

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

ДЕПАРТАМЕНТ ОБРАЗОВАНИЯ, НАУКИ И КАДРОВ

**БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ
АКАДЕМИЯ**

**Кафедра механизации животноводства
и электрификации сельскохозяйственного производства**

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ УЛУЧШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО КОРТОКОЗАМКНУТОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ
ПО ДИСЦИПЛИНЕ «ЭЛЕКТРОПРИВОД И АВТОМАТИЗАЦИЯ
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ ТЕХНИКИ»**

**Для студентов специальностей
1-74 06 01 – техническое обеспечение процессов
сельскохозяйственного производства,
1-74 06 06 – материально-техническое обеспечение АПК
и 1-74 06 04 – техническое обеспечение мелиоративных
и водохозяйственных работ**

Горки 2002

Составили И.А. ГАЙШУН, И. В. ДУБЕНЬ.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Цель и порядок выполнения работы	3
2. Объект и средства исследования	3
3. Программа подготовки к выполнению рабочего задания	4
4. Рабочее задание	4
5. Методические указания по выполнению рабочего задания и обработке результатов эксперимента	6
6. Контрольные вопросы	8
7. Основные положения по исследованию способов улучшения коэффициента мощности электродвигателя	8
Литература	15

УДК 631.171 : 636 (072)

Исследование способов улучшения коэффициента мощности трехфазного асинхронного короткозамкнутого электродвигателя: Методические указания / Белорусская государственная сельскохозяйственная академия; Сост. И.А. Г а й ш у н, И. В. Д у б е н ь. Горки, 2002. 16 с.

Изложен порядок выполнения лабораторной работы при изучении дисциплины «Электрооборудование и средства автоматизации сельскохозяйственной техники». Приведена форма отчета, методика обработки опытных данных и основные положения по исследованию способов улучшения коэффициента мощности электродвигателя.

Для студентов специальностей 1-74 06 01 – техническое обеспечение процессов сельскохозяйственного производства, 1-74 06 06 – материально-техническое обеспечение АПК и 1-74 06 04 – техническое обеспечение мелиоративных и водохозяйственных работ.

Таблиц 1. Рисунков 4. Библиогр. 3.

Рецензент ст. преподаватель А.И. БЕЛОВ.

©Составление. И.А. Гайшун, И.В. Дубень, 2002

©Белорусская государственная сельскохозяйственная академия, 2002

1. ЦЕЛЬ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Целью работы является изучение факторов, влияющих на коэффициент мощности электроустановок, исследование способов компенсации реактивной мощности асинхронного электродвигателя путем рациональной загрузки и с помощью батареи статических конденсаторов. При выполнении лабораторной работы необходимо:

1. Ознакомиться с основными паспортными данными испытуемого электродвигателя и измерительных приборов;

2. Собрать электрическую схему лабораторной установки (с ее проверкой для снятия коэффициента мощности электродвигателя;

3. Опытным путем снять данные для определения коэффициента мощности при измерении нагрузки на валу двигателя и подключении батареи статических конденсаторов;

4. Определить емкость и мощность трехфазной батареи статических конденсаторов для компенсации коэффициента мощности реактивной мощности до определенной величины;

2. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

На рабочем месте расположена установка, в которой объектом исследования является агрегат, состоящий из асинхронного короткозамкнутого электродвигателя, генератора постоянного тока с параллельным возбуждением и являющимся нагрузкой для испытуемого электродвигателя, а также батарея статических конденсаторов. Загрузка электродвигателя регулируется лампами накаливания.

Основные технические данные электродвигателя: тип – АИР80А6УЗ, номинальная мощность – 7,5 кВт; соединение фаз – треугольник / звезда; номинальное напряжение – 220/380 В; номинальный ток – 3,9 / 2,3 А; номинальный коэффициент полезного действия $\eta_n = 70\%$, номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_n = 0,72$; частота вращения $n_n = 920$ об/мин, класс изоляции F. Генератор с самовозбуждением имеет следующие паспортные данные: тип – П21, $P_n = 0,5$ кВт;

$U_n = 220 \text{ В}$, $I_n = 3,3 \text{ А}$, $n_n = 930 \text{ об/мин}$. Батарея статических конденсаторов содержит три конденсатора емкостью по 20 мкФ на рабочее напряжение $U_p = 500 \text{ В}$.

