

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Цель работы: изучить способы компенсации реактивной мощности и влияние конденсаторов на коэффициент мощности асинхронного двигателя.

2.1. Способы компенсации реактивной мощности

Реактивная мощность в электроустановках появляется от действия намагничивающего тока асинхронных двигателей (60–65 % общей реактивной мощности), трансформаторов (20–25 %), индуктивности воздушных ЛЭП, реакторов, вентильных преобразователей и других устройств (10 %). В зависимости от характера применяемого электрооборудования реактивная мощность может быть большой и составлять 130 % активной полезной мощности. Это приводит к возникновению дополнительных потерь энергии во всех элементах системы внешнего и внутреннего электроснабжения предприятия.

Например, для элемента с сопротивлением R мощность потерь в нем составит

$$\Delta P = I^2 \cdot R = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot R = \Delta P_a + \Delta Q_p.$$

Прохождение реактивной мощности, пульсирующей между источниками питания и электроприемниками, сопровождается увеличением тока. Это вызывает дополнительные затраты на увеличение сечений проводников сетей и мощностей трансформаторов, создает дополнительные потери электроэнергии.

От реактивного тока возникает дополнительное падение напряжения в проводах ЛЭП и трансформаторах, которое снижает напряжение на электроприемнике. При питании активно-индуктивной нагрузки через элемент сети с активным сопротивлением R и реактивным X падения напряжения составят

$$\Delta U = \frac{P \cdot R + Q \cdot X}{U} = \frac{P \cdot R}{U} + \frac{Q \cdot X}{U} = \Delta U_a + \Delta U_p$$

где ΔU_a и ΔU_p – падения напряжения, обусловленные соответственно активной и реактивной мощностью.

Дополнительное падение напряжения ΔU_p увеличивает отклонение напряжения на зажимах приемника от номинального при изменениях нагрузок и режимов осветительной сети и приводит к понижению вращающих моментов двигателей, уменьшению светоотдачи осветительными приборами и т.д.

Вследствие этого, важное значение имеет компенсация реактивных нагрузок и повышение коэффициента мощности в системах электроснабжения промышленных предприятий.

Существует два пути снижения реактивных нагрузок:

1. Установка специальных компенсирующих устройств (**искусственная компенсация**);
2. Снижение реактивной мощности самих приемников электроэнергии (**естественная компенсация**).

Естественная компенсация реактивной мощности не требует больших материальных затрат и должна проводиться на предприятии в первую очередь.

К мероприятиям по естественной компенсации реактивной мощности относятся:

- упорядочение технологического процесса, ведущее к улучшению энергетического режима оборудования и выравниванию графика нагрузки, что включает в себя равномерное размещение нагрузок по фазам, смещение времени обеденных перерывов отдельных цехов и участков и перевод энергоемкого оборудования в часы минимума нагрузки электрических сетей;
- создание рациональной схемы электроснабжения за счет уменьшения количества ступеней трансформации;
- замена устаревшего электрооборудования на новое с меньшими потерями на перемагничивание;
- замена малозагруженных трансформаторов и электродвигателей меньшими по мощности или их полная загрузка;
- применение синхронных двигателей вместо асинхронных, когда это допустимо по условиям технологического процесса;
- сокращение длительности и рассредоточение по времени пуска крупных электроприемников;
- отключение при малой нагрузке части силовых трансформаторов.

Под искусственной компенсацией понимается установка местных источников реактивной мощности, благодаря которым повышается пропускная способность сетей и трансформаторов, а также уменьшаются потери электроэнергии. В качестве таких источников могут использоваться конденсаторные установки.

Конденсаторной установкой (КУ) называют электроустановку, состоящую из конденсаторов и относящегося к ней вспомогательного оборудования. К этому оборудованию относят выключатели, разъединители, разрядные сопротивления и др. КУ состоит из одной или нескольких конденсаторных батарей (два или более конденсатора, электрически соединенных между собой) или из одного или нескольких отдельно установленных конденсаторов, присоединенных к сборным шинам через отдельные коммутационные аппараты.

