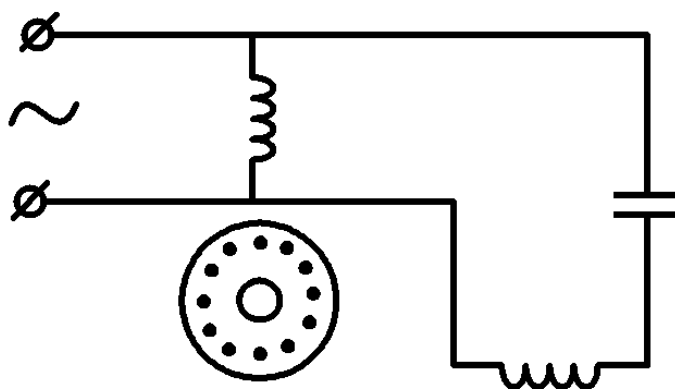


В. Ф. Васильев, В.И. Королев, А.О. Аминова

АСИНХРОННЫЕ КОНДЕНСАТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Часть 1

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2018

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

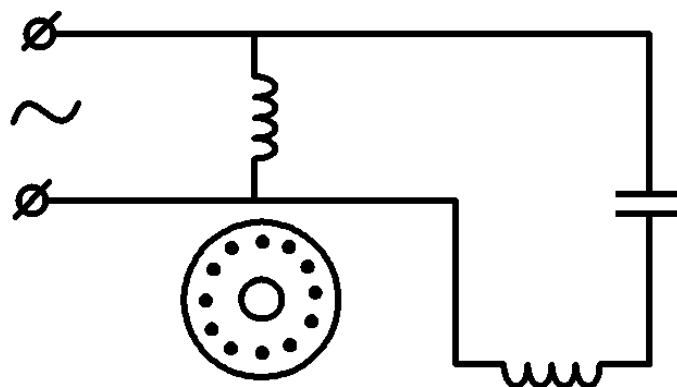
ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

В. Ф. Васильев, В. И. Королев, А. О. Аминова

АСИНХРОННЫЕ КОНДЕНСАТОРНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

Часть 1

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2018

УДК 621. 313 (075)

ББК 31. 261. 2

А 620

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

Учебное пособие по асинхронным конденсаторным двигателям предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» по профилю «Электропривод и автоматика» и смежным направлениям.

Рецензент:

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

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

Редактор и корректор Н. П. Новикова

Техн. редактор Л. Я. Титова

Темплан 2018 г., поз. 7

Подп. к печати 12.02.2018 Формат 60×84/16. Бумага тип. № 1.

Печать офсетная. Печ. л. 1,5. Уч.-изд.л. 1,5. Тираж 50 экз. Изд. № 7.

Цена «С». Заказ

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД, 198095,
Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

© Аминова А.О., Васильев В.Ф., Королев В. И.,
2018

© Высшая школа технологии и энергетики
СПбГУПТД, 2018

Введение

Работы 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. На стационарных стендах проводятся ознакомительные лабораторные работы. На спецстендах проводятся углубленные исследования, результаты которых используются в курсовых проектах.

В учебном пособии приводятся некоторые экспериментальные и теоретические сведения по асинхронным конденсаторным двигателям. Настоящий материал позволит не только заранее подготовиться к предстоящим лабораторным работам, но и провести предварительные расчеты, построить векторные диаграммы и самостоятельно выбрать тему своего курсового проекта. Кроме того, «живые» результаты эксперимента гармонично вписываются в лекционный материал.

1. Однофазный асинхронный двигатель (ОАД)

Такие двигатели имеют небольшую мощность (десятки-сотни Ватт). Используются в электробытовых приборах для привода вентиляторов, насосов и другого оборудования. Их применяют в автоматических устройствах. Двигатели получают питание от однофазной сети. Отсюда и следует их название. На самом деле двигатели чаще всего выполняются двухфазными. После пуска и достижения определенной величины скорости отключают одну из обмоток. Тем не менее, он, сохраняя вращающий момент, продолжает работать, выполняя функцию привода. В этом единственном случае двигатель, подтверждая свое название, работает как однофазный и получает питание от однофазной сети.

Обмотка ротора ОАД выполняется в виде «беличьей клетки» (замкнутые по торцам алюминиевые стержни), как у трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя. ОАД можно получить из трехфазного отключением

одной фазы. Тогда он будет работать как однофазный с некоторыми преимуществами и недостатками трехфазного и классического однофазного двигателей.

2. Схемы включения ОАД

Однофазный двигатель, как известно, не имеет пускового момента. Для создания момента необходимо подключить пусковую обмотку, ось которой сдвинута относительно основной рабочей обмотки на 90° . На период пуска пусковую обмотку присоединяют к сети через фазосдвигающий элемент (ФЭ). В качестве ФЭ могут быть использованы активное ($Z_{\Pi} = R$), емкостное ($Z_{\Pi} = -jX_C$) и индуктивное ($Z_{\Pi} = jX_L$) сопротивления (рис. 1а).

Рабочую обмотку С1-С2 и пусковую С3-С4 с присоединенным последовательно ей конденсатором подключают к источнику питания (рис. 1б). Векторы токов $\dot{I}_P$ и $\dot{I}_{\Pi}$ будут смещены на некоторый угол $\psi = \varphi_P - (-\varphi_{\Pi})$, величина которого будет зависеть от емкости конденсатора. Векторная диаграмма для этого случая показана на рис. 1в.

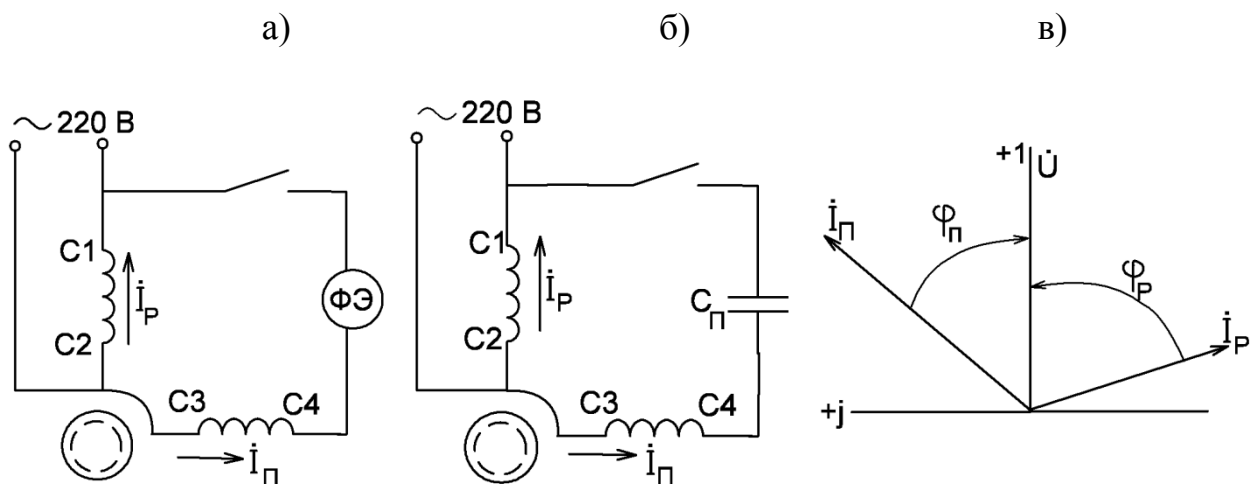


Рис. 1. Схемы однофазного двигателя: а — с ФЭ; б — с емкостным ФЭ; в — векторная диаграмма соответствующая схеме рис. 1б

Учитывая, что сопротивления самих обмоток имеют активные и индуктивные составляющие, можно заключить, что при $Z_{\Pi} = R$ и $Z_{\Pi} = -jX_C$ ток $\dot{I}_{\Pi}$ будет опережать $\dot{I}_P$ (рис 1в).

Асинхронные исполнительные двигатели применяются в системах автоматического управления. Одна обмотка называется обмоткой возбуждения В, а вторая - обмоткой управления У. Напряжение U_y может изменяться как по величине (амплитудное управление, рис. 2а), так и по фазе (фазное управление).

Питание ОАД, как и широко распространенного трехфазного, можно осуществлять от преобразователя частоты (ПЧ). ПЧ, питаемый от однофазной сети напряжением 220 В, выдает на выходе три линейных напряжения, величина каждого из них 220 В.

В схеме на рис. 2б в обмотке статора ОАД отсутствует фазовый конденсатор, так как он не может обеспечить равномерный фазовый сдвиг в пределах границ частот инвертора. ПЧ обеспечивает равномерный сдвиг фаз.