Средствами исследования служат: комплект измерительный К505 электромагнитной системы, включающий амперметр, вольтметр и ферродинамической ваттметр со следующими пределами измерения (без трансформатора): по напряжению – $30...60 \text{ В}$, по току – $0,5...10 \text{ А}$, по мощности – $10...4000 \text{ Вт}$; вольтметр V2 типа 359 электромагнитной системы с пределами измерения $75, 150, 300 \text{ и } 600 \text{ В}$; амперметр А2 типа Э59 электромагнитной системы с пределами измерения $2,5 \text{ и } 5 \text{ А}$; лампы накаливания HL1...HL4 мощностью по 220 Вт на напряжение $245...255 \text{ В}$; пускатель КМ нажимной вибростойкий серии ПНВ для подключения батареи статических конденсаторов на напряжение 500 В и переменный ток $12,5 \text{ А}$; тахометр ТЧ 10–Р часового типа с пределом измерения 10000 об/мин ; установочные выключатели SA1...SA4 на напряжение 500 В и ток 6 А .

3. ПРОГРАММА ПОДГОТОВКИ К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

1. Изучить необходимые разделы в рекомендуемой литературе [3, с. 145...147], [8, 4.2. с. 199...201], [7, с. 145...148].
2. Записать формулы, необходимые для расчета полной S и реактивной Q мощностей электродвигателя, коэффициентов активной $\cos \varphi$ и реактивной $\sin \varphi$ мощности, активного I_a и реактивного I_p токов электродвигателя, мощности генератора $P_{ген}$.

4. РАБОЧЕЕ ЗАДАНИЕ

1. Начертить принципиальную электрическую схему лабораторной установки (рис. 1) и таблицу результатов опытов.
2. Зарисовать паспортную табличку электродвигателя и проанализировать его паспортные данные. Записать паспортные величины и характеристики средств исследования.
3. С помощью монтажных проводников собрать цепь в соответствии со схемой (рис. 1) и подсоединить ее к силовому настенному щиту с линейным напряжением 380 В .
4. После разрешения преподавателя включить установку в сеть, затем приступить к определению коэффициента мощности электродви-

гателя при изменении его загрузки и подключении батареи статических конденсаторов.

5. Изменяя нагрузку электродвигателя, снять показания контрольно-измерительных приборов, начиная с холостого хода (лампы накаливания не включены) и постепенно увеличивая количество включенных ламп накаливания с помощью выключателей SA1...SA4 до их полного включения. Опыты выполнить без включения емкости и с ней. Результаты измерений (фазное напряжение U_ϕ по вольтметру PV1, линейный ток I по амперметру PA1, фазную мощность электродвигателя P_ϕ , частоту вращения вала электродвигателя по тахометру, напряжение постоянного тока $U_{пос}$ по вольтметру PV2, силу постоянного тока по амперметру PA2) занести в таблицу.

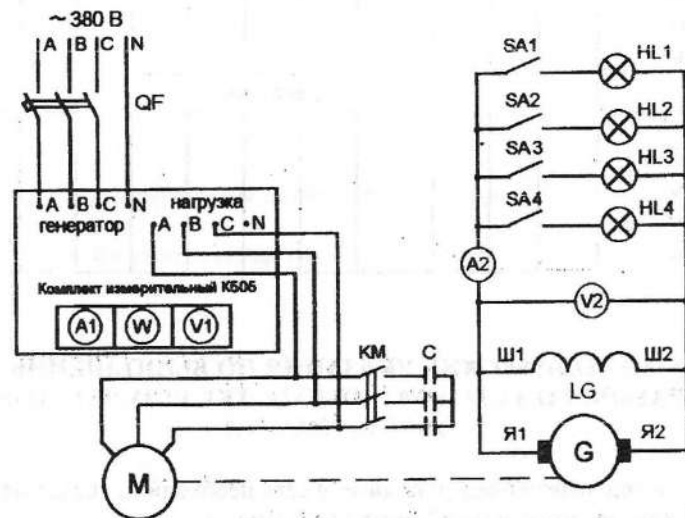


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки.

4. Исходя из результатов проведенных опытов, вычислить и записать в таблицу следующие величины: полную мощность электродвигателя S , коэффициент мощности $\cos \varphi$, реактивную мощность электродвигателя Q , активный I_a и реактивный I_p токи электродвигателя, мощность генератора $P_{ген}$.

5. По полученным данным построить зависимости $\cos \varphi = f(P_{ген})$ без емкости и с включенной емкостью. Объяснить характер изменения построенных кривых.

