

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧЕРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
“САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ДИЗАЙНА

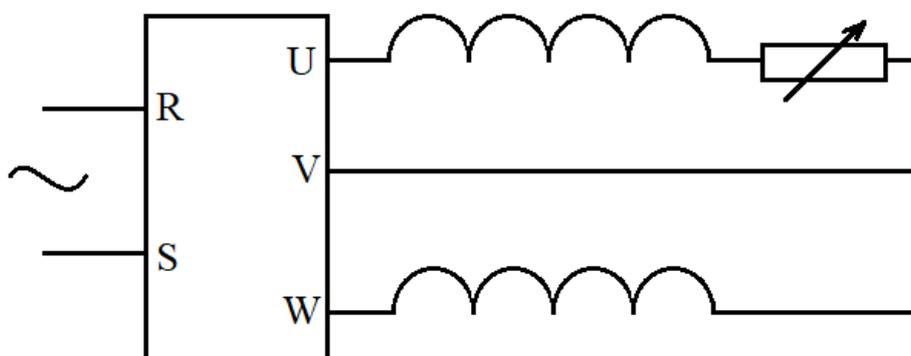
ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ

В.Ф. Васильев, В.И. Королев, К.А. Шиповалова

ЧАСТОТНОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ ОДНОФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Часть 2

Учебное пособие



Санкт-Петербург

2018

УДК 621.313 (075)

ББК 31.261я7

В 191

Васильев В.Ф., Королев В.И., Шиповалова К.А. Частотное регулирование однофазного асинхронного двигателя: учебное пособие / ВШТЭ СПбГУПТД. – СПб., 2018. Часть 2. – 19 с.

Учебное пособие по частотному регулированию однофазного асинхронного двигателя 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 электрохимическая компания».

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД в качестве учебного пособия.

Редактор и корректор Т. А. Смирнова

Техн. редактор Л.Я. Титова Темплан 2018 г., поз.18

Подп. к печати 26.03.2018. Формат 60x84/16. Бумага тип.№1.

Печать офсетная. Печ. л. 1,25. Уч.-изд.л. 1,25. Тираж 40 экз. Изд.№18.

Цена «С». Заказ

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

©Высшая школа технологии и энергетики СПбГУПТД, 2018

©Васильев В.Ф., Королев В.И., Шиповалова К.А.,2018

Введение

Учебное пособие является продолжением работы: «Асинхронные конденсаторные двигатели», часть 1. Однофазный асинхронный двигатель питается непосредственно от однофазной сети промышленной частоты, т.е. без регулирования частоты вращения ротора. Кроме того, без фазосмещающего элемента (ФЭ) конденсатора двигатель не имеет пускового момента.

Во второй части пособия исследуется тот же самый двигатель, питание которого осуществляется от преобразователя частоты (ПЧ). ПЧ позволяет запустить двигатель без ФЭ и регулировать скорость его вращения.

1. Управление скоростью вращения однофазных двигателей

1.1. Конденсаторный двигатель (КД)

Однофазные асинхронные двигатели, как правило, имеют две обмотки, сдвинутые в пространстве в общем случае на 90° . Одна из них называется рабочей обмоткой, другая – пусковой. Последовательно пусковой обмотке подключают чаще всего емкостной ФЭ. Величина емкости выбирается так, чтобы векторы токов фаз были сдвинуты на 90° , а модули их равны при номинальном режиме работы двигателя. Пусковая обмотка может отличаться от рабочей числом витков и сечением провода. Технология изготовления и расчет обмоток должны быть направлены на получение кругового вращающегося магнитного поля. Схема подключения обмотки статора к однофазной цепи напряжением 220 В и емкостным ФЭ показана на рис. 1.

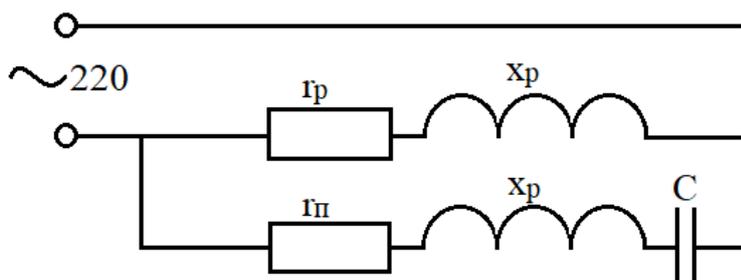


Рис. 1. Схема подключения КД к однофазной сети

Подробное экспериментально-расчетное исследование такого двигателя приведено в первой части методического пособия. Регулировать скорость вращения таких двигателей мощностью до 1.5 кВт необходимо, например, для:

- изменения расхода воздуха в системе вентиляции;
- регулирования производительности насосов;
- изменение скорости движущихся деталей на конвейерах, в станках и т.д.

1.2. Способы регулирования

Существуют следующие способы регулирования. Механические – редукторы, шестеренчатые трансмиссии и др. Способ изменения количества полюсов обмоток статора двигателя. Способы, связанные с изменением электрических параметров. Автотрансформаторное ступенчатое регулирование напряжения (три – пять отводов от обмотки трансформатора).

Тиристорный регулятор, изменяющий среднеквадратичное значение напряжения.

Транзисторный регулятор напряжения – электронный автотрансформатор. Выходной каскад регулятора, как и у частотного преобразователя (рассмотрен ниже), только для одной фазы – диодный выпрямитель и два транзистора вместо шести, а схема управления изменяет выходное напряжение.

1.3. Частотное регулирование

Частотные преобразователи – это устройства, предназначенные для преобразования переменного тока (напряжения) одной частоты в переменный ток (напряжение) другой частоты. Выходная частота в современных ПЧ может изменяться в широких пределах и быть как выше, так и ниже частоты питающей сети.

Частотное преобразование – основной способ регулирования мощности, производительности, скорости всех устройств и механизмов, приводом которых является электродвигатель.

Преобразователи частоты широко используются для трехфазных двигателей средней и больших мощностей. Для двигателей малых мощностей (~ до 7.5 кВт) применяются однофазные частотники, питаемые от однофазной сети, с обычным трехфазным выходом. Они удобны там, где отсутствует трехфазная сеть.