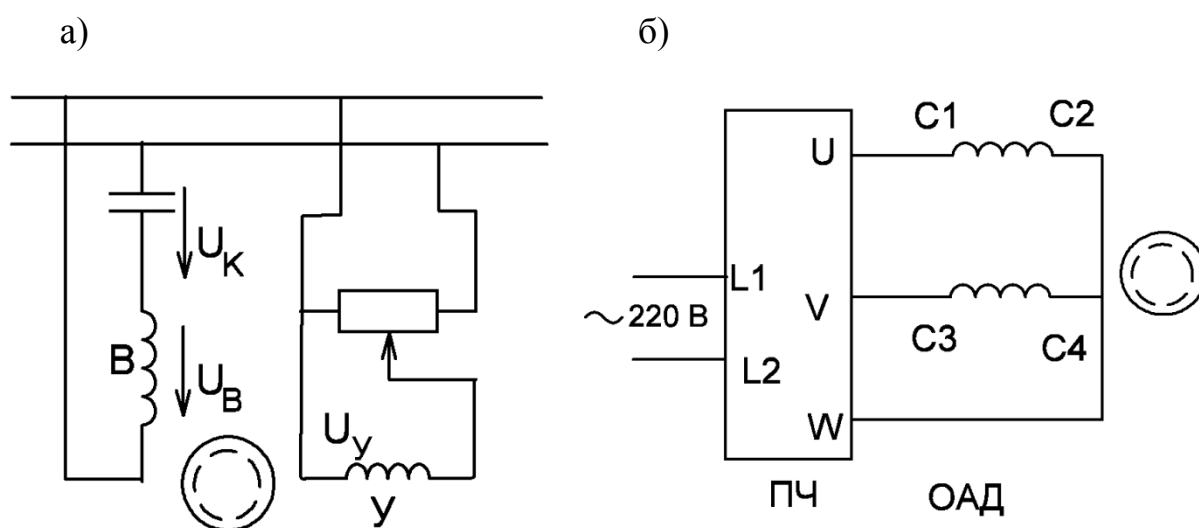


Рис. 2. Схемы включения: а — исполнительного двигателя; б — однофазного двигателя при питании от преобразователя частоты

3. Экспериментальное определение параметров обмоток двигателя

Перед началом испытаний целесообразно провести отдельные опыты рабочей и пусковой обмоток без и с фазосмещающими элементами, включенными последовательно с ней, оценить достоинства и недостатки ФЭ и построить векторные диаграммы. После соединения обмоток рассмотреть

условия пуска в ход двигателя. Исследования проводятся по схеме, показанной на рис. 3.

Три электродинамических ваттметра на входе схемы и в фазах статора позволяют подробно оценивать изменения параметров обмоток в процессе опыта. Кроме того, измерялось напряжение на ФЭ. Объект исследования – однофазный двигатель КД50: $U=220$ В, $P_2=50$ Вт, $I_H=0,38$ А, $n_2=2780$ об/мин, $C_p=4$ мкФ. Активные сопротивления обмоток, измеренные от источника постоянного напряжения при комнатной температуре, $r_{p1}=88$ Ом и $r_{n1}=59$ Ом.

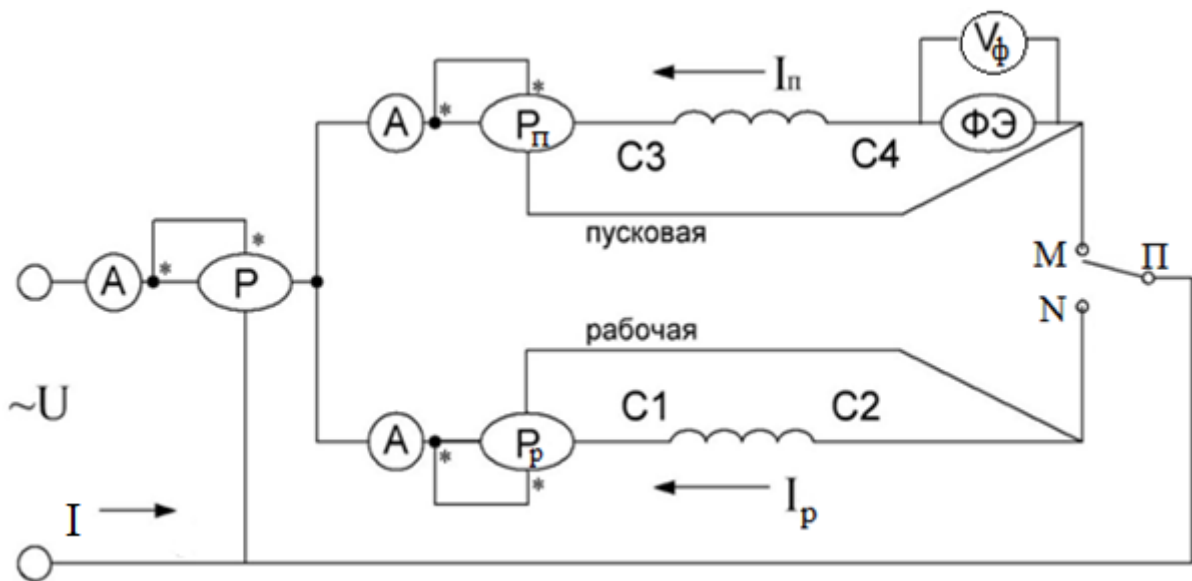


Рис.3. Схема проведения опытов рабочей и пусковой обмоток

Раздельное измерение обмоток осуществлялось переключателем П (рис. 3). Результаты измерений и расчетов обмоток при неизменном напряжении $U=100$ В, приведены в табл. 1.

Расчет рабочей обмотки:

$$\cos\varphi_p = P_p / (U \cdot I_p) = 32 / (100 \cdot 0,38) = 0,84, \varphi_p = 33^\circ;$$

$$\text{полное сопротивление } z_p = U / I_p = 100 / 0,38 = 263 \text{ Ом};$$

$$\text{активное сопротивление } r_p = z_p \cos\varphi_p = 263 \cdot 0,84 = 221 \text{ Ом};$$

$$\text{сопротивление, обусловленное потерями в стали, } - r_{p0} = r_p - r_{p1} = 221 - 88 = 133 \text{ Ом};$$

$$\text{магнитные потери } - p_{pM} = r_{p0} \cdot I_p^2 = 133 \cdot 0,38^2 = 19 \text{ Вт}.$$

Таблица 1

Опытные и расчетные данные рабочей и пусковой обмоток

Опыт					Расчет, рабочая обмотка						
	I_p	P_p	r_{p1}	$\cos\varphi_p$	φ_p	$\sin\varphi_p$	z_p	r_p	x_p	r_{p0}	$P_{PMГ}$
	А	Вт	Ом	-	град	-	Ом	Ом	Ом	Ом	Вт
	0,38	32	88	0,84	33	0,54	263	221	143	133	19

Продолжение табл. 1

Опыт					Расчет, пусковая обмотка						
Z_Φ	I_{II}	P_{II}	r_{II1}	$\cos\varphi_{II}$	φ_{II}	$\sin\varphi_{II}$	z_{II}	r_{II}	x_{II}	r_{II0}	$P_{IIМГ}$
Ом	А	Вт	Ом	-	град	-	Ом	Ом	Ом	Ом	Вт
0	0,57	48	59	0,84	33	0,54	175	147	95	88	29
307	0,22	21	59	0,95	16	0,31	465	442	144	77	3,6
-j786	0,14	3	59	0,21	-78	0,98	714	150	698	91	2,0

Расчет пусковой обмотки аналогичен расчету рабочей обмотки.

Как следует из табл.1, параметры величин токов и мощностей обмоток существенно различаются, а углы сдвига фаз $\varphi_p = \varphi_{II} = 33^\circ$ (здесь пусковая обмотка без ФЭ).

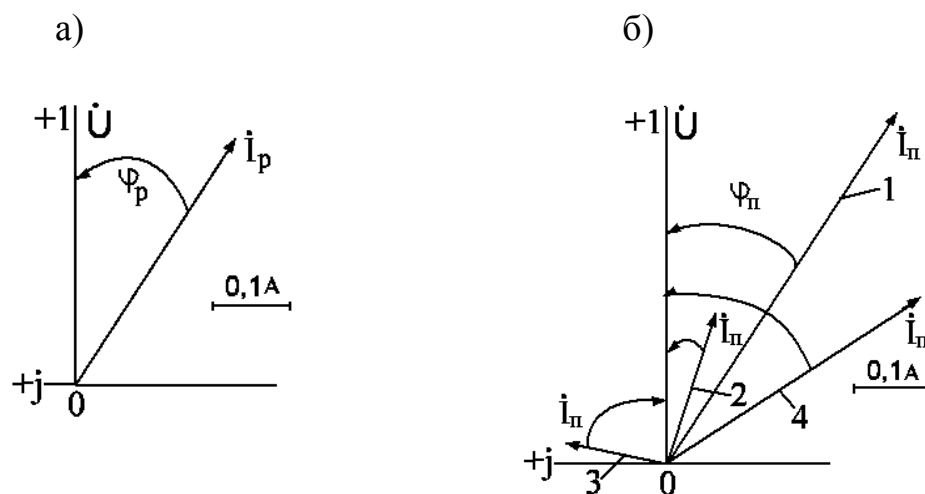


Рис. 4. Векторные диаграммы отдельно включенных обмоток: а — рабочей: $I_p = 0,38e^{j33^\circ}$ А; б — пусковой: 1 — без ФЭ, $Z=0$, $I_{II} = 0,57e^{j33^\circ}$ А; 2 — $Z_\Phi = R$ Ом, $I_{II} = 0,22e^{j18^\circ}$ А; 3 — $Z_\Phi = -jX_c$ Ом, $I_{II} = 0,14e^{-j78^\circ}$ А; 4 — $Z_\Phi = jX_L$ Ом

Очевидно, что число витков и сечение проводов обмоток также различаются. Официальные данные отсутствуют. Векторные диаграммы отдельно включенных обмоток показаны на рис. 4.

