

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет**

Кафедра электроэнергетики и электромеханики

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов магистратуры направления 13.04.02*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2021**

УДК 621.31:622 (073)

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ: Методические указания к лабораторным работам / Санкт-Петербургский горный университет. Сост. *А.Н. Скамын*. СПб, 2021. 27 с.

Лабораторные работы, выполняемые в процессе изучения дисциплины, помогают закрепить пройденный материал, помогают глубже изучить вопросы, связанные с управлением электропотреблением различных электромеханических и электротехнических комплексов. Рассмотрены вопросы изменения энергопотребления при регулировании напряжения, компенсации реактивной мощности, внедрении частотно-регулируемых электроприводов. Кроме этого, рассмотрены вопросы качества электрической энергии при внедрении полупроводниковых преобразователей энергии с целью регулирования скорости вращения машин и исполнительных механизмов, которые также играют важную роль при повышении энергоэффективности электромеханических комплексов.

Предназначены для студентов магистратуры направления 13.04.02 "Электроэнергетика и электротехника".

Научный редактор проф. *В.А. Шпенст*

Рецензент: *А.Р. Митин* (ООО «АСТЕРО»)

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2021

ВВЕДЕНИЕ

В данных методических указаниях приведены учебно-методические материалы, необходимые для изучения основных принципов выполнения мероприятий, позволяющих управлять процессом энергопотребления как электромеханических, так и электротехнических комплексов в целом.

Комплект учебного лабораторного оборудования предназначен для проведения лабораторных занятий с целью получения базовых и углубленных профессиональных знаний и навыков, связанных с внедрением энергосберегающих мероприятий и способов управления энергопотреблением на промышленных и горных предприятиях.

Перед выполнением лабораторных работ студент должен ознакомиться с инструкцией по данной лабораторной работе, заготовить необходимые таблицы для занесения в них полученных результатов.

После выполнения каждой лабораторной работы следует оформить отчет. На титульном листе отчета указываются название дисциплины, наименование лабораторной работы, фамилия, инициалы, группа и шифр студента. Текст отчета должен быть изложен аккуратно, с обязательным приведением цели занятия, исходных данных, необходимых формул, схем, единиц измерения физических величин и выводов.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 1. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

1. Цель работы – измерение параметров установившегося режима работы электрической сети; оценка влияния параметров линии и нагрузки на параметры режима сети.

2. Основные теоретические положения

Схема простейшей электрической сети, приведенная на рисунке 1.1, включает в себя источник питания – шины напряжением U , трансформатор T , линию W , на конце которой сосредоточена нагрузка P_H и Q_H .

К параметрам режима сети относятся мощности (токи) в линиях и напряжения в узлах сети. Установившийся режим характеризуется неизменностью или очень медленным изменением параметров режима.

Отдельные элементы электрической сети, например, линии электропередачи, имеют свои характеристики, которые называются параметрами сети.

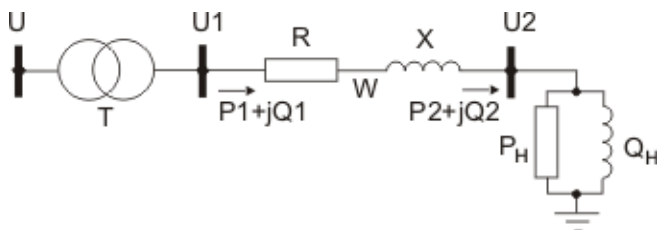


Рис.1.1. Однолинейная схема электрической сети

При переменном токе различают полное Z , активное R и индуктивное X сопротивления:

$$Z = R + jX = \sqrt{R^2 + X^2}.$$

Каждый режим электрической сети характеризуется параметрами нагрузки, под которыми подразумевают мощность, потребляемую в данный момент времени. При переменном токе различают полную S_H , активную P_H и реактивную Q_H нагрузки:

$$S_n = P_n + jQ_n = \sqrt{P_n^2 + Q_n^2}.$$

При передаче мощности от источника к нагрузке в элементах сети возникают потери напряжения, рассчитываемые по формуле:

$$\Delta U = \frac{P_n R + Q_n X}{U_{\text{ном}}},$$

где $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети. Экспериментально потери напряжения можно определить как:

$$\Delta U = U_1 - U_2,$$

где U_1 и U_2 – напряжения в начале и конце линии.

Значение U_2 может быть равно, больше или меньше номинального $U_{\text{ном}}$ – в зависимости от значений U_1 и ΔU . Для оценки отличия значений напряжения U от номинального $U_{\text{ном}}$ введено понятие отклонения напряжения δU :

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} 100, \%$$

Допустимые значения δU на зажимах электроприемников нормируются ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

Показателями качества электроэнергии, относящимися к медленным изменениям напряжения электропитания, являются отрицательное и положительное отклонения напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального значения. Положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10% номинального значения напряжения в течение 100% времени интервала в одну неделю.