Однофазные двигатели управляются специализированными однофазными преобразователями частоты. Питаются они от однофазной сети и создают трехфазный выход с одной накоротко замкнутой фазой (см. ниже).

Производитель серийно выпускаемых преобразователей – INVERTEK DRIVES – заявляет, что модель Optidrive E2 может работать с конденсаторным двигателем. В выходном каскаде этого преобразователя используются, как показано на рис. 2, мостовая схема выпрямителя и схема с четырьмя (вместо 6, как в трехфазных) IGBT транзисторами.

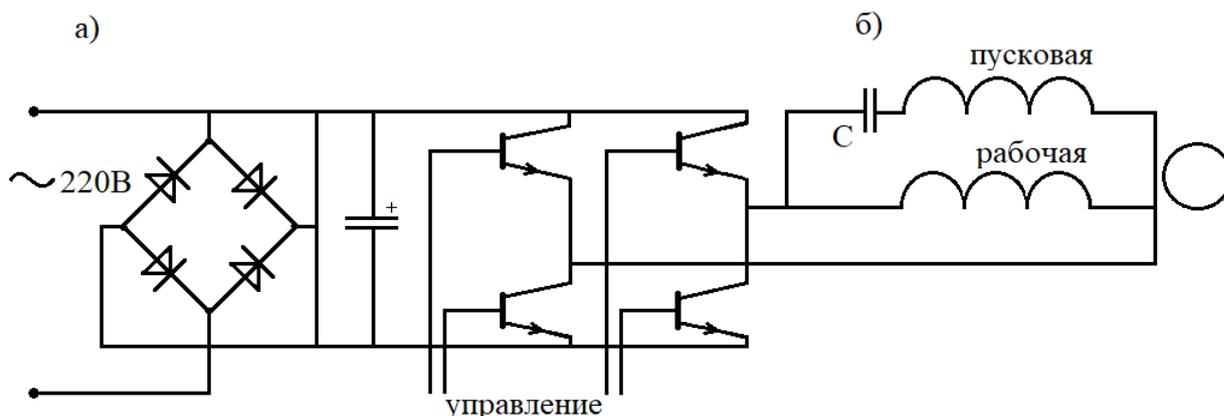


Рис. 2. Схема питания конденсаторного двигателя от ПЧ модели Optidrive E2: а – однофазный преобразователь; б – двигатель с короткозамкнутым ротором

1.4 Типовая схема ПЧ

Скорость двигателя n_2 пропорциональна частоте f . Варьируя частотой, можно поддерживать скорость вращения вала согласно заданной технологии.

Типовая схема ПЧ представлена на рис. 3.

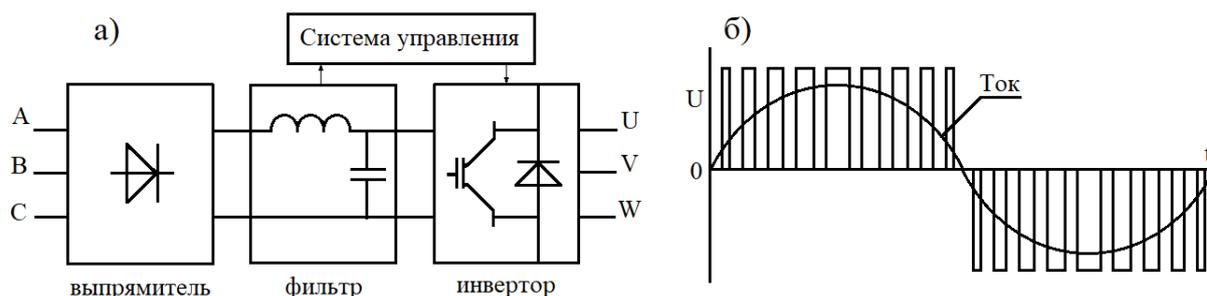


Рис. 3. Преобразователь частоты: а) типовая схема; б) выходной сигнал

Однофазное или трехфазное напряжение питающей сети $u = U_m \sin \omega t$ с постоянной амплитудой U_m и частотой f подается на выпрямитель (рис. 3 а). Для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения используется фильтр. Выпрямитель и фильтр образуют звено постоянного напряжения (тока). С выхода фильтра постоянное напряжение подается на инвертор, где осуществляется преобразование постоянного напряжения в трехфазное (или однофазное) импульсное напряжение.

По сигналам системы управления каждая обмотка двигателя соединяется через соответствующие силовые транзисторы инвертора к положительному и отрицательному полюсам звена постоянного тока. Длительность подключения каждой обмотки в пределах периода следования импульсов модулируется по синусоидальному закону. Наибольшая ширина импульсов обеспечивается в середине полупериода, а к началу и к концу полупериода уменьшается (рис. 3 б). Система управления обеспечивает широтно-импульсную модуляцию напряжения, прикладываемого к обмотке двигателя. Таким образом на выходе ПЧ формируется трехфазное (двухфазное) напряжение изменяемой амплитуды и частоты ($U_{\text{ВЫХ}} - var, f_{\text{ВЫХ}} - var$, рис. 3 б).

2. Экспериментальное исследование однофазного асинхронного двигателя

2.1. Подключение двигателя к ПЧ

Объектом исследования является конденсаторный асинхронный

двигатель с короткозамкнутым ротором КД-50 полезной мощностью 50 Вт, $U_H = 220 В$, $I_H = 0,38 А$, $n_2 = 2780$ об/мин, $r_{\Pi} = 59 \text{ Ом}$, $r_p = 88 \text{ Ом}$. Схема соединения обмоток и подключения их к сети показана на рис. 1.

Регулирование скорости вращения двигателя осуществляется от преобразователя частоты IDS-Driv серия «С» компании «ИПС», которая не рекомендует использовать конденсаторы. Рабочая схема представлена на рис. 4.