В последних двух строках табл.1 приводятся опытные данные пусковой обмотки с активным и емкостным фазосмещающими элементами. Схемы замещения, соответствующие этим обмоткам, представлены на рис. 5.

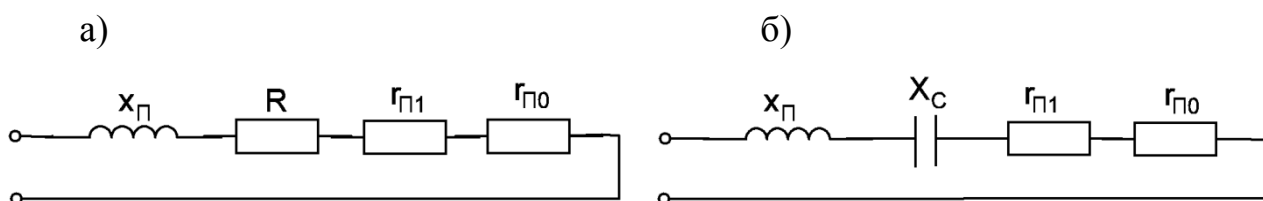


Рис. 5. Схемы замещения пусковой обмотки:

а – с активным $Z = R$ элементом; б – с емкостным $Z = -jX_C$ элементом

Комплексные сопротивления $Z_{\Pi} = r_{\Pi 1} + r_{\Pi 0} + R + jx_{\Pi} = ze^{j18^{\circ}} = 465e^{j18^{\circ}}$ Ом; $Z_{\Pi} = r_{\Pi 1} + r_{\Pi 0} + j(x_{\Pi} - x_C) = z_{\Pi}e^{-j78^{\circ}} = 714e^{-j78^{\circ}}$ Ом имеют активно-индуктивный и активно-емкостный характер (рис. 4б, векторы 2 и 3). В последнем варианте включен конденсатор емкостью 4 мкФ ($X_C = U_{\Phi}/I_{\Pi} = 110/0,14 = 786$ Ом).

Реактивное сопротивление пусковой обмотки в итоге равняется емкостному – $j 698$ Ом (см. последняя строка табл.1).

При включении индуктивного ФЭ вектора тока $\dot{I}_{\Pi}$ (рис.4б, вектор 4) будет отставать от вектора тока без ФЭ (рис.4б, вектор 1). В данном случае оптимальному варианту соответствует емкостный фазосмещающий элемент.

Как запустить двигатель в ход? Накоротко замыкают клеммы М и N (рис.3) и двигатель подключают к сети. Полученные результаты сведены в табл. 2. В первой строке таблицы при $U=85$ В (напряжение ограничивается величинами токов обмоток) ток более чем в два раза превышает номинальное значение (0,38А). Тем не менее, пусковой момент отсутствует.

На векторной диаграмме (рис. 6а) углы сдвига фаз по величине практически не отличаются от полученных ранее опытов при раздельном включении обмоток. В цепь пусковой обмотки подключаем активное сопротивление и увеличиваем напряжение до величины пуска двигателя в ход.

При $U = 100$ В возникает вращающий момент ($M_{вр}$) достаточный для преодоления статического ($M_{ст}$), и двигатель разгоняется до 1100 об/мин; при $U=135$ В $n_2 = 2607$ об/мин (в табл. 2 данные отсутствуют). В режиме холостого хода и номинальном напряжении 220 В частота вращения достигает 2780 об/мин (табл. 2, строка 3). Векторная диаграмма, соответствующая этому случаю, приведена на рис. 6б. Величины подводимой мощности и тока достигают предельных величин. Введение емкостного ФЭ существенно повышает эффективность двигателя (табл.2, строка 4). Мощность и ток, подводимые к двигателю, уменьшаются соответственно в 3,8 и 4,2 раза, а частота вращения увеличилась до 2960 мин⁻¹. Таким образом, чтобы запустить двигатель в ход, необходимо увеличить угол между векторами токов фаз рабочей и пусковой обмоток. Наибольший эффект, как отмечалось, достигается при емкостном ФЭ.

Таблица 2

Результаты экспериментов при совместном подключении обмоток

U	I	P	I _р	P _р	I _п	P _п	φ _п	φ _р	z _ф	n ₂
В	А	Вт	А	Вт	А	Вт	град	град	Ом	об/мин
85	0,84	60	0,33	24	0,49	34	35	31	0	0
100	0,57	51	0,35	32	0,2	18	26	24	305	1100
220	0,96	180	0,46	90	0,52	84	43	27	305	2780
220	0,23	48	0,27	-20	0,45	67	-47	109	786	2960
220	0,35	37	0,35	37	0	-	-	-	-	2903

В процессе последнего опыта отключили пусковую обмотку ($I_{п}=0$), но при этом двигатель, сохраняя вращающий момент, продолжил работать с пониженной скоростью, в однофазном режиме (табл. 2, строка 5). Уменьшилась подводимая к статору мощность, увеличился ток из сети. Рабочая обмотка, которая работала в предыдущем опыте в генераторном режиме ($P_{р} = - 20$ Вт, подробности см. ниже), перешла в двигательный режим ($P_{р}=37$ Вт), создавая

условия для получения вращающего момента. После остановки двигателя запустить его в ход включением в сеть невозможно из-за отсутствия пускового момента ($M_{\Pi}=0$). Двигатель можно запустить, если одновременно включить его в сеть и раскрутить ротор в любую сторону. Далее он разгоняется самостоятельно до скорости, соответствующей нагрузке на валу. Ниже приводится объяснение этому факту.

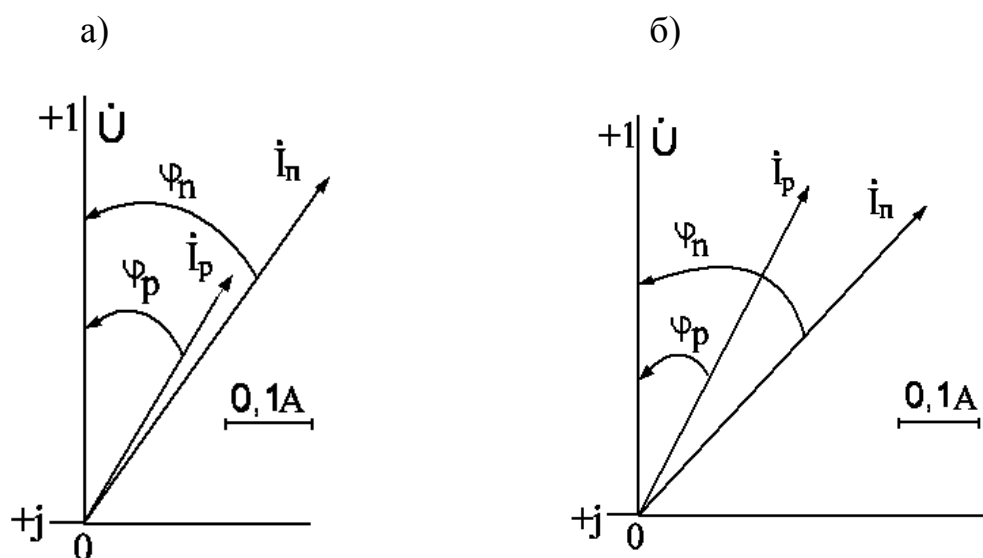


Рис. 6. Векторные диаграммы: а – без ФЭ; б – с активным ФЭ $Z=r$

При питании однофазной обмотки переменным током возникает магнитное поле, пульсирующее во времени по магнитной оси обмотки с частотой тока. Пульсирующее магнитное поле, как известно, можно представить в виде суммы двух полей, вращающихся в противоположные стороны. Полагая, магнитное поле прямой последовательности $\Phi_{\Pi P}$ совпадает с направлением вращения ротора (против часовой стрелки), а магнитное поле обратной последовательности $\Phi_{O B P}$ вращается в противоположную сторону. Магнитные потоки равны половине амплитуды пульсирующего поля, и вращения их векторов показаны на рис.7.