К преимуществам применения КУ можно отнести:

• малые удельные потери активной мощности (собственные потери современных низковольтных косинусных конденсаторов не превышают 0,5 Вт на 1000 ВАр);

- отсутствие вращающихся частей;
- простой монтаж и эксплуатация (не нужно фундамента);
- относительно невысокие капиталовложения;
- возможность подбора любой необходимой мощности компенсации;
- возможность установки и подключения в любой точке электросети;
- отсутствие шума во время работы;
- небольшие эксплуатационные затраты.

Использование комплектных конденсаторных установок позволяет:

• разгрузить питающие линии электропередачи, трансформаторы и распределительные устройства;

• снизить расходы на оплату электроэнергии;

• при использовании определенного типа установок снизить уровень высших гармоник;

• подавить сетевые помехи;

• сделать распределительные сети более надежными и экономичными;

• снизить загрузку силовых трансформаторов (при снижении потребления реактивной мощности снижается потребление полной мощности);

• обеспечить питание нагрузки по кабелю с меньшим сечением (не допуская перегрева изоляции);

• за счет частичной токовой разгрузки силовых трансформаторов и питающих кабелей подключить дополнительную нагрузку;

• избежать глубокой просадки напряжения на линиях электроснабжения удаленных потребителей;

• облегчить пуск и работу двигателя (при индивидуальной компенсации).

Установки имеют встроенные защиты от перегрузок, коротких замыканий, снижения напряжения, перегрева.

Правильный выбор мощности конденсаторных установок и их характеристик обеспечивает благоприятный режим эксплуатации электроустановок предприятия, а именно:

• токовая нагрузка на токоведущие части и коммутационную аппаратуру (автоматические выключатели, контакторы) снижается на 20–60 %;

• снижаются потери на проводниках за счет уменьшения их нагрева;

• увеличивается срок службы проводов и кабелей;

• высвобождается трансформаторная мощность;

• увеличивается срок службы трансформаторного масла;

• возрастает качество напряжения у электроприемников.

Применение конденсаторных установок позволяет снизить затраты на электроэнергию и повысить эффективность использования существующих электросетей. При выборе комплектной конденсаторной установки ККУ следует исходить из мощности, потребляемой электрооборудованием, и конкретных электрических параметров, которые следует привести в норму.

КУ присоединяют к сети через отдельный аппарат управления, предназначенный для включения или отключения только конденсаторов, или через общий аппарат управления с силовым трансформатором, асинхронным двигателем или другим электроприемником. Конденсаторные батареи могут соединяться в треугольник или звезду. Также применяется последовательное или параллельно-последовательное соединение однофазных конденсаторов в каждой фазе трехфазной батареи. Если батареи включают параллельно нагрузке, то такая компенсация называется *поперечной*, при последовательном включении – *продольной*.

Поперечную емкостную компенсацию выполняют комплектными конденсаторными установками, которые устанавливают в цехе рядом с комплектными трансформаторными подстанциями или около крупных электроприемников. КУ собирают в шкафах с аппаратурой защиты, измерения, управления и с разрядным устройством (рис. 2.1, рис. 7.3).



Рис.2.1. Комплектная конденсаторная установка

Главное назначение *продольной* компенсации – это частичная компенсация индуктивного сопротивления участков электрической сети для уменьшения потери напряжения в них.

При отключении конденсаторы сохраняют напряжение остаточного заряда, которое представляет опасность для персонала и затрудняющее работу выключателей. В связи с этим по условиям безопасности требуется включение в цепь разрядных устройств. В качестве разрядных устройств в сети 6 – 10 кВ (рис.2.2) применяют однофазные трансформаторы напряжения TV1 и TV2 типа НОМ (рис. 2.3), а в сети 380 – 660 В по той же схеме включают сопротивления. В новых конденсаторных установках применяют встроенные разрядные сопротивления внутри или снаружи бака конденсатора, которые подключаются параллельно емкости конденсаторов (рис. 2.4).

