХХ, $P_{\Sigma} = 0$, $\Psi = 61^\circ$, $I_1 = 0.24 e^{-j63^\circ}$ А, $I_2 = 0.24 e^{j68^\circ}$ А, $I_3 = 0.37 e^{j85^\circ}$ А ;
 б – $P_{\Sigma} = 77$ Вт, $\Psi = 69^\circ$, $I_1 = 0.3 e^{-j54^\circ}$, $I_2 = 0.48 e^{j34^\circ}$ А, $I_3 = 0.28 e^{j23^\circ}$ А

Можно отметить, что ток $I_{\square 13} = I_{\square 1} + I_{\square 3}$ в процессе изменения нагрузки переместился с $\varphi_{13} = +8^\circ$ (активно-индуктивный характер) до $\varphi_{13} = -17^\circ$ (активно-емкостной) относительно $U_{\square 3}$. В итоге это благоприятно сказалось на входном $\cos \varphi$.

Рабочие характеристики ОД, представленные на рис. 20, практически соответствуют характеристикам трехфазного. Максимальная нагрузка этого двигателя $P = 77$ Вт. После незначительного повышения нагрузки ($P \sim 80$ Вт) он останавливается.

Для максимальной нагрузки 77 Вт в двух последних строках табл.8 приводится сравнение этих двух режимов.

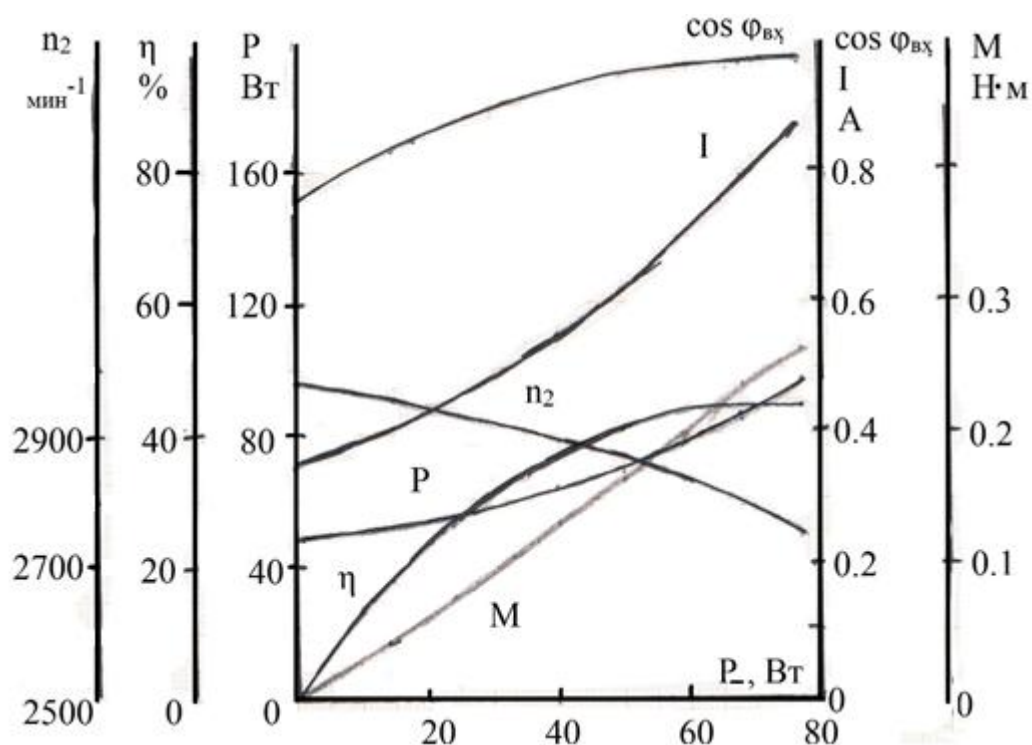


Рис. 20. Рабочие характеристики двигателя:

I – ток сети, $P = P_1 + P_2 + P_3$ – мощность сети, M_2 – полезный момент, n_2 – частота вращения ротора, η – КПД, $\cos \varphi_{вх}$ – входной косинус фи