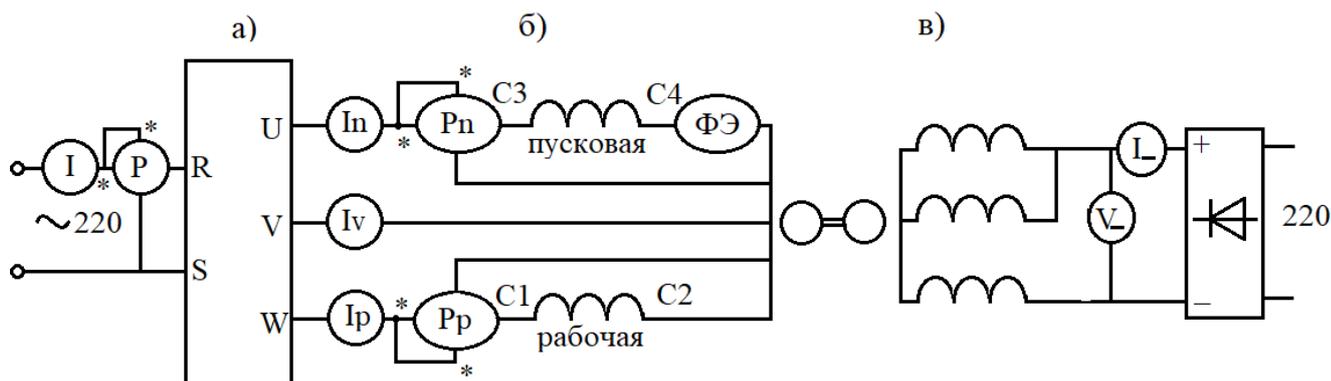


Рис. 4. Рабочая схема: а – ПЧ; б – обмотка статора; в – электромагнитный тормоз

Силовые терминалы ПЧ (рис. 5) доступны, когда его корпус открыт. Для подключения однофазного ПЧ 220 В/0,4 кВт к однофазной сети 220 В используются (рис. 5 а) входные R и S, а выходные клеммы U, V, W - для подключения однофазного двигателя, клеммы B1, B2 предназначены для тормозного резистора (рис. 5б).

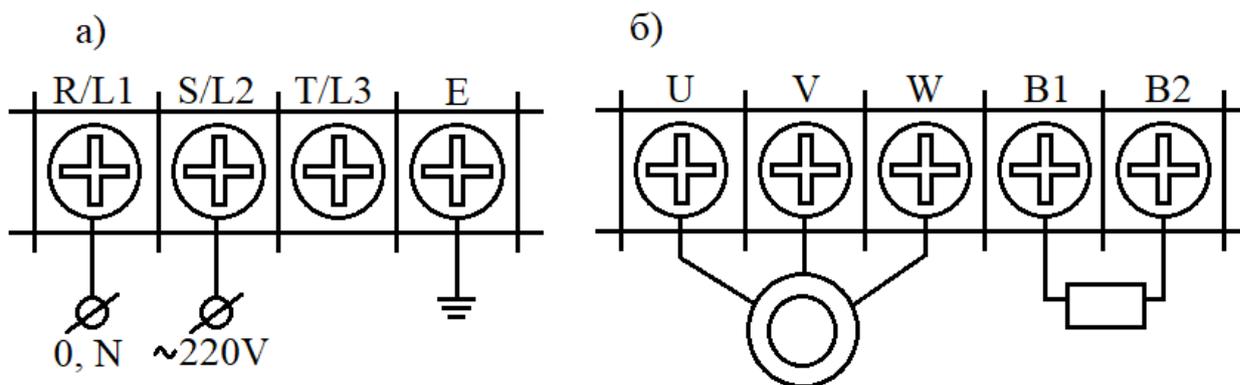


Рис. 5. Терминалы ПЧ: а – входные R/L1, S/L2; E – заземление ; б – выходные U,V,W

Рабочая C_1-C_2 и пусковая C_3-C_4 обмотки соединены соответственно с клеммами W и U. Последовательно пусковой обметке вводят резистивный фазосмещающий элемент. Концы фаз обмоток C_2 и C_4 подключаются к клемме V. Следовательно, обмотка статора с короткозамкнутой фазой V соединена по схеме звезда. Модуль напряжения фаз равен модулю напряжения частотника, как утверждают его авторы. Произошло смещение нейтральной точки обмотки статора и, следовательно, напряжения на фазах $\dot{U}_n = Ue^{j90^\circ} B$ и $\dot{U}_p = Ue^{j30^\circ} B$, т.е. к двигателю подведено двухфазное напряжение.

Трехфазный асинхронный двигатель используется в схеме рис. 4 в качестве электромагнитного тормоза. От однофазной сети регулируемой ЛАТРОм напряжение через выпрямитель подается на обмотки статора. Мощность $P_ = U_I I_$ характеризует нагрузку испытуемого двигателя.

2.2. Режим холостого хода (XX)

Опыт XX проводится по схеме рис. 4 без ФЭ и отключенным электромагнитным тормозом. Результаты опыта сведены в табл. 1.

Таблица 1

Частотное регулирование в режиме XX

n_2 мин ⁻¹	f Гц	P Вт	I А	I _v А	P _p Вт	I _p А	I _n А	P _n Вт
538	10	20	0.30	0.38	3	0.06	0.32	10
1140	20	36	0.33	0.55	7	0.08	0.45	21
1720	30	54	0.45	0.65	13	0.10	0.55	30
2370	40	74	0.58	0.76	25	0.15	0.62	37
2944	50	92	0.70	0.84	39	0.19	0.67	40
3467	60	81	0.68	-	39	0.19	0.51	27
4046	70	74	0.63	-	39	0.19	0.44	20

Однофазный двигатель, подключенный непосредственно к однофазной цепи без ФЭ, как известно, не запускается ввиду отсутствия пускового момента. Этот же двигатель, подключенный к ПЧ, не только имеет пусковой момент, но способен выдержать $\approx 50\%$ нагрузку ($P_ = 26$ Вт, табл. 2). Объясняется это, как отмечалось в разделе 2.1, наличием двухфазного напряжения U_n и U_p .

Токи обмоток с активно-индуктивным характером смещены относительно своих напряжений на фазовые углы $\varphi_{\text{п}}$ и $\varphi_{\text{р}}$.

Таблица 2

Сравнительный анализ результатов ХХ и нагрузки без ФЭ и $f = 50$ Гц

n_2	P	I	I_v	P_p	I_p	$I_{\text{п}}$	$P_{\text{п}}$	$\varphi_{\text{п}}$	$\varphi_{\text{р}}$	P_-
мин ⁻¹	Вт	А	А	Вт	А	А	Вт	град	град	Вт
2944	92	0.7	0.84	39	0.19	0.67	40	74	21	-
2750	120	0.85	0.9	5.0	0.24	0.66	58	66	19	26

Векторы токов рабочей и пусковой обмоток также смещаются на угол Ψ и как следствие, образуется вращающее электрическое магнитное поле. Взаимодействие поля и индуцированным им током создается вращающий электромагнитный момент, под действием которого ротор завращается с частотой n_2 . По данным табл. 2 построены векторные диаграммы (рис. 6).