Следовательно, режим электрической сети необходимо вести (регулировать) таким образом, чтобы величина δU не превышала допустимое значение.

Передача мощности от источника к нагрузке сопровождается потерями мощности и энергии в активных сопротивлениях элемен-

тов сети. Эти потери расходуются на нагрев проводников. Потери активной мощности определяются по формуле:

$$\Delta P = \frac{S_n^2}{U_{ном}^2} R = \frac{P_n^2 + Q_n^2}{U_{ном}^2} R.$$

Экспериментально потери мощности можно определить как:

$$\Delta P = P_1 - P_2,$$

где P_1 и P_2 – мощность в начале и конце линии.

Потери активной мощности в сети – это дополнительная мощность, которую необходимо выработать на электростанциях. Поэтому как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации электрических сетей важнейшей задачей является оценка величины потерь мощности сети и разработка мероприятий по их снижению. Как видно из выражения для потерь мощности, одним из мероприятий по снижению потерь мощности является повышение напряжения сети.

В выражения для потерь напряжения ΔU и потерь мощности ΔP входят как параметры нагрузки P_n и Q_n , так и параметры линии R и X . Рассмотрим соотношения этих параметров для различных сетей и видов нагрузки.

Для бытового сектора характерно соотношение $P_n \gg Q_n$, для промышленного сектора величины P_n и Q_n соизмеримы. Для кабельных линий характерно соотношение $R > X$, для воздушных линий сопротивления R и X соизмеримы.

В выполняемой лабораторной работе оцениваются:

- влияние параметров линии R и L на величину потерь напряжения ΔU в линии;
- влияние параметров нагрузки P_n и Q_n на величину потерь напряжения ΔU в линии;
- величина отклонения напряжения δU в узле подключения нагрузки и потерь мощности ΔP в линии;
- суммарный коэффициент гармонических составляющих в напряжении и токе (THD_U , THD_I).

3. Описание лабораторной модели

Физическая модель электрической сети собирается на универсальном лабораторном стенде (рисунок 1.2).

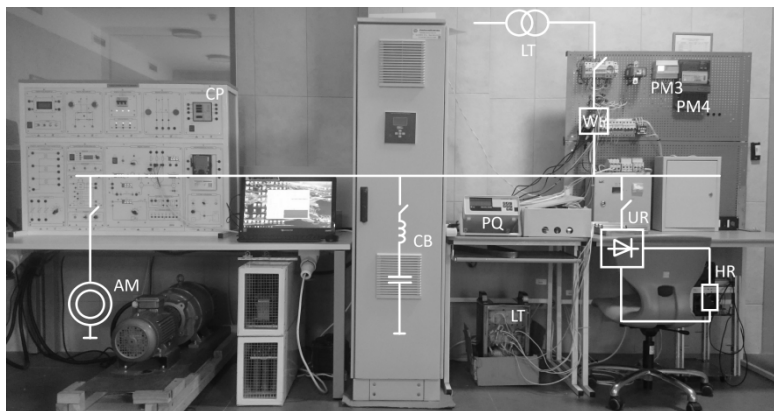


Рис.1.2. Универсальный лабораторный стенд

Для выполнения данной лабораторной работы используются следующее оборудование: трехфазный лабораторный автотрансформатор LT мощностью 20 кВА, асинхронный двигатель AM с панелью управления CP (нагрузкой является генератор постоянного тока), конденсаторную батарею с антигармоническим реактором CB, неуправляемый трехфазный выпрямитель UR с нагрузкой в виде активного сопротивления HR. Для измерения параметров электропотребления применяются счетчики электроэнергии PM и анализатор качества электроэнергии PQ.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Собрать электрическую схему, представленную на рисунке 1.1, с применением лабораторного оборудования.

4.2. Исходные данные для выполнения лабораторной работы задаются преподавателем, ведущим занятие. В соответствии с этими данными выставить параметры линии (R , L), нагрузки (R_n , Q_n) и коэффициент трансформации $K_{тр}$ трансформатора.

4.3. Показать для проверки собранную схему преподавателю (лаборанту), проводящему лабораторную работу. Подключение стенда к питающей сети лаборатории выполняет преподаватель (лаборант).

4.4. Включить выключатель трехфазного источника питания. О наличии напряжения на его выходе должен сигнализировать светодиод.

4.5. Выполнить следующие измерения. По показаниям измерительных приборов измерить напряжения в начале U_1 и конце U_2 линии W . Оценить потерю напряжения в линии. Напряжение на нагрузке U_2 должно находиться в диапазоне 198...242 В ($U_{ном} \pm 10\%$).