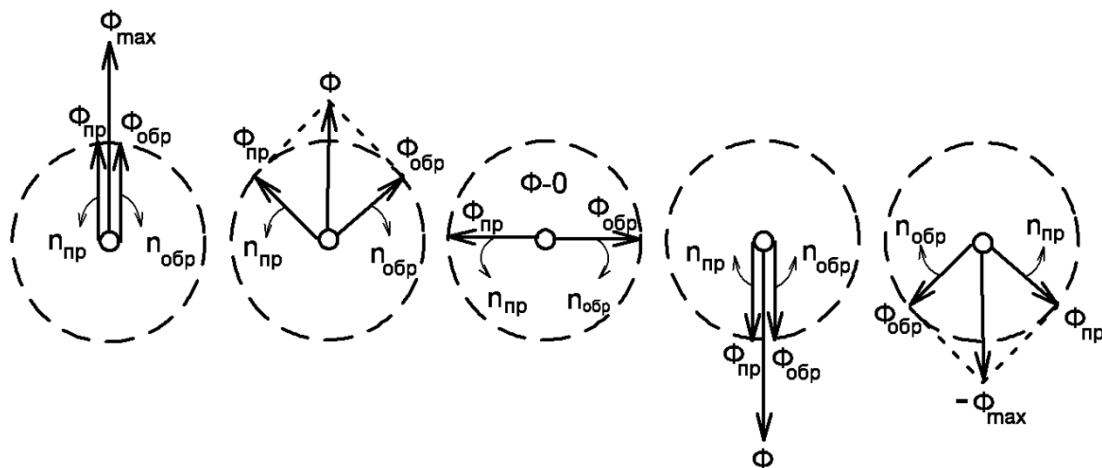


Рис.7. Изменение вектора пульсирующего поля и его разложение на потоки прямой $\Phi_{\text{пр}}$ и обратной $\Phi_{\text{обр}}$ последовательностей

В каждый момент времени изменяющийся по величине вектор результирующего потока Φ неизменно направлен (пульсирует) вдоль вертикальной (магнитной) оси обмотки статора. Вращающиеся поля наводят в обмотке ротора ЭДС, под влиянием которых возникают токи. Взаимодействие магнитных полей статора с током ротора приводят к образованию прямого $M_{\text{пр}}$ и обратного $M_{\text{обр}}$ вращающихся в противоположные стороны моментов. Механические характеристики показаны на рис.8.

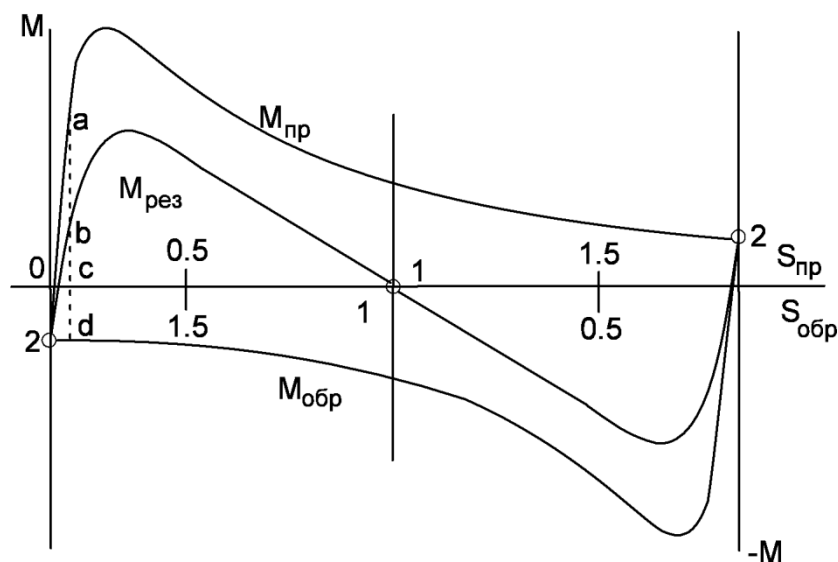


Рис.8. Механические характеристики АД в однофазном режиме: $M_{\text{пр}}(S)$ - от поля прямой последовательности; $M_{\text{обр}}(S)$ - от поля обратной последовательности; $M_{\text{рез}}(S)$ - результирующий

В двигателе, работающем в однофазном режиме (табл.2, строка 5), скольжение относительно прямого поля $s_{\text{ПР}}=(n_1 - n_2)/n_1=(3000-2903)/3000=0,032$. В обмотке ротора наводятся токи небольшой частоты, в данном случае $f_{2\text{ПР}}=s_{\text{ПР}} \cdot f=0,032 \cdot 50=1,6$ Гц. Активная составляющая тока превосходит реактивную составляющую. Скольжение ротора относительно обратного поля $s_{\text{ОБР}}=(n_1 + n_2)/n_1=2 - s_{\text{ПР}}=1,97$, $f_{2\text{ОБР}}=s_{\text{ОБР}} \cdot f_1=98,5$ Гц, и индуцированные токи становятся реактивными. Они оказывают размагничивающее действие на обратное поле и, следовательно, уменьшают обратный момент $M_{\text{ОБР}}$. Алгебраическое сложение моментов дает результирующую механическую характеристику $M_{\text{РЕЗ}}=M_{\text{ПР}} - M_{\text{ОБР}}$. В частном случае (рис.8) $M_{\text{РЕЗ}}=bc=ac - cd$. Здесь ac – момент, организованный прямым магнитным полем, cd – обратным.

4. Асинхронный конденсаторный двигатель (КД)

КД имеет две рабочие обмотки, сдвинутые в пространстве относительно друг друга на 90° эл. В одну из них включается рабочий конденсатор C_p (далее эту рабочую обмотку будем называть пусковой). Для получения кругового магнитного поля реактивная мощность конденсатора должна быть равна активной мощности двигателя, т.е.

$$P = \omega C_p U^2, \text{ отсюда } C_p = P \cdot 10^6 / (\omega U^2), \text{ где } C_p \text{ — мкФ, } P \text{ — Вт, } U \text{ — В;}$$

$$C_p = 50 \cdot 10^6 / (2\pi 50 \cdot 220^2) = 3,3 \text{ мкФ}$$

В паспортных данных рассматриваемого здесь двигателя указано 4 мкФ. Если появляется необходимость запуска нагруженного двигателя или форсирования разгона, для повышения пускового момента целесообразно иметь увеличенную емкость $C_p + C_{\text{ПУСК}}$. После разгона двигателя ток его уменьшается, и пусковой конденсатор отключают, чтобы при номинальном режиме увеличить емкостное сопротивление и обеспечить работу двигателя в условиях, близких к работе с круговым вращающимся магнитным полем.

5. Режим холостого хода (XX)

Опыт XX проводят по схеме (рис.3) с замкнутыми клеммами М и N с ем -

костным ФЭ в цепи пусковой обмотки ($C=4$ мкФ). Входной ваттметр измеряет активную мощность P_0 в режиме ХХ. В нее входят электрические потери $p_{эл}$, обусловленные активными сопротивлениями обмоток, потери в стали магнитопровода $p_{мг}$ (магнитные потери), обусловленные вихревыми токами и потерями на гистерезис, механические потери $p_{мх}$. Результаты измерений сведены в табл. 3.

Мощность, поступающая из сети, равна алгебраической сумме активных мощностей фаз ($P_0 = P_{II} - P_P$). Ответственность за это несет обратно вращающееся магнитное поле, которое наводит ЭДС в рабочей обмотке, переводя её в генераторный режим, и активная мощность P_P становится отрицательной.

Таблица 3

Характеристика холостого хода

U	n_2	P_0	I_0	P_P	I_P	φ_P	P_{II}	I_{II}	φ_{II}
В	об/мин	Вт	А	Вт	А	град	Вт	А	град
230	2961	52	0,24	-21	0,3	—	72	0,47	—
220	2960	48	0,23	-20	0,27	109	67	0,45	-47
200	2958	39	0,22	-17	0,21	—	56	0,42	—
180	2957	32	0,2	-15	0,17	—	46	0,36	—
150	2952	22	0,18	-11	0,13	—	33	0,28	—
115	2940	14	0,15	-5	0,08	—	19	0,23	—
70	2885	7	0,06	~0	~0	—	7	0,1	—

На рис. 9а отображается суть процесса, происходящего в обмотках машин. Во всем диапазоне изменения напряжения рабочая обмотка работает в генераторном режиме. При изменении нагрузки и (или) изменении емкости будет происходить существенное перераспределение мощностей между обмотками. При напряжении ~ 70 В (табл.3) $P_P=0$, электрические и магнитные потери минимальны, следовательно, мощность, поступающая из сети (~7 Вт) фактически определяет вращающий момент холостого хода:

$$M_o \approx 7/(0,105 \cdot 2885) = 0,03 \text{ Нм.}$$

Зависимость $P_0 - p_{эл} = f(U^2)$ (рис.9б), которая практически представляет прямую линию, позволяет приближенно разделить механические потери и магнитные. Продлевая эту линию до пересечения с осью абсцисс, получим отрезок ОК, который в масштабе мощности определяет механические потери ($p_{мех} \sim 5 \div 7 \text{ Вт}$), коррелирующие с опытными данными.