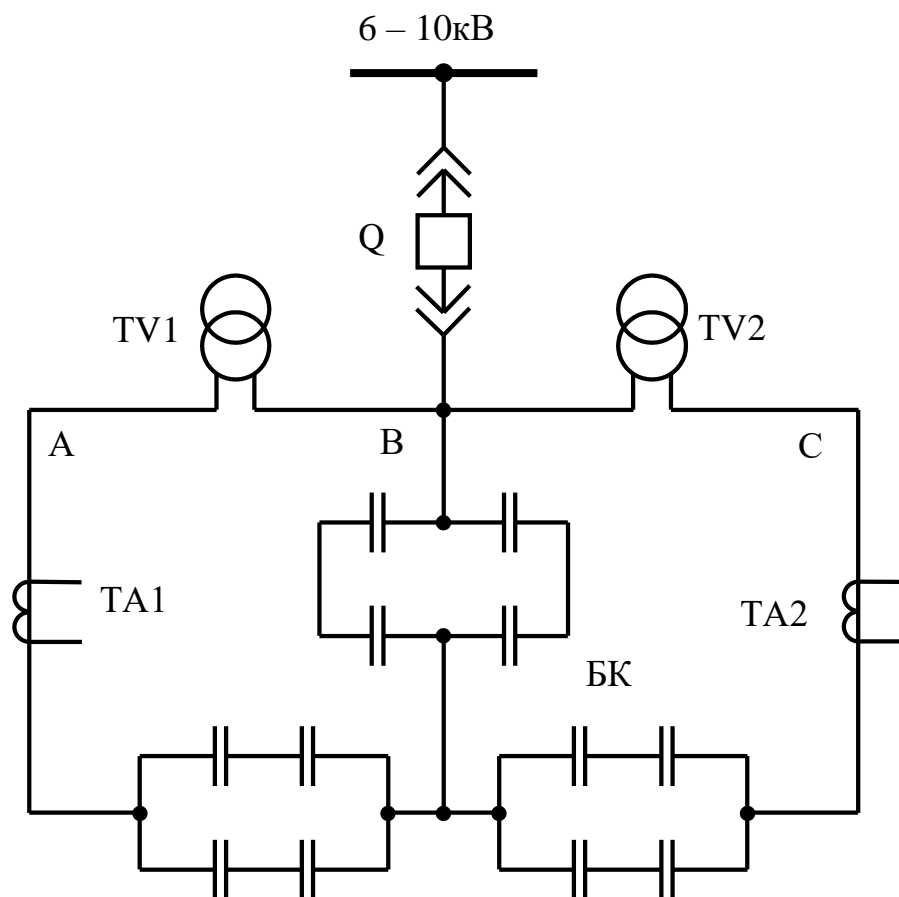


Рис. 2.2. Схема конденсаторной установки в сети 6–10кВ.



Рис. 2.3. Однофазный трансформатор напряжения марки НОМ

Компенсация реактивной мощности в распределительных сетях напряжением 0,38 (0,4) кВ может быть следующих видов:

1. *Индивидуальная* (нерегулируемая). Используется для постоянно присоединенного электрооборудования к одному распределительному устройству в течение длительного времени. Компенсирующая нерегулируемая установка подключается непосредственно у потребителя, что ведет к разгрузке подводящих проводов для отдельных, работающих в

продолжительном режиме потребителей с постоянной или относительно большой мощностью - асинхронные двигатели, трансформаторы, сварочные аппараты, разрядные лампы и т.д.