С помощью анализатора качества электроэнергии снять показания P_1 , P_2 и значение потерь мощности в линии ΔP . Кроме этого, оценить THD_U , THD_I . Повторить измерения U_1 , U_2 , P_1 и ΔP при очередном изменении параметров R_n , Q_n , R и L . При увеличении каждого параметра следить, чтобы напряжение на нагрузке U_2 не опускалось ниже 198 В. Фиксировать это предельное значение параметра.

Результаты измерений параметров режима электрической сети занести в таблицу 1.1, где $З$ – параметр, заданный преподавателем, $П$ – предельно возможный параметр.

Таблица 1.1

Измеренные параметры режима сети и нагрузки

| P_n , Вт | Q_n , вар | R , Ом | L , Гн | U_1 , В | U_2 , В | ΔU , В | P_1 , Вт | ΔP , Вт | THD_U % | THD_I % |
|---------------|----------------|-------------|-------------|--------------|--------------|-------------------|---------------|--------------------|--------------|--------------|
| З | З | З | З | | | | | | | |
| П | З | З | З | | | | | | | |
| З | П | З | З | | | | | | | |
| З | З | П | З | | | | | | | |
| З | З | З | П | | | | | | | |

4.6. По завершении измерений отключить источник питания и измерительные приборы.

5. Содержание отчета:

- название и цель работы;
- исходные данные;
- схема электрической сети, параметры нагрузки;
- схема подключения измерительных приборов;
- результаты измерений параметров режима сети;
- выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2. КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

1. Цель работы – изучение влияния устройств компенсации реактивной мощности (конденсаторных установок) на параметры режима электрической сети.

2. Основные теоретические положения

Значительная часть приемников электрической энергии потребляет как активную, так и реактивную мощность. Основными потребителями реактивной мощности на промышленных предприятиях являются асинхронные двигатели, трансформаторы, индукционные и дуговые печи, преобразовательные установки и др. Указанные потребители требуют реактивную мощность индуктивного характера.

Передача реактивной мощности по электрической сети вызывает дополнительные потери напряжения и мощности в ее элементах, что приводит к снижению качества электроэнергии и экономичности работы сети.

Полное или частичное покрытие потребности узла нагрузки в реактивной мощности путем установки в этом узле источников реактивной мощности называется компенсацией реактивной мощности. Источники реактивной мощности называются еще компенсирующими устройствами (КУ).

В качестве КУ используются батареи статических конденсаторов и синхронные машины. Конденсаторы потребляют реактивную мощность емкостного характера или, что равнозначно, выдают реактивную мощность индуктивного характера. Регулирование режима реактивной мощности синхронных машин осуществляется изменением их тока возбуждения.

Эффект от установки компенсирующих устройств оценим по потерям мощности и напряжения на участке электрической сети, показанной на рисунке 2.1.

Без компенсации реактивной нагрузки эти потери составят:

$$\Delta P = 3I^2 R = \frac{S^2}{U_{\text{НОМ}}^2} R = \frac{P^2 + Q^2}{U_{\text{НОМ}}^2} R,$$

где I , P , Q и S – ток, активная, реактивная и полная мощности нагрузки участка сети;

$$\Delta U = \frac{PR+QX}{U_{\text{ном}}},$$

где R и X – активное и реактивное сопротивления участка сети; $U_{\text{ном}}$ – номинальное напряжение сети.

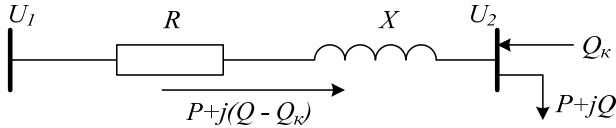


Рис. 2.1. Схема участка электрической сети

После подключения в конце участка сети компенсирующего устройства мощностью Q_k потери напряжения и мощности составят

$$\Delta P = \frac{P^2+(Q-Q_k)^2}{U_{\text{ном}}^2} R; \Delta U = \frac{PR+(Q-Q_k)X}{U_{\text{ном}}}.$$

Видно, что уменьшение потерь мощности и напряжения обусловлено уменьшением протекающей по участку сети реактивной мощности.

Из приведенных выражений видно, что компенсация реактивной мощности эффективна до определенной степени. Потери мощности ΔP будут уменьшаться при увеличении Q_k до величины Q . При дальнейшем увеличении Q_k потери мощности на участке сети начнут вновь возрастать. В том случае, когда $Q_k > Q$, говорят о перекомпенсации реактивной мощности. В сетях промышленных предприятий перекомпенсация не допускается.

Потери напряжения будут уменьшаться до нуля при увеличении Q_k до значения $Q + PR / X$. При $Q_k > Q + PR / X$ потери напряжения изменят знак и напряжение U_2 в конце участка сети станет больше напряжения U_1 в начале участка сети. Поэтому регулируемые компенсирующие устройства являются одним из средств регулирования напряжения у потребителя.