Построение векторной диаграммы (рис.10а) в режиме ХХ при номинальном напряжении 220 В (табл.3, строка 2): $\cos \varphi_P = P_P / (U \cdot I_P) = -20 / (220 \cdot 0,27) = -0,33$, $\varphi_P = 109^\circ$, минус перед мощностью характеризует генераторный режим работы рабочей обмотки; $\cos \varphi_{II} = 67 / (220 \cdot 0,45) = 0,62$. Характер пуска - вой обмотки активно-емкостный, и $\varphi_{II} = -47^\circ$.

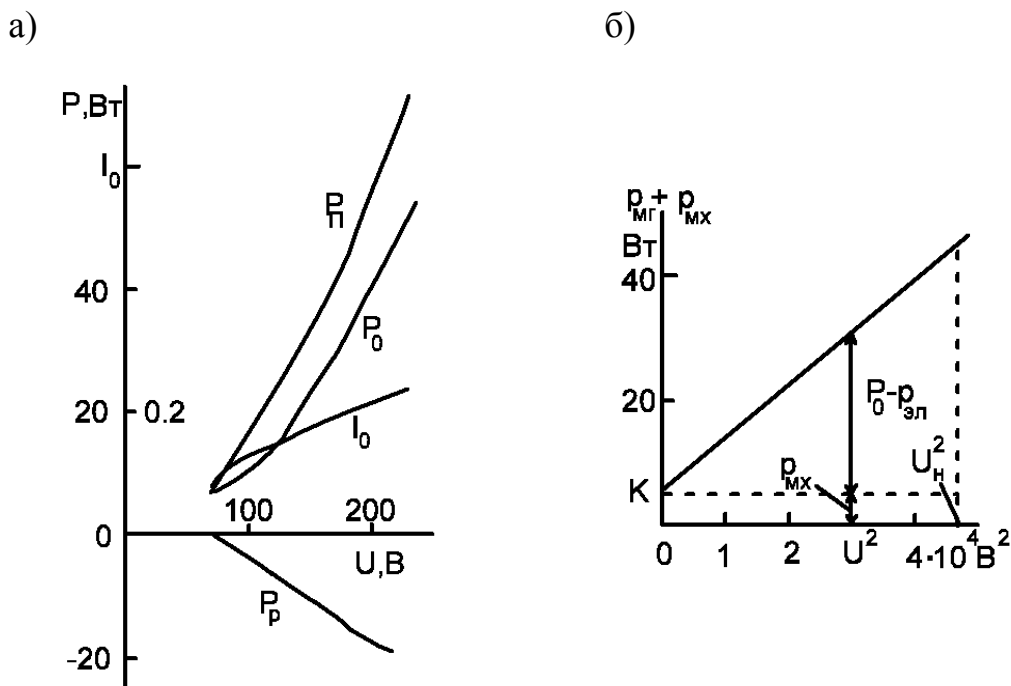


Рис. 9. Режим холостого хода, $C=4 \text{ мкФ}$:

а – зависимость $P_0, P_P, P_{II}, I_0 = f(U)$; б – $p_{МГ} + p_{МХ} = f(U^2)$, разделение потерь

МДС каждой обмотки создает пульсирующее поле. Результирующая МДС обмоток создает вращающееся, но, в данном случае, эллиптическое магнитное поле. Действительно, угол сдвига векторов тока фаз $\psi = \varphi_P - \varphi_{II} =$

$=109^\circ+47^\circ=156^\circ$, и только при $\psi=90^\circ$ поле становится круговым (при некоторых дополнительных условиях).

Векторная диаграмма (рис.10б), построенная по экспериментальным данным (последняя строка табл. 2, $\cos\varphi_P=P_0/(I_0 \cdot U)=37/(0,35 \cdot 220)=0,48$, $\varphi_P=61^\circ$), соответствует работе двигателя в однофазном режиме (одна рабочая обмотка). Магнитное поле здесь пульсирующее. Прямое поле превышает обратное поле и создает вращающий момент (рис.8, точка б).

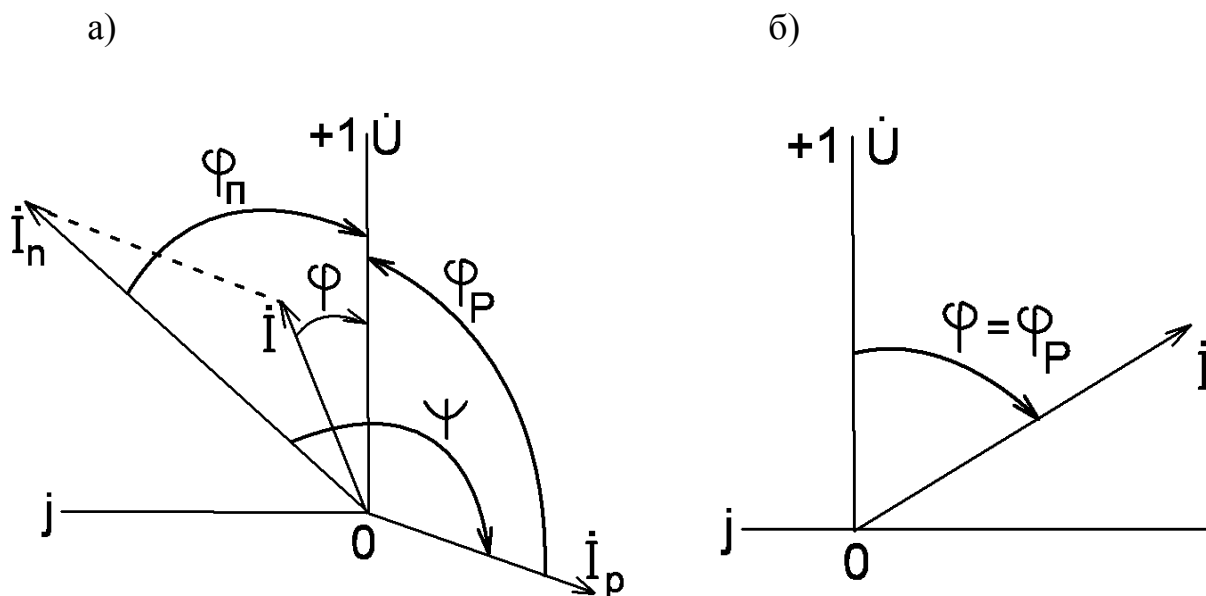


Рис.10. Векторные диаграммы КД в режиме холостого хода, $U=220V$:
 а — двухфазный режим; б — однофазный режим ($I_n=0$)

6. Режим короткого замыкания (КЗ)

Схема испытаний двигателя в опыте КЗ остается такой же, как и в опыте ХХ (рис. 3) М и N замкнуты. Измерительные приборы должны быть выбраны в соответствии как минимум с двукратным увеличением номинального значения тока. Ротор жестко фиксируется, двигатель не вентилируется. Электромагнитная мощность, передаваемая через зазор на ротор, преобразуется в тепловую в обмотке ротора. Во избежание перегрева обмоток применяется принудительное охлаждение, и опыт проводится кратковременно. Измерение электромагнитной силы осуществляется непосредственно пьезодатчиком в соответствии со схемой, показанной на рис. 11.

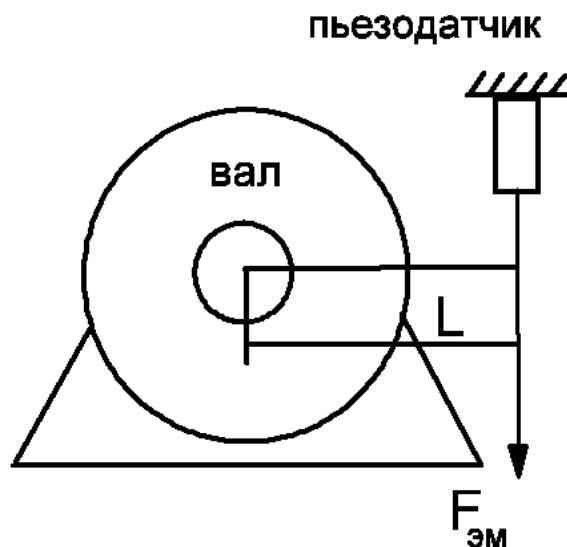


Рис.11. Определение электромагнитного момента

Опытные данные, представленные в табл.4, как и в режиме ХХ, получены при емкостном ФЭ ($Z = -jX_C$, $C=4$ мкФ).

Таблица 4

Характеристики короткого замыкания двигателя

U_K	I_K	P_K	I_p	P_p	I_n	P_n	G	$M_{эм}$
В	А	Вт	А	Вт	А	Вт	кг	Нм
220	0,83	177	0,9	160	0,31	15	0,39	0,15
195	0,73	140	0,76	126	0,28	12	0,3	0,11
150	0,56	84	0,57	76	0,21	8	0,19	0,07
130	0,48	62	0,49	54	0,18	5,4	0,12	0,044
105	0,38	41	0,4	37	0,15	3,4	0,065	0,023
75	0,3	26	0,32	23	0,12	2,2	0,045	0,017

По измеренным и вычисленным величинам на рис. 12 построены характеристики КЗ. В отличие от ХХ, здесь активная входная мощность равна сумме мощностей фаз. Рабочая обмотка выходит из генераторного режима.