6. Определить емкость и мощность трехфазной батареи статических конденсаторов для полной компенсации реактивной мощности.

Результаты исследования коэффициента мощности электродвигателя

Нагрузка	Измерения				Вычисления							
	U_ϕ	I	P_ϕ	n	$U_{\text{пост}}$	$I_{\text{пост}}$	S	$\cos \varphi$	Q	I_a	I_p	$P_{\text{ген}}$
	В	А	Вт	об/мин	В	А	В·А	—	вар	А	А	Вт
Без емкости ($I_c = 0$)												
Холостой ход												
1 лампа												
2 лампы												
3 лампы												
4 лампы												
С емкостью												
Холостой ход												
1 лампа												
2 лампы												
3 лампы												
4 лампы												

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Перед включением установки в сеть необходимо убедиться в надежности соединения монтажных проводников.

2. При работе с электроустановкой необходимо соблюдать правила техники безопасности и эксплуатации электроустановок потребителей.

3. При измерениях следить за показаниями приборов и не перегружать их.

4. По данным опытов вычислить и записать в таблицу значения следующих величин:

– полная мощность электродвигателя

$$S = 3 U_\phi I,$$

где U_ϕ – фазное напряжение, В;

I – линейный ток, А;

– коэффициенты активной и реактивной мощности

$$\cos \varphi = 3P_\phi/S; \quad \sin \varphi = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi},$$

где P_ϕ – активная мощность одной фазы, Вт;

Q – реактивная мощность электродвигателя

$$Q = S \cdot \sin \varphi;$$

– активный I_a и реактивный I_p токи фазы двигателя

$$I_a = I \cdot \cos \varphi; \quad I_p = I \cdot \sin \varphi;$$

– мощность генератора

$$P_{\text{ген}} = U_{\text{пост}} \cdot I_{\text{пост}},$$

где $U_{\text{пост}}$, $I_{\text{пост}}$ – показания вольтметра и амперметра постоянного тока, В, А;

– мощность батареи статических конденсаторов

$$Q_c = P (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2),$$

где P – активная мощность электродвигателя, Вт;

$\operatorname{tg} \varphi_1$, $\operatorname{tg} \varphi_2$ – соответственно тангенсы угла сдвига фаз до и после установки компенсирующего устройства (батареи статических конденсаторов);

– емкость батареи статических конденсаторов

$$3C = \frac{Q_c \cdot 10^9}{2\pi f U^2},$$

где $U = 220$ В – напряжение на фазе конденсатора, В.

5. При построении кривых изменения мощности в зависимости от нагрузки $\cos \varphi = f(P_{\text{ген}})$ по оси абсцисс следует откладывать мощность генератора в относительных единицах $P_{\text{ген}}/P_{\text{н.ген}}$, а по оси ординат – соответствующее значение коэффициента мощности $\cos \varphi$.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое коэффициент мощности и как он влияет на режим работы электрооборудования и системы энергоснабжения?
2. Указать, какое значение имеет улучшение коэффициента мощности для народного хозяйства.
3. Какие условия влияют на величину коэффициента мощности асинхронного электродвигателя?
4. Перечислить и пояснить способы повышения коэффициента мощности.
5. Построить по опытным данным векторную диаграмму токов с учетом компенсации сдвига фаз (с включенной емкостью) и показать углы сдвига фаз на ней.
6. Как определить мощность и емкость трехфазной батареи статических конденсаторов для компенсации реактивной мощности?

7. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ИССЛЕДОВАНИЮ СПОСОБОВ УЛУЧШЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Коэффициент мощности асинхронного электродвигателя и электроустановки в целом равен отношению активной мощности P к полной мощности S (кВт/кВА). Он представляет собой второй после к.п.д. показатель экономичности электроустановки. Когда установка питается строго синусоидальным напряжением, то значение коэффициента мощности равно $\cos \varphi$ – косинусу угла сдвига между током I и напряжением U . В остальных случаях $\cos \varphi$ относится только к основной гармонике напряжения, и значения коэффициента мощности и $\cos \varphi$ не будут совпадать.