3. Описание лабораторной модели

Физическая модель электрической сети собирается на универсальном лабораторном стенде (рисунок 1.2), который состоит из следующего оборудования: трехфазный лабораторный автотрансформатор ЛТ мощностью 20 кВА, асинхронный двигатель АМ с панелью управления СР (нагрузкой является генератор постоянного тока), конденсаторную батарею с антигармоническим реактором СВ, неуправляемый трехфазный выпрямитель UR с нагрузкой в виде активного сопротивления HR. Для измерения параметров электропотребления применяются счетчики электроэнергии РМ и анализатор качества электроэнергии PQ.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Собрать электрическую схему, представленную на рисунке 2.1, с применением лабораторного оборудования.

4.2. Исходные данные для выполнения работы задаются преподавателем. В соответствии с этими данными выставить параметры линии (R, L) и нагрузки (P, Q).

4.3. Показать для проверки собранную схему преподавателю (лаборанту), проводящему занятие. Подключение стенда к питающей сети лаборатории выполняет преподаватель (лаборант).

4.4. Включить выключатели трехфазного источника питания. О наличии напряжения на его выходе будет сигнализировать светодиод.

4.5. Изменяя мощность компенсирующего устройства Q_к, выполнить измерения:

- напряжения в начале участка сети U_1 ;
- напряжения в конце участка сети U_2 ;
- мощности в начале и конце участка сети P_1, P_2 ;
- потерь мощности на участке сети ΔP ;
- коэффициентов THD_U и THD_I .

4.6. Результаты измерений занести в таблицу 2.1.

Таблица 2.1

Измеренные параметры режима сети и нагрузки

| Q_k , вар | R , Ом | L , Гн | $U1$, В | $U2$, В | ΔU , В | $P1$, Вт | ΔP , Вт | THD_U , % | THD_I , % |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------------|--------------|--------------------|-----------------------|-----------------------|
| $Q_k = 0$ | | | | | | | | | |
| $Q_k < Q$ | | | | | | | | | |
| $Q_k = Q$ | | | | | | | | | |
| $Q_k > Q$ | | | | | | | | | |

4.7. По завершении измерений отключить источник питания и измерительные приборы.

5. Содержание отчета:

- название и цель работы;
- исходные данные;
- схема электрической сети, параметры нагрузки;
- схема подключения измерительных приборов;
- результаты измерений параметров режима сети;
- выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТНОГО РЕГУЛЯТОРА НА РЕЖИМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ

1. Цель работы – ознакомление с принципом работы преобразователя частоты, оценка его влияния на параметры потребляемой из сети электроэнергии, оценка энергоэффективности частотного привода.

2. Основные теоретические положения

Частотно-регулируемый привод – система управления частотой вращения ротора асинхронного (или синхронного) электродвигателя. Состоит из электродвигателя и частотного преобразователя. Преобразователь частоты (ПЧ) – это устройство, состоящее из выпрямителя, преобразующего переменный ток промышленной частоты в постоянный, и инвертора, преобразующего постоянный ток в переменный требуемых частоты и амплитуды (рисунок 3.1).

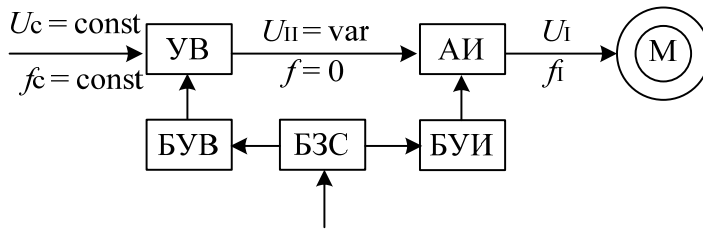


Рис. 3.1. Принципиальная схема преобразователя частоты

На вход управляемого выпрямителя УВ поступает переменное напряжение сети U_c частотой f_c . На выходе УВ напряжение сети преобразуется в напряжение U постоянного тока, значение которого определяется управляющим сигналом, поступающим на УВ от блока управления выпрямителем БУВ. Выход УВ непосредственно связан со входом автономного инвертора АИ, который преобразует поступающее на его вход напряжение постоянного тока в напряжение переменного тока. Причем частота f_1 выходного напряжения U_1 зависит от управляющего сигнала, поступающего на инвертор АИ от блока управления инвертором БУИ. Управляющие сигналы, посту-

пающие на БУВ и БУИ, формируются в блоке задания скорости БЗС напряжением U_3 , соответствующим заданной скорости.

Частота вращения ротора электродвигателя зависит, как известно из курса электромеханики, от частоты питающей сети

$$n_1 = \frac{60f_c}{p}$$

где n_1 – синхронная частота вращения, об/мин; p – число пар полюсов; f_c – частота сети, Гц.