Ниже приводится конкретный расчет потерь мощностей обмоток и электромагнитного момента при $U_K = U_n = 220$ В (табл.4). Рабочая обмотка:

$r_p = 88 \cdot 1,1 = 97$ Ом (с учетом нагрева), электрические потери мощности обусловлены активным сопротивлением, $p_{p\text{ЭЛ}} = r_p \cdot I_p^2 = 97 \cdot 0,9^2 = 79$ Вт, мощность без учета электрических потерь $P'_p = P_p - p_{p\text{ЭЛ}} = 160 - 79 = 81$ Вт.

Пусковая обмотка: $r_{II} = 59 \cdot 1,1 = 65$ Ом, $p_{II\text{ЭЛ}} = 65 \cdot 0,31^2 = 6,2$ Вт, $P'_{II} = P_{II} - p_{II\text{ЭЛ}} = 15 - 6 = 9$ Вт.

Индуктивно передаваемая через зазор на ротор двигателя электромагнитная мощность: $P_{2\text{ЭМ}} = P'_p + P'_{II} - p_{MG} = 81 + 9 - 45 = 45$ Вт, где $p_{MG} = 45$ Вт — магнитные потери определены из режима XX (рис.9б) при $U_H = 220$ В ($4,84 \cdot 10^4$ В²). Электрические потери мощности в обмотке заторможенного ротора эквивалентны механической мощности, развиваемой двигателем. Следовательно, электромагнитный момент $M_{\text{ЭЛ}} = P_{2\text{ЭМ}} / (0,105 \cdot n_1) = 45 / (0,105 \cdot 3000) = 0,14$ Нм.

Момент двигателя с заторможенным ротором измерялся пьезодатчиком: $M_{\text{ЭЛ}} = gG \cdot L = 9,8 \cdot 0,39 \cdot 0,0375 \approx 0,14$ Нм (опытные данные приведены в табл. 4). Сопоставление расчета и измерения проведено только для $U = 220$ В.

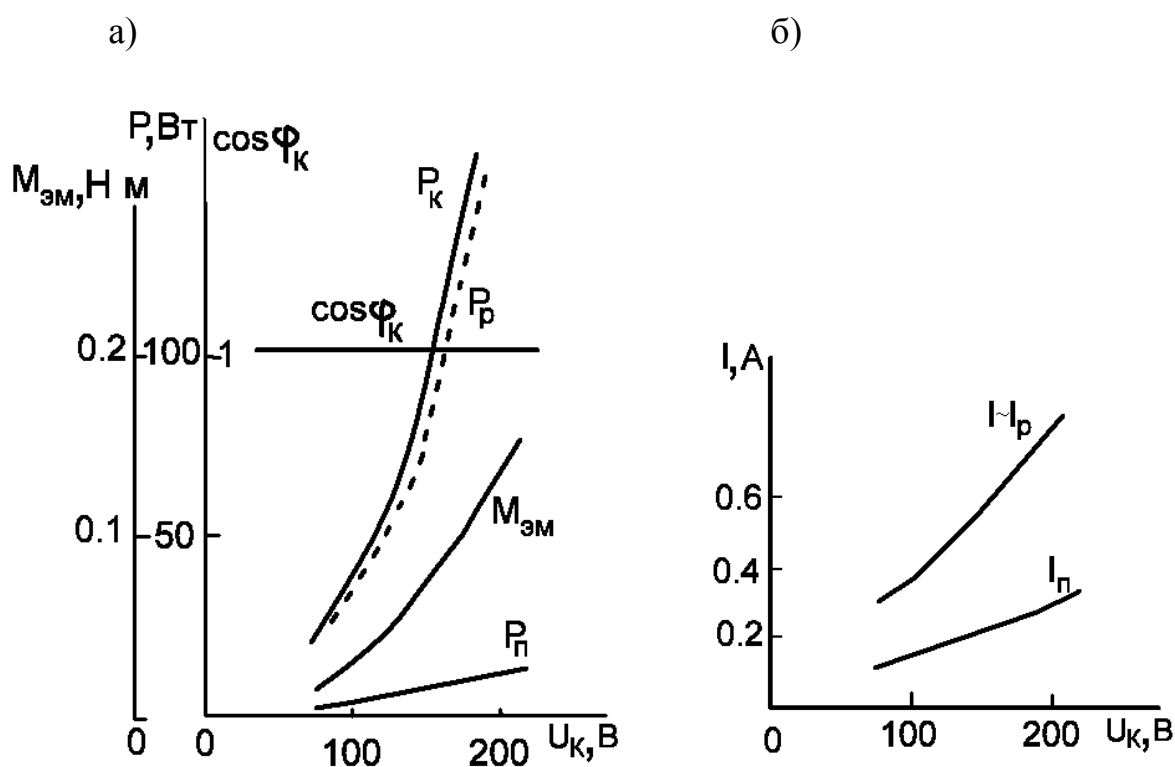


Рис. 12. Характеристики короткого замыкания КД, $C=4$ мкФ:
а — $P_k, P_p, P_{II}, M_{\text{эм}}, \cos \phi_k = f(U_k)$; б — $I \sim I_p, I_{II} = f(U_k)$

На рис.13 построены векторные диаграммы при напряжении $U_K=220$ В и 105 В. В первом случае ток равен пусковому $I_K=I_{\text{ПУСК}}=0,83$ А, во втором номинальному, $I_K=I_N=0,38$ А. Кратность пускового тока $k_I=I_{\text{ПУСК}}/I_N \approx 2,2$. Углы сдвига пускового и рабочего токов $\psi=\varphi_P-\varphi_{\Pi}$ практически одинаковые ($\psi_{220} \approx 113^\circ$ и $\psi_{105} \approx 109^\circ$), и вращающееся магнитное поле будет эллиптическим. Двигатель работает с отстающим током ($\varphi>0$), и мощность сосредоточена в рабочей обмотке (табл. 4). Реактивная мощность поступает из сети.

Сопоставим эти векторные диаграммы с диаграммой КД, работающего в режиме ХХ и с таким же ФЭ (см. рис. 10а). Здесь $\psi=156^\circ$ (табл. 3, строка 1).

Рабочая обмотка генерирует ($P_P=-20$ В). Электромагнитный момент создает пусковая (конденсаторная) обмотка ($P_{\Pi}=67$ Вт) и двигатель работает с опережающим током ($\varphi<0$), генерируя реактивную мощность в сеть.

При отключении пусковой обмотки (табл. 2 последняя строка, векторная диаграмма рис. 10б) двигатель переходит в однофазный режим $P=P_P=37$ Вт ($n_2=2903$ об/мин) и работает при отстающем токе. Эти три режима работы показывают, как двигатель «самооптимизируется».

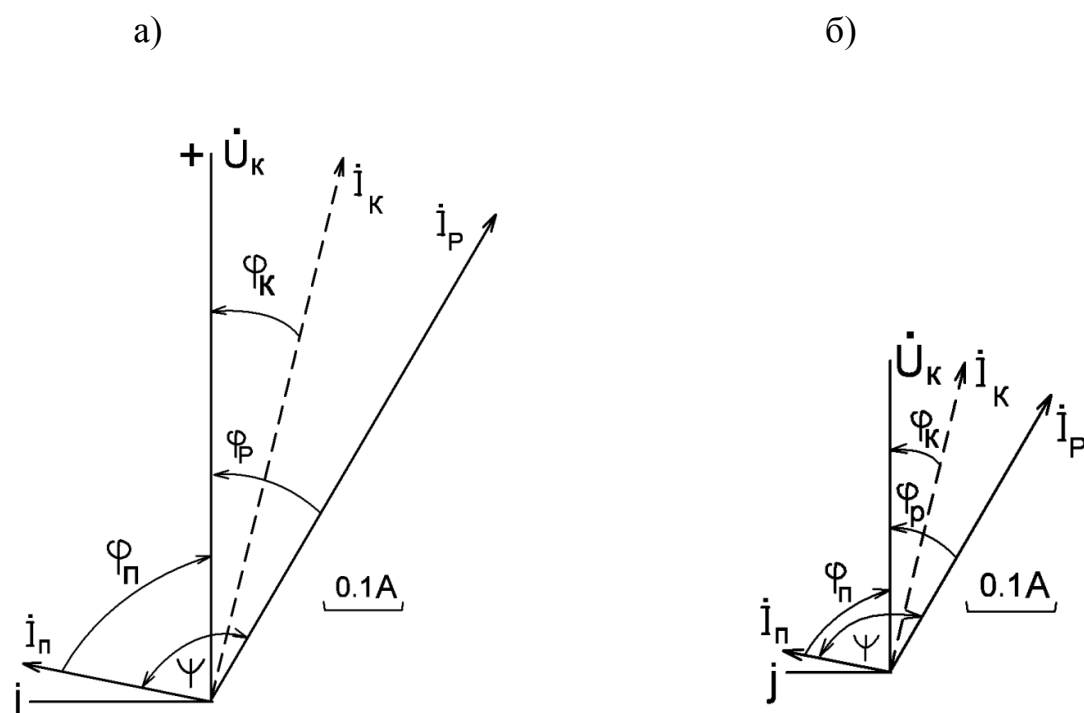


Рис.13. Векторные диаграммы КД при заторможенном роторе и $C=4$ мкФ:
а — $U_N=U_K=220$ В, $I_K=I_{\text{ПУСК}}=0,83$ А; б — $U_K=105$ В, $I_K=I_N=0,38$ А

7. Рабочий режим КД (режим нагрузки)

Рабочая схема проведения опыта предоставлена на рис.14. На одном валу с КД находится трехфазный АД мощностью 120 Вт, используемый в режиме электромагнитного торможения (ЭТ). Для этого обмотку статора подключают к источнику В выпрямленного напряжения, которое регулируется ЛАТРом.