Мощность, которая берется от электрических сетей и преобразуется в другие виды мощностей (механическую, тепловую, световую и др.), в цепях переменного тока называется активной мощностью. Ее значение при синусоидальном изменении напряжения

$$P = U \cdot I_a = U \cdot I \cdot \cos \varphi.$$

Если угол сдвига фаз φ равен нулю, то источник энергии дает ток, равный активному току потребителя I_a (рис. 2). Однако в реальных электрических цепях ток не совпадает по фазе с напряжением ($\varphi \neq 0$), и в зависимости от вида реактивных сопротивлений отстает от него

($\varphi > 0$) или опережает ($\varphi < 0$). При одной и той же активной мощности P потребитель берет из сети ток I , превышающий значение активного тока I_a .

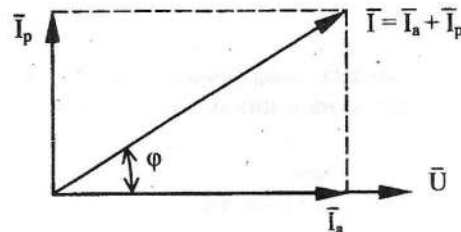


Рис. 2. Векторная диаграмма токов при индуктивном характере нагрузки ($\varphi > 0$).

В результате большого угла сдвига фаз между током и напряжением источник тока может оказаться полностью загруженным даже при незначительной активной мощности потребителя.

Электрические машины, трансформаторы и другие электротехнические устройства рассчитывают на определенный номинальный ток I_n , обусловленный нагревом проводников этих устройств. Наибольшая активная мощность этих устройств возможна при равенстве коэффициента мощности единице ($\cos \varphi = 1$), тогда

$$P_n = S_n = U_n \cdot I_n,$$

что соответствует наиболее благоприятным условиям для работы электроустановки.

Низкий коэффициент мощности отрицательно сказывается на электроснабжении потребителей, так как реактивный ток $I_p = I \cdot \sin \varphi$ непроизводительно загружает электрическую сеть, генераторы и трансформаторы, вызывая в них дополнительные потери на нагревание:

$$P_{\text{потерь}} = I^2 R_0 / \cos^2 \varphi = (I_a + I_p) R_0 / \cos^2 \varphi,$$

где R_0 – сопротивление источника тока, линии электропередач и подводящих проводников.

Поэтому при проектировании и эксплуатации сетей с пониженным коэффициентом мощности с целью сокращения потерь приходится идти на уменьшение значения R_0 , что связано с увеличением сечения проводов, металлоемкости электроустановок и опор линий электропередач. Во избежание вышесказанного, согласно ПУЭ, все потребители должны иметь коэффициент мощности не ниже нормативного значения 0,93...0,95.

Коэффициент мощности асинхронного электродвигателя зависит от отношения $\lambda = Q / P$ намагничивающей реактивной мощности электродвигателя Q (Вар) к активной P (Вт):

$$\cos \varphi = \sqrt{1 / L + \lambda^2}.$$

Реактивная мощность Q , требуемая для намагничивания воздушного зазора, пропорциональна напряжению на зажимах электродвигателя и намагничивающему току:

$$Q = U \cdot I_p, \text{ Вар.}$$

С другой стороны,

$$Q = B V f = B D L q f = D L q f,$$

где B – наибольшая принятая в расчете индукция;

V – объем воздушного зазора;

D – диаметр расточки статора;

L – осевая длина статора;

q – радиальный размер воздушного зазора;

f – частота тока питающей сети.

Активная мощность электродвигателя, идущая на полезную работу

$$P = B D^2 L n = D^2 L n, \text{ Вт,}$$

тогда

$$\lambda = \frac{Q}{P} = \frac{D L q f}{D^2 L n} = \frac{q f}{D n} = \frac{q p}{D},$$

где n – число оборотов вала двигателя в минуту;

p – число пар полюсов статора.

Для повышения коэффициента мощности необходимо ограничить величину λ , поэтому величина зазора q выбирается возможно малой, насколько это позволяют механические соображения, возможности зубцовых гармоник и требования к бесшумности двигателя. Таким образом, значение λ зависит только от отношения p / D . Среди машин с одинаковым числом пар полюсов p лучший коэффициент мощности будут иметь электродвигатели с наибольшим диаметром D и наименьшей мощностью. Так как отношение λ не зависит от частоты f , то при заданной мощности двигателя наилучший $\cos \varphi$ будет у электро-

двигателя с наименьшим числом полюсов p , имеющего наибольшую скорость вращения вала.