Таким образом, частота вращения ротора электродвигателя меняется при изменении частоты сети, для этой цели и служит преобразователь частоты. При снижении частоты питающей сети снижается потребляемая мощность и ток двигателя I_d , А.

3. Описание лабораторной установки

Исследование возможностей частотно-регулируемого привода осуществляется по схеме, представленной на рисунке 3.2.

Установка подключается к трехфазной электрической сети напряжением 380 В. Система возбуждения генератора подключается к сети переменного тока напряжением 220 В через блок питания. На вводе установлен автоматический выключатель для защиты от токов КЗ и перегрузки.

Напряжение подается на трехфазный асинхронный двигатель через измеритель мощности. Далее двумя возможными путями (прямой пуск или частотный пуск) выполняем переключения на панели, имеющей интуитивно-понятный интерфейс. Управление параметрами преобразователя частоты осуществляется с панели управления. Средства управления также выведены на управляющую панель установки.

На валу двигателя смоделирована переменная нагрузка, нагрузочный момент которой создается генератором постоянного тока с нагрузкой. Загрузка генератора осуществляется блоком сопротивлений. Переключатель нагрузки в цепи генератора моделирует изменение механического момента на валу двигателя, например, разное положение задвижки насоса, работающего на валу этого двигателя.

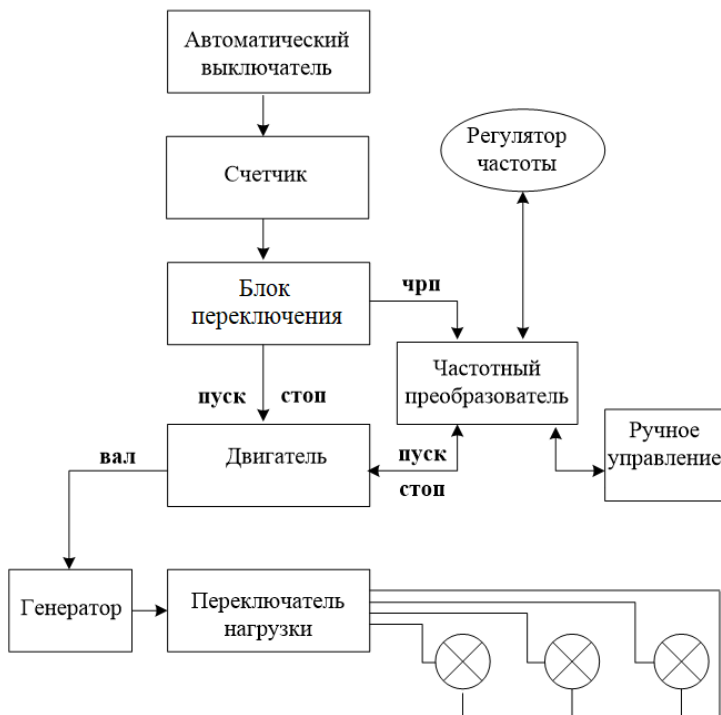


Рис. 3.2. Структурная схема стенда

4. Порядок выполнения работы

Опыт 1

4.1. Собрать электрическую схему в соответствии со структурной схемой стенда на рисунке 3.2.

4.2. Включить электродвигатель нажатием кнопки «ПУСК».

4.3. Изменяя величину нагрузки на валу двигателя с помощью переключателя нагрузки, снять значения активной, реактивной и полной мощностей, суммарное значение коэффициента мощности двигателя и значение тока в фазе А двигателя при всех положениях переключателя.

4.4. Полученные данные занести в таблицу 3.1. Обозначения ступеней нагрузки соответствуют нагрузочному моменту на валу двигателя в % к его номинальной мощности: XX – 0, I – 30, II – 60, III – 100.

Таблица 3.1

Измеренные параметры энергопотребления (прямой пуск)

| Параметр | | P , Вт | Q , вар | S , ВА | I , А | $\cos \varphi$ |
|----------|-----|----------|-----------|----------|---------|----------------|
| Нагрузка | XX | | | | | |
| | I | | | | | |
| | II | | | | | |
| | III | | | | | |

4.5. После снятия показаний остановить двигатель нажатием кнопки «СТОП».

4.6. Подключить питание электродвигателя через ПЧ. Включить электродвигатель.

4.7. Повторить измерения и полученные данные занести в таблицу 3.2. При этом необходимо изменять скорость вращения двигателя с помощью ПЧ.

Таблица 3.2

Измеренные параметры энергопотребления (с ПЧ)

| Параметр | | P , Вт | Q , вар | S , В·А | I , А | $\cos \varphi$ |
|-------------------|-----|----------|-----------|-----------|---------|----------------|
| Скорость вращения | | | | | | |
| Нагрузка | XX | | | | | |
| | I | | | | | |
| | II | | | | | |
| | III | | | | | |

4.8. После снятия показаний остановить двигатель нажатием кнопки «СТОП».