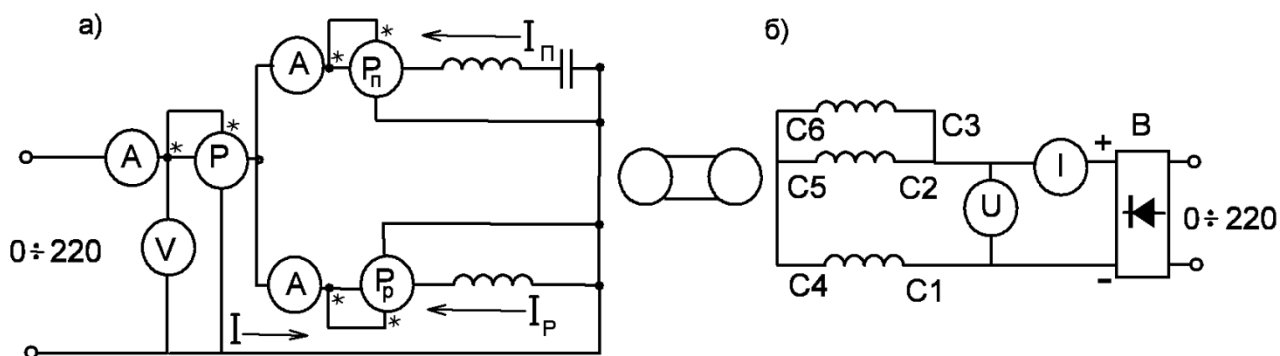


Рис.14. Схема установки для исследования КД в режиме нагрузки:

а — КД; б — электромагнитный тормоз

КД приводит во вращение ротор ЭТ, в обмотке которого индуцируются токи. Взаимодействие их с постоянным магнитным полем статора ЭТ создает тормозной момент, приблизительно определяемый мощностью $U \cdot I$, подводимой к обмотке статора. Обработанные результаты эксперимента представлены в табл.5.

В соответствии с данными табл.5 на рис.15 построены зависимости мощностей и токов в функции нагрузки. В режиме ХХ ток рабочей обмотки максимальный (0,26 А, рис.15б) и она находится в генераторном режиме. По мере увеличения нагрузки ток уменьшается, и мощность рабочей обмотки, пересекая ось абсцисс, становится положительной и участвует в создании вращающегося момента. С другой стороны, ток пусковой обмотки монотонно понижается. В итоге при некоторой нагрузке токи становятся равными, а вращающееся магнитное поле, очевидно, близко к круговому.

Таблица 5

Опытные данные нагрузочной характеристики при $U_n=220$ В с емкостным
ФЭ, $C=4$ мкФ

S	n_2	I	P	I_p	P_p	I_{II}	P_{II}	U	P_-	ψ
-	об/мин	A	Вт	A	Вт	A	Вт	В	Вт	град
0,017	2949	0,23	50	0,26	-18	0,43	64	338	0	156
0,033	2900	0,26	56	0,23	-8	0,42	62	329	8	—
0,0645	2860	0,29	62	0,22	0	0,41	61	325	18	137
0,068	2795	0,34	76	0,22	17	0,4	59	312	38	—
0,087	2740	0,38	85	0,24	28	0,39	56	306	51	102
0,11	2661	0,42	93	0,06	36	0,38	54	298	58	—
0,13	2620	0,46	100	0,3	47	0,37	53	287	63	—
0,16	2520	0,5	108	0,32	58	0,36	49	284	71	93
0,18	2470	0,52	112	0,34	65	0,35	47	280	74	80

При нагрузке (~ 66 Вт) имеет место равенство мощностей фаз. Из этого условия, как часто утверждается, определяют оптимальную величину емкости конденсатора в качестве ФЭ ($C_p = 66 \cdot 10^6 / (2\pi \cdot 50 \cdot 220^2) \approx 4.34$ мкФ). Динамику рабочего режима двигателя, показанную на рис. 15, можно дополнить векторными диаграммами, представленными на рис. 16.

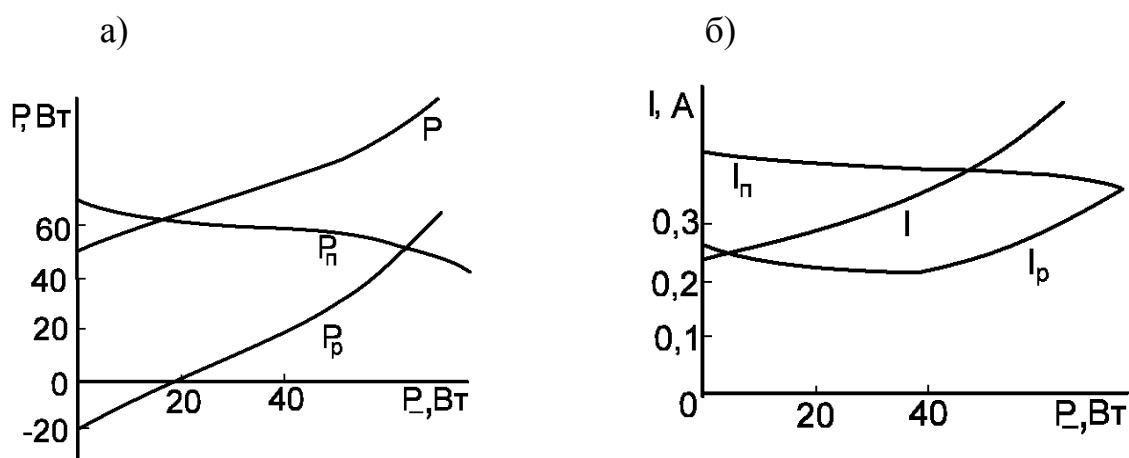


Рис. 15. Рабочие характеристики КД. Зависимости: а — мощностей;
б — токов в функции нагрузки

Векторные диаграммы построены в режиме ХХ (рис. 16а), близко к максимальной нагрузке (рис. 16г) и двух промежуточных значениях нагрузки (рис. 16б,в).

Из диаграмм следует, что КД работает с опережающим $\cos\varphi$ ($\varphi < 0$). Фазовый угол пусковой (емкостной) обмотки почти не меняется (47° - 51°), а у рабочей обмотки угол уменьшается с 109° до 42° .

При возрастании нагрузки происходит существенное перераспределение мощностей между фазами. В режиме ХХ $P_p = -18$ Вт, $P_{\Pi} = 64$ Вт, а при максимальной нагрузке, соответственно, равны 65 Вт и 47 Вт (табл. 5).