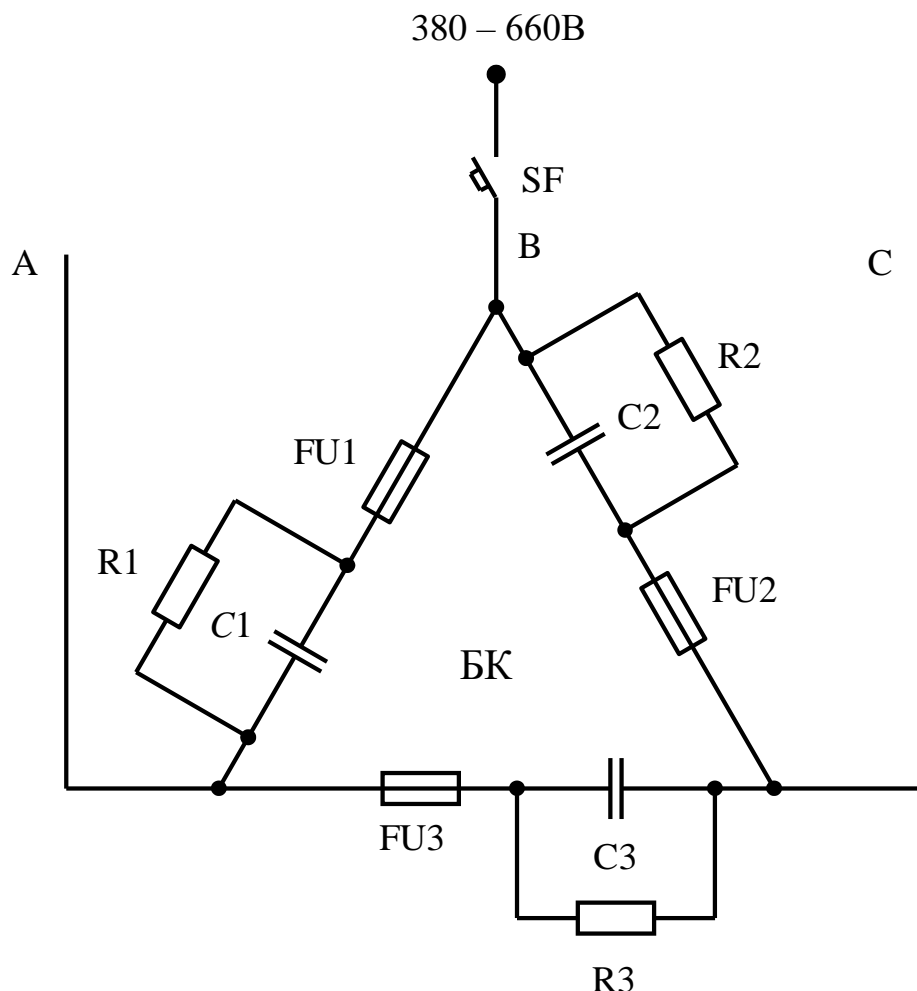


Рис. 2.4. Схема конденсаторной установки с разрядными сопротивлениями

2. *Групповая* (нерегулируемая). Аналогична индивидуальной компенсации. Применяется для нескольких одновременно работающих индуктивных потребителей. При этом подключается общий постоянный конденсатор (для находящихся вблизи друг от друга электродвигателей, групп разрядных ламп). Здесь также разгружается подводящая линия, но только до распределения на отдельных потребителей.

3. *Централизованная* (регулируемая). Применяется для систем с большим количеством электропотребителей, имеющих большой разброс коэффициента мощности в течение суток. Мощная установка с автоматическим регулированием устанавливается возле распределительного щита трансформаторной подстанции. Такая установка должна иметь все виды защит (в т.ч. защиту от высших гармоник) и достаточно высокие точность и скорость регулирования.

Автоматическое регулирование в процессе работы выполняется с помощью специального микропроцессорного регулятора реактивной мощности

и улучшает $\cos\varphi$ электросети путем отслеживания в реальном времени значений коэффициента мощности и коррекции его за счёт подключения или отключения необходимого числа батарей конденсаторов.

Регулируемые конденсаторные установки напряжением 0,4 кВ выпускаются мощностью от 10 до 400 кВАр при максимальном количестве ступеней регулирования до 12.