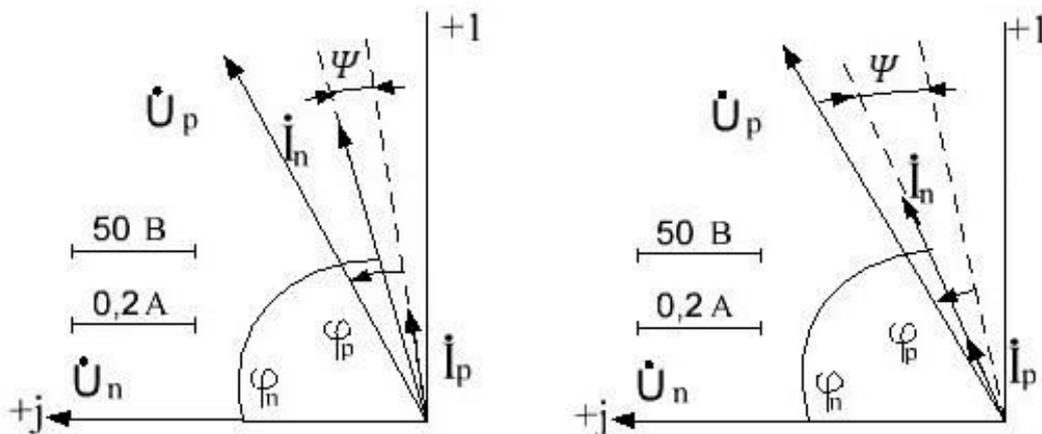


Рис.6. Векторные диаграммы без ФЭ и $f = 50$ Гц. Режим ХХ: а – $P_- = 0$, $I_{\text{п}} = 0,67e^{j16^\circ} \text{ A}$, $I_{\text{р}} = 0,19e^{j9^\circ} \text{ A}$, $\Psi = \psi_{\text{пi}} - \psi_{\text{рi}} = 16^\circ - 9^\circ = 7^\circ$; режим нагрузки: б – $P_{-26} \text{ Вт}$, $I_{\text{п}} = 0,66e^{j24^\circ} \text{ A}$, $I_{\text{р}} = 0,24e^{j11^\circ} \text{ A}$,

$$\Psi = \psi_{\text{пi}} - \psi_{\text{рi}} = 24^\circ - 11^\circ = 13^\circ$$

Углы сдвига векторов тока $\Psi(\dot{I}_{pi} \wedge \dot{I}_{pi})$ соответственно равны: в режиме ХХ: $\Psi = (\psi_{pi} - \varphi_{pi}) - (\psi_{pi} - \varphi_{pi}) = (90^\circ - 74^\circ) - (30^\circ - 21^\circ) = 16^\circ - 9^\circ = 7^\circ$; в режиме нагрузки: $\Psi = (90^\circ - 66^\circ) - (30^\circ - 19^\circ) = 11^\circ$

Здесь: $\dot{U}_n = 220e^{j90^\circ} V$, $\dot{U}_p = 220e^{j30^\circ} V$ – векторы напряжений обмоток и их начальные фазы $\psi_{pi} = 90^\circ$ и $\psi_{pi} = 30^\circ$; начальные фазы токов $\psi_{pi} = \psi_{pi} - \varphi_{pi}$, $\psi_{pi} = \psi_{pi} - \varphi_{pi}$. Углы сдвига фаз определяются по показаниям амперметров и электродинамических ваттметров по известным формулам: $\cos \varphi = P/(UI)$, $\varphi = \arccos P/(UI)$ для каждой фазы φ_{pi} и φ_{pi} .

На рис. 7 построены графики токов и мощностей по экспериментальным данным табл. 1. Здесь следует отметить, что наличие трех ваттметров (рис. 4) позволяют определить потери в частотнике. Пунктирная линия на рис. 7 б показывает мощность двигателя, а разность $\Delta P = P - (P_n + P_p)$ – потери в ПЧ.