Опыт 2

4.9. Включить автоматический выключатель QF1. Установить прямое подключение электродвигателя к сети. Зафиксировать показания счетчика по потребленной активной и реактивной энергии для тарифа. Включить электродвигатель нажатием кнопки «ПУСК».

4.10. Измеряя время работы с помощью секундомера, дать проработать двигателю 5-10 мин, и снять показания счетчика по потреблению активной и реактивной энергии. Разницу между первым и последним показанием занести в таблицу 3.3.

Таблица 3.3

Измеренные параметры энергопотребления

| Потребленная электроэнергия | Прямой пуск | Частотный пуск |
|-----------------------------|-------------|----------------|
| Активная, кВт·ч | | |
| Реактивная, вар·ч | | |

4.11. После снятия показаний остановить двигатель нажатием кнопки «СТОП».

4.12. Установить подключение двигателя через ПЧ. Должен заработать вентилятор системы охлаждения преобразователя частоты. Включить электродвигатель нажатием кнопки «ПУСК».

4.13. Повторить измерения с помощью измерителя мощности.

4.14. После снятия показаний остановить двигатель нажатием кнопки «СТОП».

4.15. Выключить автоматический выключатель QF1.

5. Содержание отчета:

- название и цель работы;
- исходные данные;
- схема электрической сети, параметры нагрузки;
- принципиальная схема преобразователя частоты и структурная схема лабораторной установки;
- выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 4. ТЕПЛОВИЗИОННЫЙ КОНТРОЛЬ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ

1. Цель работы – ознакомление с принципами тепловизионного контроля электрооборудования с помощью лабораторного тепловизора.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Ознакомиться с инструкцией по эксплуатации тепловизора.

2.2. Снять термограммы объектов в лабораториях кафедры (электрические щиты, контактные соединения, радиаторы отопления, оконные проемы и пр.)

2.3. Изучить РД 34.45-51.300-97 «Объем и нормы испытаний электрооборудования» (Приложение 3).

2.4. Провести анализ, сделать выводы на соответствие требованиям нормативной документации.

3. Содержание отчета

- название и цель работы;
- снятые термограммы объектов;
- выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 5. РЕГУЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ ПУТЕМ ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

1. Цель работы – ознакомление со способами, средствами и законами регулирования напряжения в системе электроснабжения потребителей.

2. Основные теоретические положения

Электроэнергия, поставляемая потребителям, должна иметь определенные качественные показатели, нормируемые ГОСТ 32144-2013. Большинство показателей качества электроэнергии связаны с режимом напряжения электрической сети, которое наряду с качеством электроэнергии определяет экономичность и надежность работы электрической сети.

Непрерывное изменение электрических нагрузок приводит к непрерывному изменению падений напряжения в элементах электрической сети и, следовательно, к непрерывному изменению отклонений напряжения U от его номинального значения $U_{ном}$ в различных узлах электрической сети.

Наибольшие рабочие напряжения $U_{раб\ max}$, определяемые надежностью работы изоляции, нормируются ГОСТ 721-77. Наименьшие рабочие напряжения электрических сетей, определяемые, главным образом, устойчивостью параллельной работы генераторов и узлов нагрузки, ограничиваются на уровне $(0,8...0,9)U_{ном}$.

Для обеспечения требуемых технико-экономических показателей режимов работы электрических сетей необходимо регулировать напряжение. Регулирование напряжения осуществляется на электрических станциях, подстанциях и непосредственно у потребителей электроэнергии.

Основной целью регулирования напряжения в распределительных сетях напряжением 3-20 кВ, находящихся в непосредственной электрической близости от потребителей, является поддержание отклонений напряжения у электроприемников в пределах, установленных ГОСТ.

Центром питания электрической сети напряжением 6-20 кВ являются шины соответствующего напряжения электрической станции или подстанции более высокой ступени напряжения.

Закон регулирования напряжения в центре питания (централизованное регулирование) определяется ПУЭ: устройства регулирования напряжения должны обеспечивать поддержание напряжения на шинах 6...20 кВ электростанций и подстанций, к которым присоединены распределительные сети, в пределах не ниже $1,05U_{ном}$ в период наибольших нагрузок и не выше $U_{ном}$ в период наименьших нагрузок этих сетей.

Трансформаторы (автотрансформаторы) подстанций имеют в обмотке высшего напряжения специальные ответвления, позволяющие изменять коэффициент трансформации и, следовательно, регулировать напряжение в течение суток.