Регулируемая автоматическая конденсаторная установка компенсации реактивной мощности обеспечивает соблюдение требуемого коэффициента мощности с большой точностью в широком диапазоне компенсируемой мощности, а также:

- автоматически отслеживает изменение реактивной мощности нагрузки в компенсируемой сети и в соответствии с заданным значением $\cos\varphi$;
- исключается генерация реактивной мощности в сеть;
- исключается появление в сети перенапряжения, т.к. нет перекомпенсации, возможной при использовании нерегулируемых конденсаторных установок;
- визуально отслеживаются все основные параметры компенсируемой сети;
- контролируется режим эксплуатации и работа всех элементов конденсаторной установки, при этом учитывается время работы и количество подключений каждой секции, что позволяет оптимизировать износостойкость контакторов и распределения нагрузки в сети;
- предусмотрена система аварийного отключения конденсаторной установки и предупреждения обслуживающего персонала;

2.2. Коэффициент мощности

Коэффициент мощности используют для характеристики потребителя переменного тока как реактивную составляющую нагрузки. Величина этого коэффициента отражает сдвиг фазы φ переменного тока, который течет через нагрузку, по отношению к приложенному к нагрузке напряжению. По величине коэффициент мощности равен косинусу от этого сдвига. Если сила тока отстает от напряжения, то сдвиг $\cos\varphi$ считают большим нуля, если обгоняет, то $\cos\varphi < 0$.

На практике коэффициент мощности стараются сделать максимально большим. Так как при малом $\cos\varphi$ для выделения в цепи необходимой мощности надо пропускать ток большой силы, а это приводит к большим потерям в подводящих проводах (закон Джоуля — Ленца).

Коэффициент мощности учитывают при проектировании электрических сетей. Если коэффициент мощности является низким, это приводит к росту части потерь электрической энергии в общей сумме потерь. Для увеличения данного коэффициента, как уже было сказано выше, применяют компенсирующие устройства. [5]

Если изобразить графически активную, реактивную и полную мощности (рис.2.5) при работе асинхронного двигателя (трансформатора, индукционной печи и т. д.).

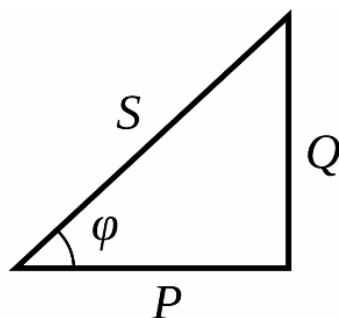


Рис. 2.5. Соотношение полной, активной и реактивной мощностей

Тогда $\cos\varphi$ можно определить как

$$\cos\varphi = \frac{P}{S},$$

где S – полная мощность, ВАР;

P – активная мощность, Вт.

Полная мощность определяется, как

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = U \cdot I,$$

где Q – реактивная мощность, ВА

С учетом вышеприведенного

$$\cos\varphi = \frac{P}{U \cdot I},$$

где U – линейное напряжение, В

I – ток, А.

При номинальном напряжении питания и при номинальной нагрузке на валу асинхронного двигателя коэффициент мощности будет равен тому значению, которое указано на его шильдике.

Современные асинхронные двигатели проектируются таким образом, что наибольший КПД достигается при загрузке на 10-15 % меньше номинальной. Двигатели рассчитываются так потому, что большинство из них в силу стандартной дискретной шкалы мощностей работают с некоторой недогрузкой. Поэтому КПД при номинальной нагрузке и коэффициенте загрузки $p_* = \frac{P}{P_n} = 0,75$ практически равны между собой.

Коэффициент мощности при той же загрузке $p_* = 0,75$ сильно отличается от коэффициента мощности при номинальной нагрузке, причем это отличие в значительной степени зависит от мощности двигателя.

При разной механической мощности на валу разной будет и активная составляющая тока статора. Так, в режиме холостого хода, то есть когда к валу

ничего не присоединено, коэффициент мощности двигателя не превысит значения 0,2. Если же нагрузку на валу начать увеличивать, то активная составляющая тока статора также будет расти, следовательно, коэффициент мощности возрастет, и при близкой к номиналу нагрузке окажется равным примерно 0,8 – 0,9. Если теперь нагрузку продолжить увеличивать, то есть нагружать вал сверх номинала, то ротор будет тормозиться, возрастет величина скольжения s , индуктивное сопротивление ротора станет вносить свой вклад, и коэффициент мощности начнет уменьшаться. Зависимость коэффициента мощности от коэффициента загрузки p_* приведена на рис.2.6. [3]