Рассмотрим условия эксплуатации, вызывающие изменения коэффициента мощности. Значение $\cos \varphi$ существенно зависит от нагрузки (рис. 3). Если нагрузка отсутствует, то электродвигатель потребляет незначительную активную мощность P , практически равную постоянным потерям, и значительную реактивную мощность Q , расходуемую в основном на создание главного магнитного поля машины. Магнитное поле машины складывается из двух взаимно неподвижных полей статора и ротора, вращающихся в пространстве с одинаковой скоростью. Значение $\cos \varphi$ при этом мало ($\cos \varphi = 0,09 \dots 0,18$).

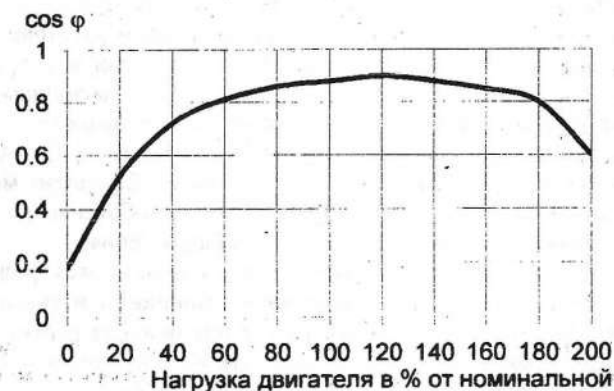


Рис. 3. Изменение $\cos \varphi$ асинхронного электродвигателя в зависимости от нагрузки (примерная кривая).

С ростом нагрузки потребление реактивной мощности вначале изменяется незначительно, так как мощность главного магнитного поля несколько снижается из-за уменьшения намагничивающегося тока, а мощность полей рассеивания статора увеличивается незначительно. Магнитные линии поля рассеивания статора сцеплены только с проводниками обмотки статора, а линии поля рассеивания ротора – только с проводниками обмотки ротора. Они замыкаются главным образом по воздуху, при этом коэффициент мощности возрастает. Максимальное значение $\cos \varphi = 0,70 \dots 0,92$ достигается при номинальной нагрузке или даже при небольшой перегрузке. При дальнейшем увеличении нагрузки реактивная мощность потоков рассеивания статора и ротора увеличивается в большей степени, чем активная мощность, так как

скольжение увеличивается, и ротор все больше и больше отстает от вращающегося магнитного поля статора. Значение $\cos \varphi$ при этом уменьшается.

Частую снижение коэффициента мощности вызвано неправильным ремонтом асинхронных электродвигателей. При одностороннем износе подшипников, ведущем к снижению нормальных размеров воздушного зазора и «прилипанию» ротора, иногда прибегают к обточке ротора или расточке статора. При включении отремонтированного двигателя в работу снижение значения $\cos \varphi$ вызвано увеличением воздушного зазора q и соответствующим возрастанием тока намагничивания.

Также ухудшается коэффициент мощности вследствие неправильной перемотки электродвигателя. Если в пазы статора уложить меньшее количество витков, чем предусмотрено заводом-изготовителем, то для создания требуемого магнитного потока при одном и том же питающем напряжении потребуется больший ток намагничивания, что вызывает относительное увеличение реактивной мощности.

На значении коэффициента мощности сказываются колебания напряжения сети. При повышении напряжения коэффициент мощности ухудшается, при понижении – улучшается. Это объясняется увеличением тока намагничивания с повышением напряжения.

Номинальное значение коэффициента мощности электродвигателя соответствует его номинальной активной мощности и указывается в паспорте. При выборе электродвигателя для привода рабочих машин необходимо весьма тщательно определять их требуемую мощность и использовать электродвигатели, имеющие наиболее высокий номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi_n$, отдавая предпочтение двигателям высокоскоростным на подшипниках качения.

Поскольку естественные значения коэффициента мощности предприятий, как правило, значительно ниже нормативных, необходимо принятие мер по их увеличению. Мероприятия по повышению коэффициента мощности эксплуатируемых установок потребителей разделяются на две группы.