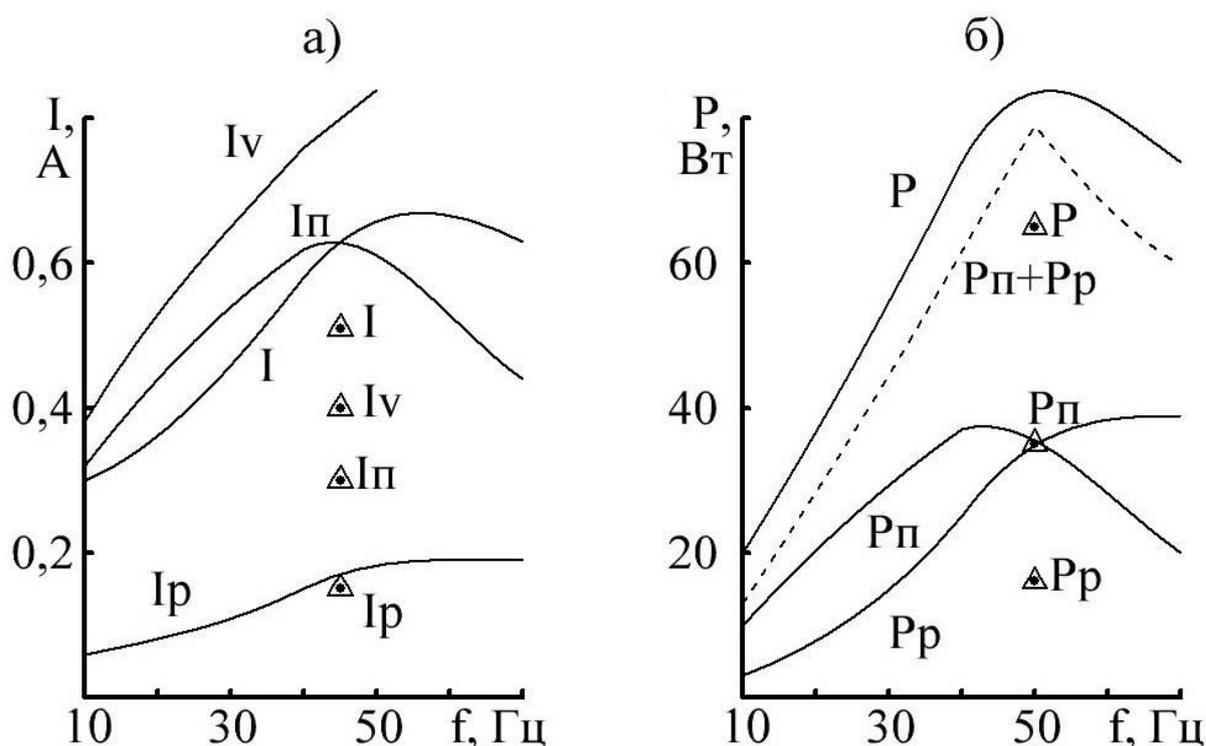


Рис. 7. Частотное регулирование без ФЭ: а – $I_v, I_n, I, I_p = F(f)$; б – $P, P_n, P_p, P_n + P_p = F(f)$; в ФЭ, $f = 50$ Гц: $\triangle I, \triangle I_v, \triangle I_n, \triangle I_p, \triangle P, \triangle P_n, \triangle P_p$

В пределах частот 10 – 70 Гц потери увеличиваются с 7 до 15 Вт, а КПД ПЧ при 10 Гц и 50 Гц соответственно равны 65 и 86%.

Эффективность работы двигателя заметно повышается с введением последовательно пусковой обмотке ФЭ. В сопоставлении на рис. 7 приводятся результаты опыта, обозначенные треугольниками \blacktriangle только для $f = 50$ Гц и активным ФЭ сопротивлением 307 Ом. В результате мощность из сети уменьшилась на 29%. Понизились токи, например, в закороченной фазе в 2.1 раза.

В табл.3 приведены данные для сравнительного анализа однофазного двигателя, который питается от ПЧ (для краткости обозначенный ДП), и конденсаторного двигателя, включенного в однофазную сеть (рис.1). Эксперименты проведены в режиме ХХ и постоянной частоте $f = 50$ Гц без ФЭ (табл.3, строка 1) и с активным ФЭ $R=307$ Ом (строка 2). В пусковую фазу конденсаторного двигатель подключен емкостной ФЭ $Z = -j786$ Ом (строка 3).

Таблица 3

Сравнительный анализ ДП и КД в режиме ХХ

	n_2	P	I	I_v	P_p	I_p	I_{Π}	P_{Π}	φ_{Π}	φ_p	Ψ
Ом	мин ⁻¹	Вт	А	А	Вт	А	А	Вт	град	град	град
0	2944	92	0.7	0.84	39	0.19	0.67	40	74	21	7
307	2946	65	0.51	0.4	16	0.17	0.3	38	55	65	70
КД -j786	2960	48	0.23	0	-20	0.27	0.45	67	-47	109	156

Подробный анализ работы двигателей с учетом теоретического обоснования предлагается провести студентам самостоятельно. Исследования по конденсаторным двигателям приводятся в первой части методического пособия, где достаточно подробно рассматривается и теория.

2.3. Рабочий режим двигателя

Результаты нагрузочной характеристики сведены в табл. 4. По ним построены функциональные зависимости токов и мощностей от нагрузки $P_{\text{н}} = U_{\text{н}} I_{\text{н}}$ (рис.8). Опыт проводился при номинальном напряжении $U = 220$ В,

промышленной частоте $f = 50$ Гц и активном ФЭ с постоянным сопротивлением $R = 300$ Ом.

Таблица 4

Нагрузочная характеристика двигателя

n_2	P	I	I_v	I_p	P_p	I_{Π}	P_{Π}	P_{-}	φ_{Π}	φ_p	Ψ
мин ⁻¹	Вт	А	А	А	Вт	А	Вт	Вт	град	град	град
2933	67	0.52	0.41	0.16	18	0.3	39	0	54	59	65
2680	115	0.8	0.54	0.29	56	0.29	48	40	41	29	48
2760	100	0.73	0.5	0.25	44	0.29	45	30	45	37	52
2800	89	0.66	0.47	0.21	37	0.29	43	21	-	-	-
2860	79	0.6	0.44	0.18	30	0.3	41	13	-	-	-
2900	72	0.55	0.43	0.17	23	0.3	40	6.4	-	-	-
2920	68	0.54	0.42	0.17	21	0.3	40	2.5	-	-	-

Оптимальный режим работы однофазного двигателя предполагает создание вращающегося кругового магнитного поля. Такое поле получается смещением магнитных осей и векторов тока обмоток на 90 %. Первое условие выполняется конструктивно при изготовлении двигателя смещением обмоток в пространстве на 90°. В КД, который питается от однофазной сети, достаточно просто осуществить смещение токов фаз изменением емкости, величину которой можно заранее вычислить. Здесь же, как отмечалось в разделе 2.1, двигатель с активным ФЭ питается от 2-х фазного источника и возникает вопросы оптимальной эксплуатации.

На рис. 8 а при максимальной нагрузке $P = 40$ Вт токи фаз равны $I_{\Pi} = I_p = 0,29$ А, а мощности отличаются (табл.4 строка 2). Строкой ниже ($P = 30$ Вт) $P_{\Pi} \approx P_p$, но токи по величине различны. Приближенная оценка КПД в первом случае ≈ 35 %, во втором - ≈ 30 % с учетом потерь в частотнике. Кстати, эти потери $\Delta P = P - (P_p + P_{\Pi})$ практически не зависят от изменения нагрузки и при $f = 50$ Гц $\text{const } \Delta P \approx 10$ Вт.

Рассмотренные события иллюстрируются векторными диаграммами (рис. 9). По мере роста нагрузки происходит перераспределение мощностей между обмотками, включая частный случай их равенства (рис. 8 б), а также равенства токов фаз (рис. 8 а). Причем модуль тока пусковой обмотки сохраняется неизменным, а ток рабочей обмотки существенно возрастает (с 0,16 А до 0,29 А – табл. 4).