В ряде случаев централизованное регулирование не может обеспечить требуемый уровень напряжения у всех потребителей. Это обусловлено различными параметрами линий, отходящих от центра питания, и неоднородностью графиков нагрузки различных потребителей. В таких случаях необходимо использовать местное регулирование напряжения у потребителей, для которых не обеспечивается требуемый уровень напряжения.

В качестве средств местного регулирования напряжения могут использоваться линейные регулировочные трансформаторы и устройства поперечной компенсации.

Как правило, регулировочные трансформаторы целесообразно устанавливать в центрах питания для регулирования напряжения у отдельной группы потребителей, отличающейся по характеру нагрузки от остальных потребителей. Для мощных и удаленных нагрузок целесообразно использовать поперечную компенсацию реактивной мощности.

3. Описание лабораторной модели

Физическая модель электрической сети собирается на универсальном лабораторном стенде (рисунок 1.2), который состоит из следующего оборудования: трехфазный лабораторный автотрансформатор ЛТ мощностью 20 кВА, асинхронный двигатель АМ с панелью управления СР (нагрузкой является генератор постоянного тока), конденсаторную батарею с антигармоническим реактором СВ, неуправляемый трехфазный выпрямитель UR с нагрузкой в виде активного сопротивления НР. Для измерения параметров электропо-

требления применяются счетчики электроэнергии РМ и анализатор качества электроэнергии PQ.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Собрать электрическую схему, представленную на рисунке 2.1, с применением лабораторного оборудования.

4.2. Исходные данные для выполнения лабораторной работы задаются преподавателем, ведущим занятие. В соответствии с этими данными выставить параметры линии и нагрузки.

4.3. Показать для проверки собранную схему преподавателю (лаборанту), проводящему лабораторную работу. Подключение стенда к питающей сети лаборатории выполняет преподаватель (лаборант).

4.4. Включить выключатели трехфазного источника питания. О наличии напряжения на его выходе должен сигнализировать светодиод.

4.5. Установить коэффициент трансформации трансформатора ЛТ равным $K_t = 1,0$. Измерить параметры электропотребления на вводном присоединении ($U, I, P, Q, S, THD_U, THD_I$).

4.6. Изменяя параметры ЛТ регистрировать параметры электропотребления.

4.7. Повторить измерения при подключенной конденсаторной установке СВ.

4.8. Результаты измерений занести в таблицу 5.1.

Таблица 5.1

| Измеренные параметры энергопотребления | | |
|--|--------|------|
| Параметры ЭП | Без КУ | С КУ |
| U_1 | | |
| P, Вт | | |
| Q, вар | | |
| S, ВА | | |
| THD_{U1} | | |
| U_2 | | |
| P, Вт | | |
| Q, вар | | |
| S, ВА | | |
| THD_{U1} | | |

4.9. По завершении измерений отключить автоматические выключатели источника.

5. Содержание отчета:

- название и цель работы;
- исходные данные;
- схема электрической сети, параметры нагрузки;
- схема подключения измерительных приборов;
- результаты измерений параметров режима сети;
- выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 6. ВЛИЯНИЕ ИСКАЖЕНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЯ

1. Цель работы – ознакомление с источниками высших гармоник, способами и средствами повышения качества напряжения в электрических сетях.

2. Основные теоретические положения

Электроэнергия, поставляемая потребителям, должна иметь определенные качественные показатели, нормируемые ГОСТ 32144-2013. Одним из важных показателей качества напряжения является несинусоидальность напряжения, представляющая собой отличие реальной формы кривой напряжения от идеальной синусоиды. При несинусоидальности кривая напряжения помимо гармоники основной частоты $U_{(1)}$ содержит гармоники $U_{(n)}$ других высших частот, кратных основной частоте.

Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения рассчитывается по формуле:

$$K_U = \frac{\sqrt{\sum U_{(n)}^2}}{U_{\text{ном}}} 100 \text{ \%}.$$

Причиной возникновения несинусоидальности являются потребители с нелинейной вольт-амперной характеристикой (нелинейная нагрузка). Примером таких потребителей служат широко применяемые в промышленности вентильные преобразователи (ВП) электроэнергии (рисунок 6.1).

Основными потребителями электроэнергии на промышленных предприятиях являются асинхронные двигатели (АД). Несинусоидальность напряжения, обусловленная высшими гармониками, приводит к дополнительному нагреву асинхронных двигателей, ускорению старения его изоляции и, следовательно, сокращению срока службы.