К первой группе относятся мероприятия, не требующие компенсирующих устройств и целесообразные во всех случаях:

- правильный подбор электродвигателей и трансформаторов по мощности и типу;

- упорядочение технологического процесса с целью повышения степени использования производительности оборудования и мощности электродвигателей (не менее 75% номинальной мощности);

- устранение холостой работы асинхронных двигателей и электросварочных установок путем широкого применения ограничителей холостого хода, если продолжительность межоперационного периода превышает 10 с;

- замена малозагруженных электродвигателей электродвигателями меньшей мощности с более высоким значением $\cos \varphi_n$;

- использование синхронных электродвигателей вместо асинхронных, если это возможно по условиям технологического процесса (например, для нерегулируемых электроприводов с постоянным режимом работы) или по технико-экономическим соображениям;

- замена трансформаторов менее мощными или их временное отключение при загрузке в среднем менее чем на 30% их номинальной мощности;

- рационализация графиков работы трансформаторных подстанций и преобразователей;

- переключение обмоток двигателя с треугольника на звезду, что ведет к уменьшению напряжения на фазу в $\sqrt{3}$ раз и соответствующему снижению токов намагничивания и реактивной мощности. Эта мера особенно эффективна при малых нагрузках;

- повышение качества ремонта электрооборудования.

Ко второй группе относятся мероприятия, связанные с использованием компенсирующих устройств:

- использование статических конденсаторов;

- применение синхронных генераторов и электродвигателей в качестве конденсаторов, которые при работе вхолостую дают опережающий ток ($\varphi < 0$) и имеют запас по возбуждению, что применяется только для улучшения коэффициента мощности.

Для определения экономичности выбранного варианта компенсирующих устройств необходимо сопоставлять разницу в первоначальных затратах и в прямых ежегодных расходах, связанных с его эксплуатацией.

Так как на подавляющем большинстве предприятий потребляемый ток имеет индуктивный характер ($\varphi > 0$), то в качестве радикальной меры для повышения коэффициента мощности рекомендуется установка статических конденсаторов параллельно электрическим машинам. Этот способ в условиях сельского хозяйства является наиболее простым и удобным, так как конденсаторы обладают незначительными потерями (0,3...1,0% от их реактивной мощности), мало подвержены износу, бесшумны, просты и удобны в обслуживании, легко могут быть подобраны на различную мощность.

Данный способ применен и в нашей лабораторной работе, где батарея статических конденсаторов включена параллельно зажимам стартовых обмоток электродвигателя.

Использование конденсаторов для улучшения коэффициента мощности основано на том, что воспринимаемый ими ток опережает напряжение на угол $\varphi_c = 90^\circ$ (рис. 4), уменьшая индуктивную составляющую тока. Это свойство конденсаторов используется для того, чтобы по возможности разгрузить генераторы, трансформаторы и провода сети от токов намагничивания, отстающих от напряжения на угол, близкий к 90° . Конденсаторная батарея рядом с потребителем создает колебательный контур, емкость которого запасает электрическую энергию в ту часть периода, когда магнитное поле индуктивности уменьшается. Не потребляя запасенной энергии, в следующую часть периода конденсаторы возвращают ее в виде энергии магнитного поля. Реактивная мощность доставляется к потребителю уже не от источника питания, находящегося на значительном расстоянии, а от расположенных рядом конденсаторов. При этом линия освобождается от реактивных токов.

Чтобы уменьшить емкость конденсаторной батареи при той же реактивной мощности, конденсаторы включают не в звезду, а в треугольник, так как в этом случае напряжение на фазе увеличивается в $\sqrt{3}$ раз, вследствие чего мощность конденсаторной батареи возрастает в три раза.

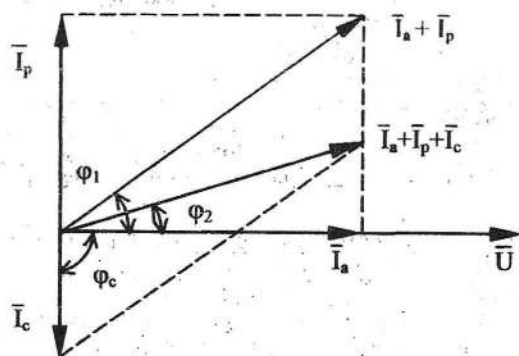


Рис. 4. Векторная диаграмма токов с учётом компенсации сдвига фаз.

Конденсаторы устанавливают для индивидуальной и для групповой компенсации. Для сельскохозяйственных установок рекомендуется групповая компенсация, когда конденсаторная батарея обслуживает

все установки одной технологической линии. С момента отключения конденсаторов они должны разряжаться на параллельно подключенные конденсаторам резисторы, в качестве которых обычно используются электрические лампы накаливания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гейлер Л.Б. Основы электропривода. – М.: Высшая школа, 1972.
2. Москаленко В.В. Автоматизированный электропривод. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
3. Фокин В.В. Практикум по электрооборудованию сельскохозяйственного производства. – М.: Агропромиздат, 1991.