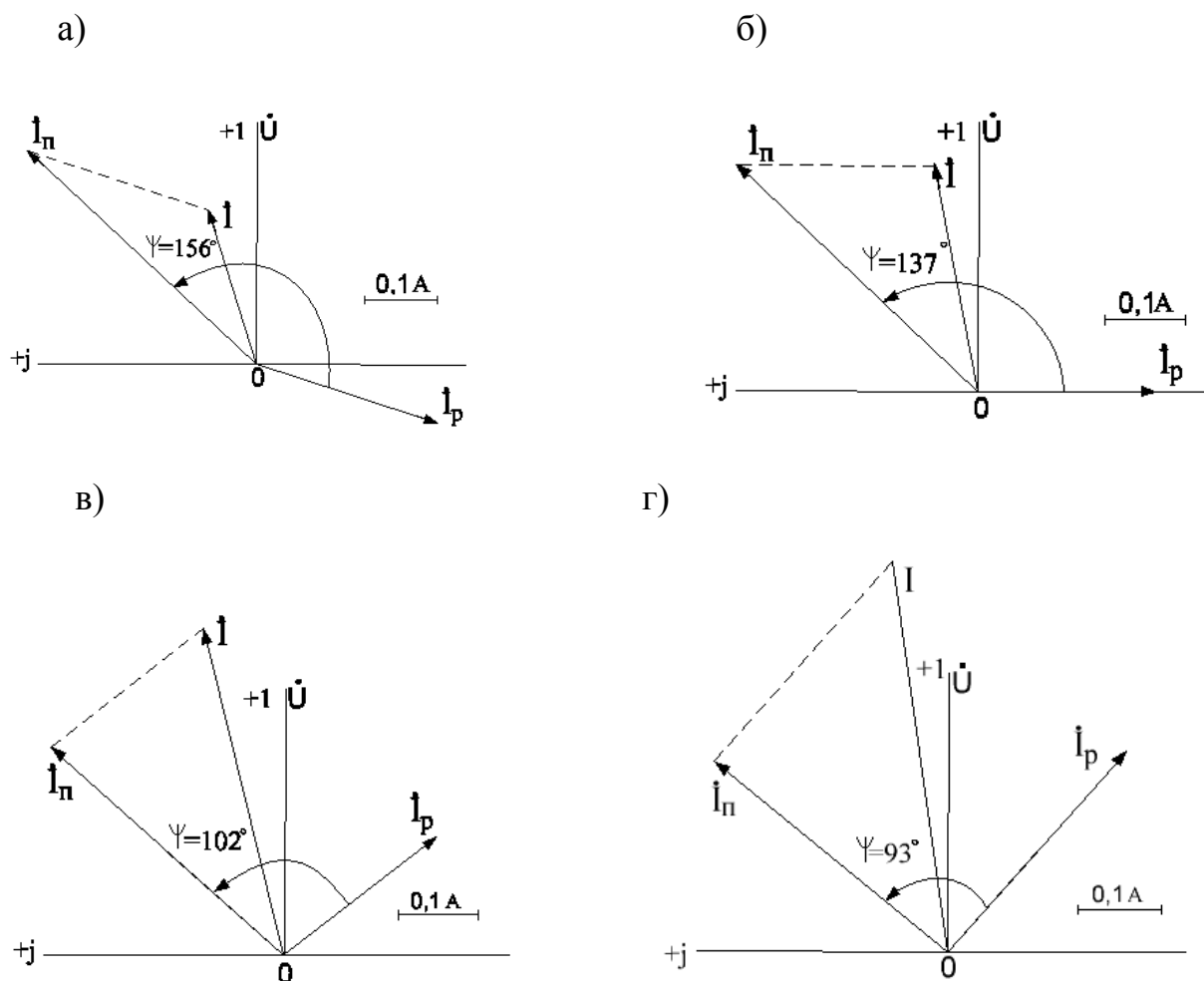


Рис. 16. Векторные диаграммы КД при $U_H = 220$ В, $C = 4$ мкФ:
а — 2949 об/мин; $\dot{I}_{\Pi} = 0,43e^{-j47^\circ}$ А, $\dot{I}_p = 0,26e^{j109^\circ}$ А; б — 2860 об/мин; $\dot{I}_{\Pi} = 0,41e^{-j47^\circ}$ А, $\dot{I}_p = 0,22e^{j90^\circ}$ А; в — 2740 об/ мин, $\dot{I}_{\Pi} = 0,39e^{-j49^\circ}$ А, $\dot{I}_p = 0,24e^{j53^\circ}$ А;
г — 2520 об/мин, $\dot{I}_{\Pi} = 0,36e^{-j51^\circ}$ А, $\dot{I}_p = 0,32e^{j42^\circ}$ А;

8. Влияние емкости на работу двигателя

В разделе 5, табл. 3 приводится характеристика холостого хода при не - изменной емкости ($C=4$ мкФ) в функции напряжения. Во всем диапазоне изменения напряжения рабочая обмотка работает в генераторном режиме (P_p - отрицательна). Обычно двигатель работает от нерегулируемого источника питания.

В табл. 6 приводятся результаты эксперимента в режиме ХХ при постоянном напряжении $U = 220$ В и для удобства анализа построены графики токов и мощностей в функции емкости (рис. 17).

Таблица 6

Характеристика ХХ при $U = 220$ В

C	I	P	I_p	P_p	I_{Π}	P_{Π}	φ	φ_{Π}	ψ
мкФ	А	Вт	А	Вт	А	Вт	град	град	Град
6	0.45	84	0.26	-36	0.72	120	129	-41	170
4	0.23	48	0.26	-19	0.44	66	109	-47	156
2	0.19	36	0.28	7.5	0.21	27	83	-54	137
1.33	0.23	26	0.3	11	0.13	16	81	-56	137

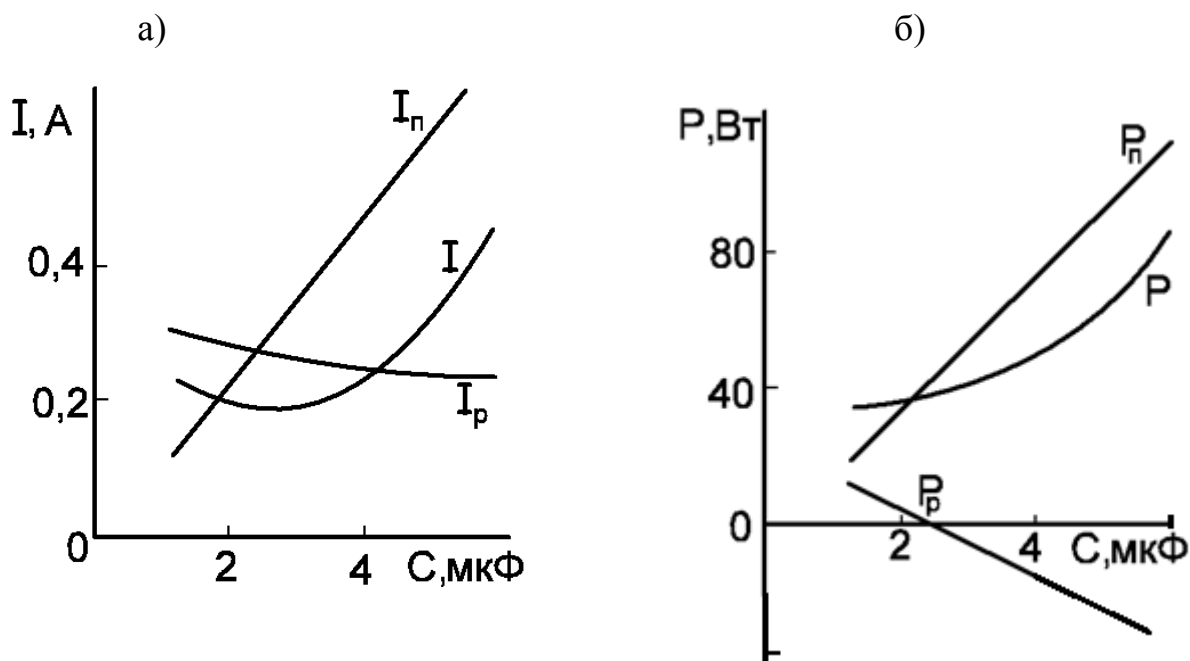


Рис.17. Зависимость параметров в функции емкости в режиме ХХ:

а — токов; б — мощностей

Общие тенденции с увеличением емкости: ток и мощность пусковой обмотки растут линейно, ток рабочей обмотки меняется мало, а мощность меняется заметно, т. е. происходит перераспределение между обмотками. При минимальной емкости ($C \approx 1$ мкФ) общий ток I максимальный ($\approx 0,23$ А) и с ростом емкости достигает своего экстремума, и после $C \approx 2,2$ мкФ начинает возрастать.

В этом емкостном интервале $P_p > 0$, и результирующая мощность равна арифметической сумме $P = P_p + P_{\Pi}$. Далее кривая мощности P_p пересекает ось абсцисс и переходит в генераторный режим, и общая мощность $P = P_{\Pi} - P_p$.

Здесь возникает целый ряд дискуссионных вопросов, которые следует обдумать, можно пролонгировать эксперименты, более подробно провести расчеты, наметить тему курсового проекта и т. д.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

Алиев И. И. Асинхронные двигатели в трехфазном и однофазном режимах.— М.: ИП «РадиоСофт», 2004.—128 с.

Кацман М. М. Расчет и конструирование электрических машин.— М.: Энергоатомиздат, 1984. — 360 с.

Вольдек А. И., Попов В. В. Электрические машины. Машины переменного тока: учебник для вузов. — СПб.: Питер, 2010. - 350 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Однофазный асинхронный двигатель (ОАД).....	3
2. Схемы включения ОАД.....	4
3. Экспериментальное определение параметров обмоток двигателя.....	5
4. Асинхронный конденсаторный двигатель (КД).....	12
5. Режим холостого хода (ХХ).....	12
6. Режим короткого замыкания (КЗ).....	15
7. Рабочий режим КД (режим нагрузки).....	19
8. Влияние емкости на работу двигателя.....	22
Библиографический список.....	24