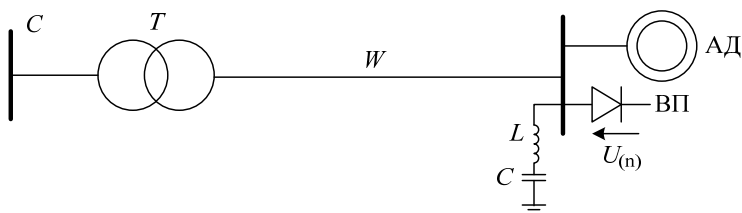


Рис. 6.1. Схема электрической сети с источником высших гармоник

Для устранения вредного влияния высших гармоник используются фильтрокомпенсирующие устройства, представляющие собой индуктивно-емкостные LC -цепи, настраиваемые в резонанс с определенной гармоникой.

3. Описание лабораторной модели

Физическая модель электрической сети собирается на универсальном лабораторном стенде (рисунок 1.2), который состоит из следующего оборудования: трехфазный лабораторный автотрансформатор ЛТ мощностью 20 кВА, асинхронный двигатель АМ с панелью управления СР (нагрузкой является генератор постоянного тока), конденсаторную батарею с антигармоническим реактором СВ, неуправляемый трехфазный выпрямитель UR с нагрузкой в виде активного сопротивления НР. Для измерения параметров электропотребления применяются счетчики электроэнергии РМ и анализатор качества электроэнергии PQ.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Собрать электрическую схему, представленную на рисунке 6.1, с применением лабораторного оборудования.

4.2. Исходные данные для выполнения лабораторной работы задаются преподавателем, ведущим занятие. В соответствии с этими данными выставить параметры линии и нагрузки.

4.3. Включить выключатели трехфазного источника питания. О наличии напряжения на его выходе должен сигнализировать светодиод.

4.4. Установить напряжение на выходе автотрансформатора 220 В.

4.5. Измерить показатели качества электроэнергии (коэффициент несинусоидальности K_U и процентное содержание 3, 5 и 7

гармоник $U_{(3)}$, $U_{(5)}$, $U_{(7)}$ анализатором качества электроэнергии.

Измерения провести для случаев:

Режим 1. Отсутствие источника высших гармоник.

Режим 2. Наличие источника высших гармоник.

Режим 3. Наличие источника высших гармоник и КУ.

Режим 4. При различных значениях напряжения.

4.6. Результаты измерений занести в таблицу 6.1.

Таблица 6.1

| Измеренные параметры энергопотребления | | | | | |
|--|-------|--------|-------|--------------------|--------------------|
| Параметры | P, Вт | Q, вар | S, ВА | TНD _{U/L} | U ₅ , % |
| Режим 1 | | | | | |
| U ₁ | | | | | |
| U ₂ | | | | | |
| U ₃ | | | | | |
| Режим 2 | | | | | |
| U ₁ | | | | | |
| U ₂ | | | | | |
| U ₃ | | | | | |
| Режим 3 | | | | | |
| U ₁ | | | | | |
| U ₂ | | | | | |
| U ₃ | | | | | |

4.7. По завершении измерений отключить автоматические выключатели источника.

5. Содержание отчета:

- название и цель работы;
- исходные данные;
- схема электрической сети, параметры нагрузки;
- схема подключения измерительных приборов;
- результаты измерений параметров режима сети;
- выводы по работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абрамович Б. Н., Круглый А.А., Устинов Д.А.* Электромеханические комплексы горного производства: учебное пособие. – СПб.: [б. и.]. 2011. 66 с.

2. *Железко Ю.С.* Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

3. *Никифоров Г.В.* Энергосбережение и управление электропотреблением в металлургическом производстве / Г.В. Никифоров, В.К. Олейников, Б.И. Заславец. М.: Энергоатомиздат, 2003. – 479 с.

4. *Праховник А.В., Розен В.П., Дегтярев В.В.* Энергосберегающие режимы электроснабжения горнодобывающих предприятий. М.: Недра 1985.

5. Энергосбережение средствами электропривода: докл. науч.-метод. Семинара. – М.: Издательский дом МЭИ, 2011. – 80 с.

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение | 3 |
| Лабораторная работа 1. Исследование установившегося режима электрической сети..... | 4 |
| Лабораторная работа 2. Компенсация реактивной мощности | 9 |
| Лабораторная работа 3. Исследование влияния частотного регулятора на режим электрической сети | 13 |
| Лабораторная работа 4. Тепловизионный контроль электрооборудования | 18 |
| Лабораторная работа 5. Регулирование электропотребления путем изменения напряжения | 19 |
| Лабораторная работа 6. Влияние искажений на параметры электропотребления | 23 |
| Библиографический список..... | 26 |

УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОПОТРЕБЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

*Методические указания к лабораторным работам
для студентов магистратуры направления 13.04.02*

Сост. *А.Н. Скамын*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
электроэнергетики и электромеханики

Ответственный за выпуск *А.Н. Скамын*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 03.09.2021. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 1,6. Усл.кр.-отт. 1,6. Уч.-изд.л. 1,3. Тираж 50 экз. Заказ 785.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2