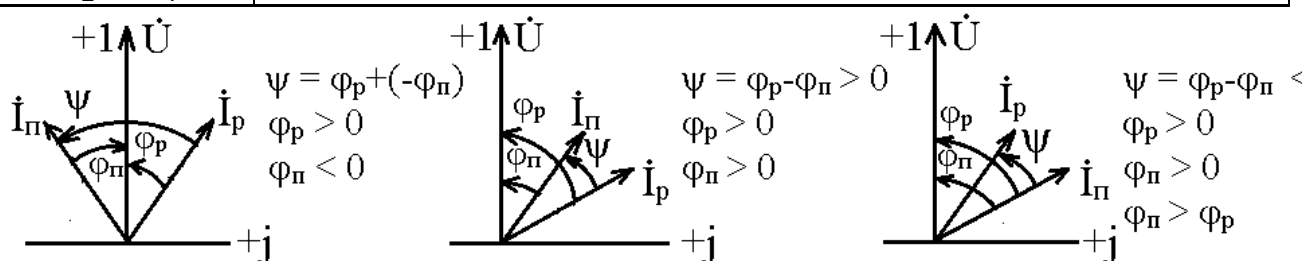
Контрольные вопросы

1. Подробно объяснить преобразование электрической мощности, подводимой от сети к обмотке статора в режиме заторможенного ротора (рис. 8). Определить электромагнитный момент по результатам эксперимента и расчетным путем, параметры короткого замыкания (r_k, x_k) Г-образной схемы замещения, r_2' и критическое скольжение ($s_{кр}$) с учетом и без r_1 .
2. Какие события происходят после отключения одной фазы трехфазного двигателя, работающего в режиме ХХ, при номинальной и 50%-й нагрузке?
3. Объяснить причину генерации обмотки (обмоток) в режиме ХХ (табл.4, строка 2).
4. Как определяются $\cos \varphi$ генерируемой обмотки фазы В (табл.4, ВД рис. 11 а) и активная составляющая тока I_{2a} . Почему на ВД отсутствует вектор тока I_1 ?
5. Описать ВД рис. 11б. Какую роль выполняет емкостный ФСЭ?
6. Максимальная генерация фазы С (рис.13)? Определить φ_3 , используя данные табл. 4, и сравнить (описать) токи I_3 по диаграммам рис. 11 б ($C = 2$ мкФ) и рис. 13 ($C = 8$ мкФ). Определить активные составляющие этих токов.
7. Снять показания величины емкости (мкФ) и частоты вращения (об/мин) при $U_2 = U_3$ (рис. 15). По измеренной емкости с рис.14 а, б получить данные мощности (Вт), токов (А) и построить векторную диаграмму. Сравнить ее с ВД рис. 16 г.

Принятые обозначения

Обозначение	Наименование обозначения
Конденсаторные двигатели	
	Положительное направление вращения векторов (против часовой стрелки)
U_C, U, U_H	Напряжение сети, текущее, номинальное напряжения, В
U_ϕ	Напряжение на фазосмещающем элементе (ФСЭ), В
U_-, I_-, P_-	Напряжение (В), ток (А) и мощность (Вт) электромагнитного тормоза (питание от источника постоянного напряжения ($f = 0$))
I или $I_C, I_{ПЧ}$	Токи двигателя и преобразователя частоты (ПЧ), А
I_p, I_Π	Токи рабочей и пусковой обмоток, А
$\tilde{S} = U \square I \square = U I e^{j\psi_u} e^{-j\psi_i} = S e^{j\varphi}, S = UI$	Комплексная (\tilde{S}) и полная (S) мощности, ВА: $\varphi = \psi_u - \psi_i$ – угол сдвига фаз – алгебраическая разность ψ_u и ψ_i
$I \square = I e^{-j\psi_i}$	Комплексный сопряженный ток
$\tilde{S} = P \pm jQ$	Комплексная (ВА), активная (Вт), реактивная (вар) мощности
$Q = e^{\pm j\varphi} = \pm jQ$	Реактивная (индуктивная и емкостная) мощность, вар (вольт-ампер реактивный)
$P_- = U_- \cdot I_-$	Мощность электромагнитного тормоза, Вт
P_p, P_Π	Активные мощности рабочей и пусковой обмоток, Вт
P	Мощность двигателя, Вт
P_0, I_0	Мощность и ток ХХ
P_K, I_K	Мощность и ток КЗ
P_1, P_2	Активные (подводимая и полезная) мощности двигателя
$p_{MГ}$	Мощность магнитных потерь (потери в стали), Вт
$p_{1элр} = r_{1р} I_p^2$ $p_{1элп} = r_{1п} I_\Pi^2$	Электрические потери рабочей и пусковой обмоток, Вт, сопротивления измеряются тестером
z_p, z_Π $r_p, r_\Pi; x_p, x_\Pi$	Полные, активные и индуктивные сопротивления рабочей и пусковой обмоток, Ом