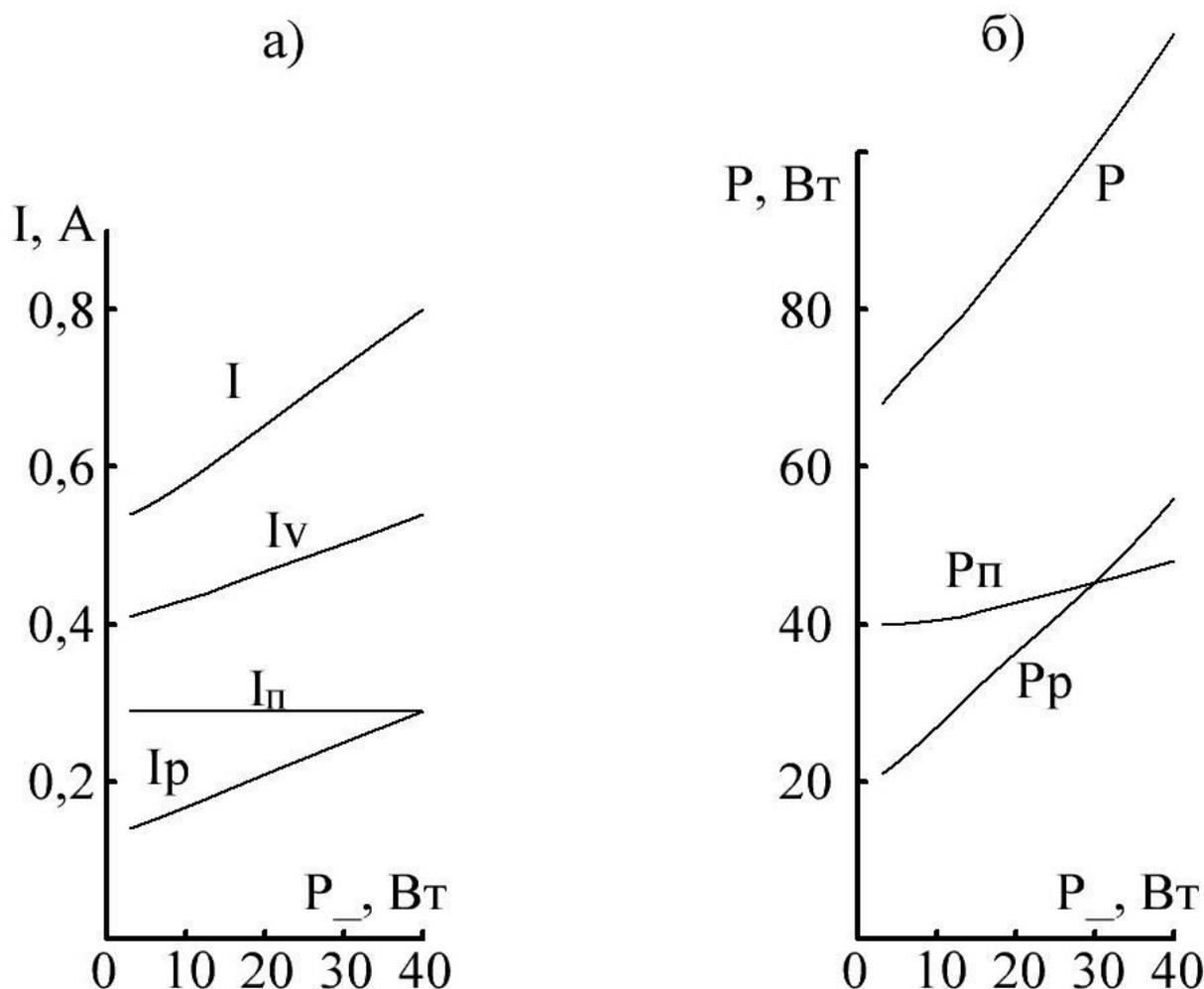


Рис. 8. Зависимость от нагрузки ($R = 300 \text{ Ом} - \text{const}$): а – токов;
б – мощностей

Изучив полученные результаты и используя материал первой части пособия, предлагается провести расчет и анализ:

1. Вычислить углы сдвига фаз $\varphi_{п}$, $\varphi_{р}$ и смещение векторов тока пусковой и рабочей обмоток и заполнить табл. 4.
2. Построить три векторные диаграммы в масштабе (рис. 9).

3. Провести письменный анализ изменения токов фаз с ростом нагрузки. Базовая векторная диаграмма в режиме ХХ показана на рис. 9 а.

4. Построить временные диаграммы $i_n = \sqrt{2} \cdot 0,29 \sin \omega t$,

$i_p = \sqrt{2} \cdot 0,29 \sin(\omega t + 60)$ и сложить графически синусоиды

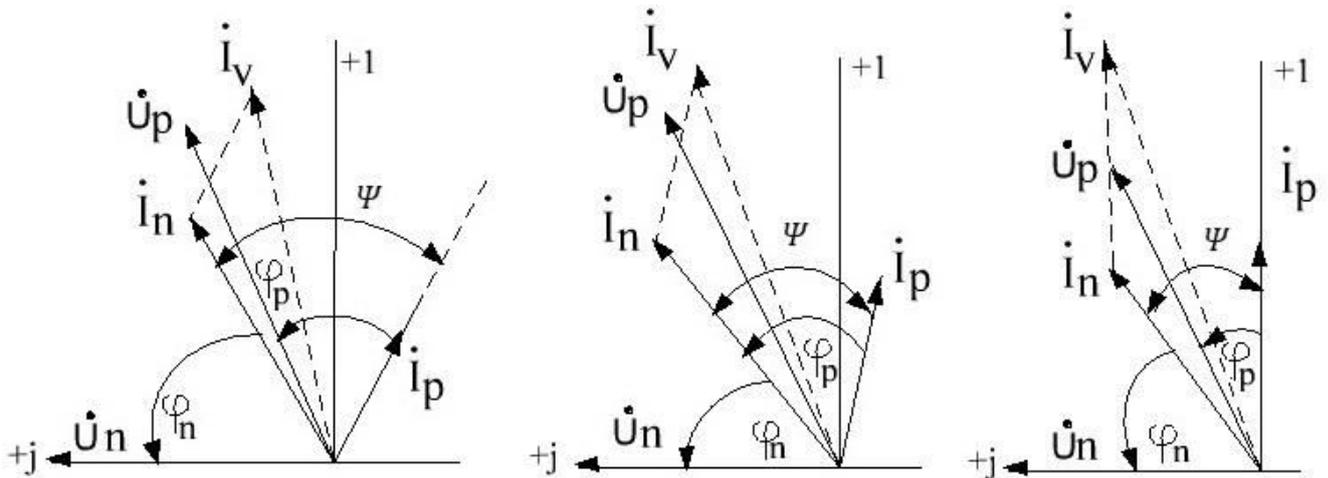


Рис. 9. Векторные диаграммы ($R = 300 \text{ Ом}$):