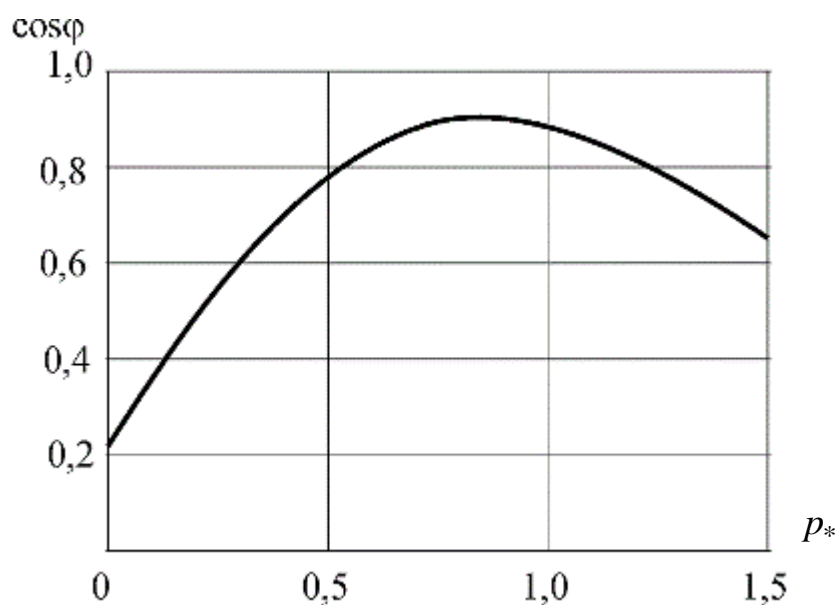


Рис.2.6. Зависимость $\cos\varphi$ от коэффициента загрузки p_* .

Ниже приведена Таблица 2.1 рекомендуемой мощности конденсаторов для индивидуальной компенсации асинхронных двигателей в зависимости от мощности асинхронного двигателя. [4]

Для сохранения нормального напряжения при максимальной нагрузке необходимо соблюдение баланса реактивных мощностей, который достигается за счет, снижения потребления реактивной мощности предприятиями от энергосистемы.

Мощность конденсатора рассчитывается исходя из выражения:

$$Q = f \cdot C \cdot U^2 \cdot 10^{-3},$$

где Q – реактивная мощность, квар;

f – частота сети, Гц;

C – емкость конденсатора, мкФ;

U – напряжение сети, В.

Таблица 2.1. Рекомендуемая мощность конденсаторов для индивидуальной компенсации реактивной мощности

Мощность двигателя	Требуемая реактивная мощность (квар)					
	л.с.	кВт	3000 об/мин	1500 об/мин	1000 об/мин	750 об/мин
0,4	0,55	-	-	0,5	0,5	-
1	0,73	0,5	0,5	0,6	0,6	-
2	1,47	0,8	0,8	1	1	-
3	2,21	1	1	1,2	1,6	-
5	3,66	1,6	1,6	2	2,5	-
6	5,15	2	2	2,5	3	-
10	7,36	3	3	4	4	5
15	11	4	5	5	6	6
30	22,1	10	10	10	12	15
50	36,8	15	20	20	25	25
100	73,6	25	30	30	30	40
150	110	30	40	40	50	60
200	147	40	50	50	60	70
250	184	50	60	60	70	80

Для сохранения нормального напряжения при максимальной нагрузке необходимо соблюдение баланса реактивных мощностей, который достигается за счет, снижения потребления реактивной мощности предприятиями от энергосистемы.

Мощность конденсатора рассчитывается исходя из выражения:

$$Q = f \cdot C \cdot U^2 \cdot 10^{-3},$$

где Q – реактивная мощность, квар;

f – частота сети, Гц;

C – емкость конденсатора, мкФ;

U – напряжение сети, В.

Индивидуальная компенсация может применяться для электроприводов, работающих в длительном режиме. Мощность конденсаторов в этом случае выбирается по реактивной мощности холостого хода.