Обозначение	Наименование обозначения
$z = \mathbf{z} e^{j\varphi} =$ $\mathbf{z} (\cos \varphi + j \sin \varphi)$ $= r + jx$	Комплексное сопротивление (экспоненциальное, тригонометрическая и алгебраическая форма записи) $\mathbf{z} = \sqrt{r^2 + x^2}$ – модуль z
$r_{1p}, r_{1n}, X_{1p}, X_{1n}$	Активные и индуктивные сопротивления рабочей и пусковой обмоток, Ом
r_o	Активное сопротивление, обусловленное магнитными потерями (потери в стали), Ом
R, X_c	Активное и емкостное сопротивления фазосмещающих элементов, Ом
C_p, C_n	Рабочая и пусковая емкости в цепи пусковой обмотки, Ф
n, n_n, n_o	Текущая, номинальная частота и частота холостого хода вращения ротора, (об/мин ⁻¹)
Ψ_{up}, Ψ_{ip} Ψ_{un}, Ψ_{in}	Начальные фазы напряжения и тока для пусковой и рабочей обмоток (отсчитываются от действительной оси), град
$\varphi_p = \Psi_u - \Psi_{ip}$ $\varphi_n = \Psi_u - \Psi_{in}$	Угол сдвига фаз – алгебраическая разность начальных фаз напряжения и тока, град
$\psi = \varphi_p \pm \varphi_n$	Угол смещения векторов тока рабочей и пусковой обмоток, град
ХХ, КЗ	Режимы холостого хода, короткого замыкания (ротор двигателя заторможен, $n_2=0$)
$C_1 - C_3$ $C_2 - C_4$	Начало и конец фаз рабочей ($C_1 - C_2$) и пусковой ($C_3 - C_4$) обмоток однофазного двигателя



Фазовый угол ψ (I_p \square I_n) отсчитывается от вектора тока рабочей обмотки I_p , с учетом условно положительного вращения векторов (может быть как положительный, так и отрицательный)

ВД	Векторные диаграммы
----	---------------------

Окончание

Обозначение	Наименование обозначения
Трёхфазные двигатели	
Y Δ	Соединение фаз звездой и треугольником
$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi$ $P = 3 U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi$	Активная мощность подводимая из сети (формула справедлива как для Y, так и Δ, U, I – линейные, U_{ϕ} , I_{ϕ} – фазные ток и напряжение, φ – угол между фазными напряжением и током
$P = 3 S_{\phi} \cos \varphi$	S_{ϕ} – полная мощность фазы, ВА
$\tilde{S} = \sqrt{3} U \square I \square$ $=$ $\sqrt{3} U e^{j\psi_u} I e^{-j\psi_i}$ $= S e^{j\varphi} =$ $S(\cos \varphi + j \sin \varphi)$ $= P + jQ$	Комплексная (\tilde{S}), полная (S), активная (P), индуктивная (Q) мощности двигателя
$n_1 = f_1 \cdot 60 / p$	Частота вращения магнитного поля (синхронная скорость), p – число пар полюсов
$C_1 \ C_2 \ C_3$ $C_4 \ C_5 \ C_6$	Начала фаз Соответственно их концы

Библиографический список

Вольдек А.Н., Попов В.В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов.- СПб.: Питер, 2010. – 250 с.

Алиев И.И. Асинхронные двигатели в трехфазных и однофазных режимах. – М.: ИП «РадиоСофт», 2004.- 128 с.

Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1976, 416 с.

Васильев В.Ф., Королёв В.Н., Аминова А.О. Асинхронные конденсаторные двигатели: учебное пособие /ВШТЭ СПбГУПТД.– СПб.,2018. Часть 1.-24 с.

Васильев В.Ф., Королёв В.Н., Шиповалова К.А. Частотное регулирование однофазного асинхронного двигателя: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД, - СПб.,2019. Часть 2.-19 с.

Оглавление

Введение.....	3
1. Некоторые замечания.....	3
2. Конструкция и принцип работы АД.....	4
3. Преобразование энергии в АД.....	7
4. Испытание АД при питании от трехфазной сети.....	10
4.1. Режим ХХ двигателя.....	10
4.2. Режим КЗ (ротор заторможен).....	12
4.3. Испытание АД при нагрузке.....	13
5. Однофазный асинхронный двигатель (ОАД или ОД).....	15
5.1. Режим ХХ.....	15
5.2. Режим неизменной нагрузки ($P_{\text{н}} = \text{const}$).....	20
5.3. Рабочий режим ОАД.....	26
Контрольные вопросы.....	30
Принятые Обозначения.....	31
Библиографический список.....	34