а - режим холостого хода: ($P_- = 0, I_n = 0,3e^{j36^\circ} \text{ А}, I_p = 0,16e^{-j29^\circ} \text{ А}$;

б - режим нагрузки: $P_- = 30 \text{ Вт}$) $I_n = 0,29e^{j45^\circ} \text{ А}, I_p = 0,25e^{-j7^\circ} \text{ А}$;

в - $P = 40 \text{ Вт}, I_n = 0,29e^{j49^\circ} \text{ А}, I_p = 0,29e^{-j1^\circ} \text{ А}$,

2.4. Зависимость параметров двигателя от сопротивления ФЭ

В опыте, проводимом при постоянной нагрузке $P_- = 23 \text{ Вт}$, использовался реостат на 1000 Ом ($I=0,4 \text{ А}$). Результаты опыта представлены в табл. 5, а зависимость токов и мощностей фаз двигателя от активного сопротивления R в цепи пусковой обмотки на рис.10. Изменение сопротивления ФЭ практически не влияло на частоту вращения ротора ($n_2 \approx 2820 \text{ об/мин}$), но в режиме холостого хода $n_2 = 2940 \text{ об/мин}$.

На рис 10 б обращает внимание зависимость $P_n + P_p$. Разность $\Delta P = P - (P_n + P_p)$ (рис. 7. б), ответственная за потери в частотнике, пропорциональна его частоте. Здесь $f = 50 \text{ Гц} - \text{const}$ и потери ΔP не являются

линейными. В итоге, в данном случае, кривая $P_p + P_{\Pi}$ имеет не ярко-выраженный экстремум, который достигается в районе $R \approx 450 \text{ Ом}$ (рис.10б).

Таблица 5

Нагрузочная характеристика при изменении сопротивления ФЭ

P	I	I_v	I_p	P_p	I_{Π}	P_{Π}	U_R	R	Ψ
Вт	А	А	А	Вт	А	Вт	В	Ом	
10.5	0.76	0.7	0.18	42	0.5	58	38	76	18
97	0.72	0.64	0.17	33	0.46	53	55	120	32
88	0.66	0.52	0.17	32	0.36	43	80	222	34
85	0.65	0.46	0.19	34	0.3	40	100	333	43
78	0.6	0.42	0.23	37	0.24	35	108	450	54
77	0.6	0.4	0.25	40	0.2	32	115	575	60
77	0.58	0.38	0.28	42	0.17	30	120	706	70

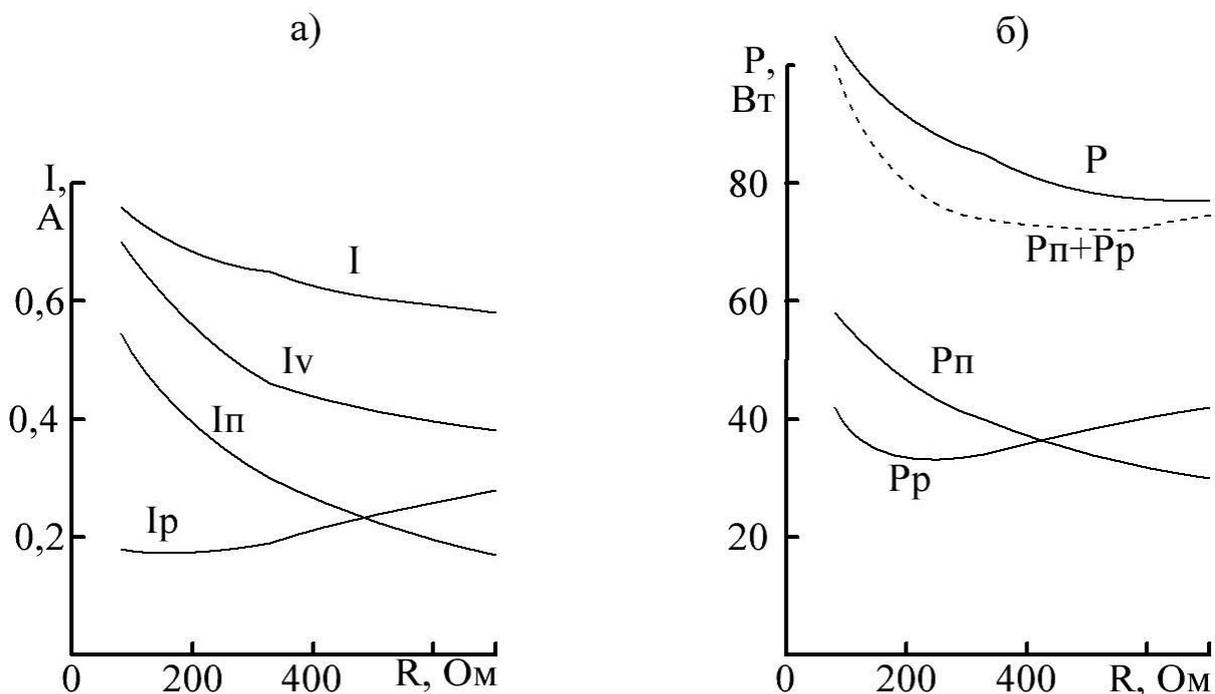


Рис. 10. Зависимости $I, P = f(R)$: а – токов; б – мощностей

Для конкретного измерения, приведенного в табл.5, строка 5, предположим $P_p = P_{\Pi} = 36 \text{ Вт}$, $I_{\Pi} = I_p = 0,235 \text{ А}$. Тогда $\varphi_{\Pi} = \varphi_p = 46^{\circ}$, а угол

смещения векторов тока фаз $\Psi = (\psi_{pi} - \varphi_{pi}) - (\psi_{pi} - \varphi_{pi}) = (90^\circ - 46^\circ) - (30^\circ - 46^\circ) = \psi_{pi} - \psi_{pi} = 60^\circ$. Если сохранить результаты табл.5,стр.5, то $\Psi = 54^\circ$. Вероятно, угол 60° является оптимальным для схемы рис.4, когда в цепь пусковой обмотки включается резистивный элемент, а сама обмотка статора подключается к однофазной сети через ПЧ. Непосредственные включения в однофазную сеть конденсаторного двигателя оптимальный угол, при определенной величине емкостного сопротивления - равен 90° . Векторная диаграмма при равенстве токов и мощностей фаз приведена на рис.11.