При индивидуальной компенсации реактивной мощности электрических машин и прямом подключении конденсатора к зажимам машины емкость конденсатора не должна быть слишком большой. Конденсатор, включенный

параллельно с машиной, может выступать в качестве "источника питания" для двигателя, что приводит к сильным перенапряжениям (явление самовозбуждения). Для машин с фазным ротором емкость конденсатора следует увеличить на 5%.

Наряду с большими достоинствами (статические устройства, малые потери) конденсаторы имеют следующие недостатки:

- зависимость мощности от квадрата напряжения, что снижает устойчивость, а при особо неблагоприятных условиях может привести к лавине напряжения;
- сложность регулирования мощности;
- большие размеры при больших батареях;
- перегрев при повышении напряжения и наличии в сети высших гармоник, ведущих к выходу конденсатора из строя.

Порядок проведения работы

1. Собрать электрическую схему согласно рис.2.7 для исследования повышения коэффициента мощности с использованием батареи конденсаторов (схема индивидуальной компенсации мощности). В качестве активно-индуктивной нагрузки используется асинхронный электродвигатель М1. Подключение батареи конденсаторов производится выключателем SA1. Ваттметр W1, W2 индицирует активную трехфазную мощность, потребляемую электродвигателем.

2. Проверить с помощью тестера правильность сборки. После проверки преподавателем подать напряжение на стенд и включить автомат QF1. Произвести запуск двигателя М1 кнопкой кнопочного поста SB1. Зафиксировать показания амперметра А и трехфазных ваттметров W1, W2. Тестером измерить фазное напряжение. Данные занести в таблицу 2.2. Не отключая двигатель от сети подключить батарею конденсаторов C1 – C3 автоматическим выключателем QF2 и отметить уменьшение величины тока на амперметре А. Снять данные с амперметра и ваттметра и занести в таблицу 2.2. Отключить электродвигатель кнопкой SB2. Отключить автомат QF1 и обесточить стенд.

3. Провести вычисления $\cos\varphi$ и сравнить значения коэффициента мощности в опыте без батареи конденсаторов и с ней. Заполнить таблицу 2.2.

Расчет коэффициента мощности ведется по следующим формулам:
полная мощность

$$S = \sqrt{3} \cdot U_{\phi} \cdot I_{\phi}, \text{ ВА,}$$

коэффициент мощности

$$\cos\varphi = \frac{P}{S}.$$

Таблица 2.2. Результаты экспериментальных исследований

Опыт	U_{ϕ} , В	I_{ϕ} , А	P , Вт	S , ВА	$\cos\varphi$
Без батареи конденсаторов					
С батареей конденсаторов					