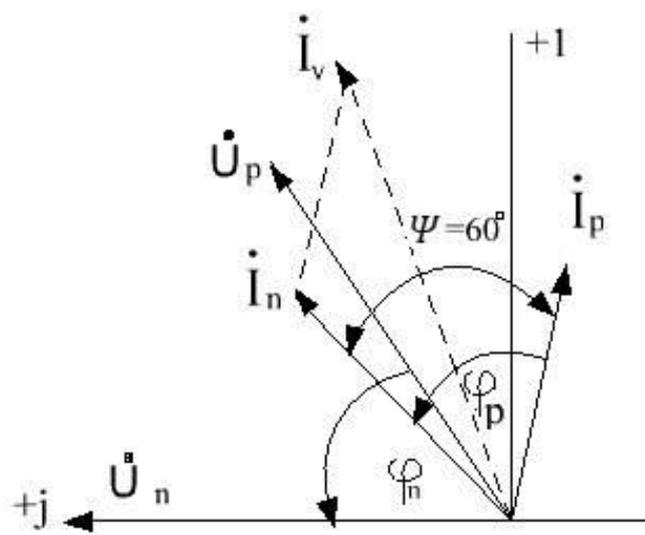


Рис. 11. Векторная диаграмма: $I_n = I_p$, $P_p = P_n$

В заключение предлагается теоретически обосновать оптимальную величину активного сопротивлений ФЭ и провести подтверждающие опыты, близкие к номинальной нагрузке.

Таблица обозначений

Обозначение	Наименование обозначения
$+↺$	Положительное направление вращения векторов (против часовой стрелки)
U_c, U, U_n	Напряжение сети, текущее и номинальное напряжения, В
U_ϕ	Напряжение на фазосмещающем элементе (ФЭ), В
U_-, I_-	Напряжение и ток электромагнитного тормоза (В, А)
$I_c, I_{пч}$	Токи двигателя (от сети) и преобразователя частоты (ПЧ), А
I_p, I_π	Токи рабочей и пусковой обмоток, А
$\tilde{S} = \dot{U}\dot{I} =$ $= UIe^{j\psi_u}e^{-j\psi_i} =$ $= se^{j\varphi}, \quad \tilde{S} = UI$	Комплексная и полная мощности, ВА
$\tilde{S} = P \pm jQ$	Комплексная (ВА), активная (Вт), реактивная (вар) мощности
$Q = e^{\pm j90} = \pm jQ$	Реактивная (индуктивная и емкостная) мощность, вар
$P_- = U_- I_-$	Мощность электромагнитного тормоза, Вт
P_p, P_π	Активные мощности рабочей и пусковой обмоток, Вт
P_c, P	Мощность двигателя от сети и текущая мощность, 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, Вт
$P_{рмг}, P_{пм}$ M_Γ, m_Γ	Мощность магнитных потерь, рабочей и пусковой обмоток, Вт
$p_{пэл} = r_{п1} I_\pi,$ $p_{рэл} = r_{р1} I_p^2$	Электрические потери рабочей и пусковой обмоток, Вт
z_p, z_π $r_p, r_\pi; x_p, x_\pi$	Полные активные и индуктивные сопротивления рабочей и пусковой обмоток, Ом
$Z = ze^{j\varphi} = z(\cos\varphi +$ $j\sin\varphi) = r + jx$ $Z = \sqrt{r^2 + x^2}$	Комплексное сопротивление (экспоненциальная, тригонометрическая и алгебраическая форма записи), Ом полное сопротивление (модуль), Ом
$r_{p1}, r_{\pi1}, x_{p1}, x_{\pi1}$	Активные и индуктивные сопротивления рабочей и пусковой обмоток, Ом
$r_0, r_{p0}, r_{\pi0}$	Активные сопротивления, обусловленные магнитными потерями в стали, Ом
R, X_c, Z_ϕ	Активное, емкостное и комплексное сопротивление ФЭ, Ом
C_p, C_π	Рабочая и пусковая емкости в цепи пусковой обмотки, Ф

n, n_H, n_0	Текущая, номинальная частота и частота холостого хода вращения ротора, (об/мин, мин^{-1})
$\varphi = \psi_u - \psi_i$	Угол сдвига фаз – алгебраическая разность начальных фаз напряжения и тока, град
$\Psi = \psi_{in} + \psi_{ip}$	Угол смещения векторов тока рабочей и пусковой обмоток, (алгебраическая сумма), град
ХХ, КЗ	Режим холостого хода и короткого замыкания (ротор двигателя заторможен)
C1 – C2 C3 – C4	Начало и конец фаз рабочей и пусковой обмоток однофазного двигателя

Библиографический список

www.chastotniki.ru www.ids-drive.ru

преобразователи частоты IDS-Drive. Серия «С».

www.invertekdrive.com.

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

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

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

Оглавление

Введение.....	0
1. Управление скоростью вращения однофазных двигателей.....	1
1.1 Конденсаторный двигатель (КД).....	1
1.2. Способы регулирования	2
1.3. Частотное регулирование	2
1.4 Типовая схема ПЧ	5
2. Экспериментальное исследование однофазного асинхронного двигателя...	6
2.1 Подключение двигателя к ПЧ.....	6
2.2 Режим холостого хода	8
2.3. Рабочий режим двигателя	9
2.4. Зависимость параметров двигателя от сопротивления ФЭ	12
Обозначения.....	17
Библиографический список.....	18