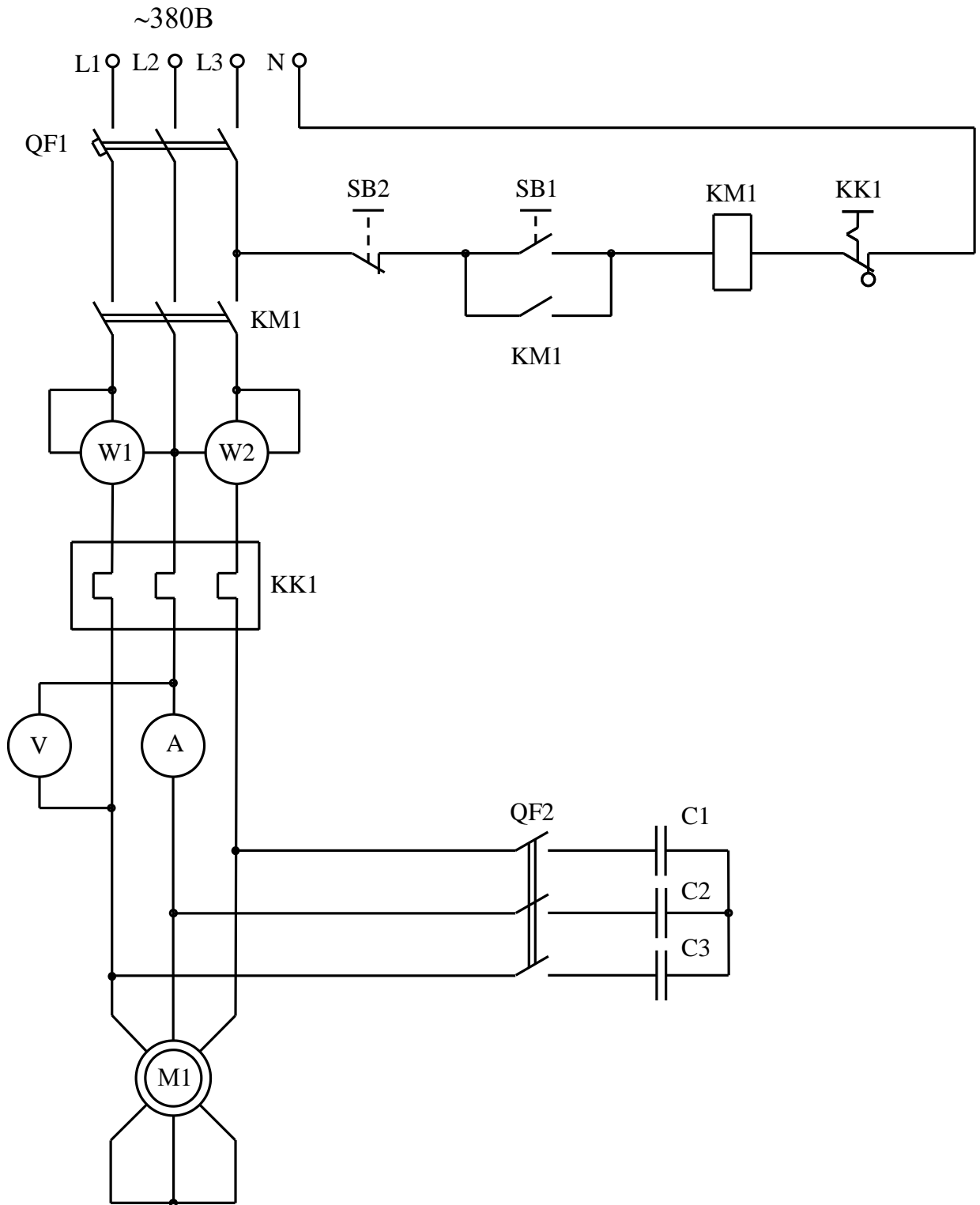


Рис. 2.7

4. По заданной преподавателем мощности асинхронного двигателя определить номинал конденсаторов, используемых для индивидуальной компенсации.

Контрольные вопросы

1. Назовите источники реактивной мощности.
2. Для чего применяют компенсацию реактивной мощности?
3. Что такое коэффициент мощности? Как рассчитать $\cos\varphi$ для асинхронного двигателя?
4. Какие устройства применяют для повышения коэффициента мощности?
5. Что такое комплектная конденсаторная установка?
6. Дайте объяснение продольной компенсации.
7. В чем отличие поперечной и индивидуальной компенсации?
8. Как определить емкость конденсатора для индивидуальной компенсации реактивной мощности для асинхронного двигателя?
9. Почему на холостом ходу двигателя очень маленький $\cos\varphi$?
10. Какие устройства применяют для разряда конденсаторов после снятия напряжения? При каких напряжениях?
11. Что такое искусственная и естественная компенсация реактивной мощности?

Список литературы

1. Кабышев А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учебное пособие / А. В. Кабышев; Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ), — Томск : Изд-во ТПУ, 2012.
2. Чернышев А. Ю. Электропривод переменного тока: учебное пособие для академического бакалавриата / А. Ю. Чернышев, Ю. Н. Дементьев, И. А. Чернышев. — Москва : Юрайт, 2018. — 215 с.
3. <http://electricalschool.info> – школа для электрика.
4. <http://ru.solverbook.com> – онлайн –сервис для учебы.
5. <https://khomovelectro.ru> – Хомов – электро. Сайт завода изготовителя КРУ.