

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**ФГБОУ ВО «Воронежский государственный  
технический университет»**

**В.Н. Крысанов К.В. Иванов**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО ОБЩЕЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

Утверждено учебно-методическим советом  
университета в качестве учебного пособия

Воронеж 2018

УДК 621.31 (075.8)

ББК 31я7

К853

**Рецензенты:**

*кафедра электроэнергетики*

*Международного института компьютерных технологий*

*(зав. кафедрой д-р техн. наук, профессор А.Н. Анненков);*

*д-р техн. наук, профессор В.М. Питолин*

**Крысанов, В.Н.**

К853

Лабораторный практикум по общей энергетике: учеб. пособие / В.Н. Крысанов, К.В. Иванов. – Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018. – 96 с.

ISBN 978-5-7731-0607-4

В учебном пособии рассмотрены вопросы компьютерного моделирования электроэнергетических систем, отдельных ее элементов.

Издание соответствует требованиям Федерального государственного образовательного стандарта высшего образования по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», (профили «Электропривод и автоматика», «Электромеханика»), дисциплине «Общая энергетика».

Рисунок на обложке [1]

Ил. 46. Библиогр.: 19 назв.

УДК 621.31 (075.8)

ББК 31я7

ISBN 978-5-7731-0607-4 © Крысанов В.Н.,

Иванов К.В., 2018

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2018

## ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе развития нашей страны одной из важнейших задач ее успешного развития является максимально возможная экономия и рациональное использование всех видов ресурсов. В связи с этим, отечественной электроэнергетике предстоит в ближайшее время решать многие задачи, в т.ч.:

- оптимизация стоимости электроэнергии;
- значительное повышение эффективности функционирования сетевого хозяйства в электроэнергетике, существенное снижение потерь в сетях;
- повышение качества и надежности функционирования отрасли на основе передовых аппаратных и программных технических средств.

В качестве приоритетных направлений научно-технического прогресса в электроэнергетике, согласно “Энергетической стратегии России на период до 2030 года,” выделяются следующие:

- создание высокоинтегрированных интеллектуальных системообразующих и распределительных электрических сетей нового поколения в Единой энергетической системе России (интеллектуальные сети – Smart Grid);
- развитие силовой электроники и устройств на их основе, прежде всего различного рода сетевых управляемых устройств (гибкие системы передачи переменного тока – FACTS);
- создание высокоинтегрированного информационно-управляющего комплекса оперативно-диспетчерского управления в режиме реального времени с экспертно-расчётными системами принятия решений.

Учитывая актуальность выше отмеченных направлений, данное учебное пособие включило в себя курс лабораторных работ с необходимым объемом теоретической информации по ключевым направлениям энергетики, практическими рекомендациями по методике выполнения работ, а также анализом полученных результатов.

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MATLAB ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ЭЭС**

### Теоретические сведения

По определению, энергосистема (ЭС) – это совокупность электростанций, электрических и тепловых сетей, соединенных между собой и связанных общностью режима в непрерывном процессе производства, преобразования и распределения электрической энергии и теплоты при общем управлении этим режимом. Под электроэнергетической системой понимается совокупность взаимосвязанных элементов, предназначенных для производства, преобразования, передачи, распределения и потребления электроэнергии.

К элементам электроэнергетической системы относятся генераторы, осуществляющие преобразование механической энергии в электрическую; трансформаторы, преобразующие величины напряжений и токов; линии электропередачи, предназначенные для транспортировки электроэнергии на расстояние; всевозможное вспомогательное оборудование, изменяющее свойства системы, а также устройства управления и регулирования.

Режим системы, т. е. ее состояние в данный момент времени, характеризуется параметрами, определяющими процесс ее функционирования. К таким параметрам режима относятся следующие величины: мощность, напряжение, ток, частота и т. д. Режимы подразделяются на установившиеся и переходные. Параметры установившихся режимов сохраняются на рассматриваемом интервале времени неизменными или изменяются относительно медленно. Переходные режимы соответствуют переходу системы от одного установившегося режима к другому; для них

характерны медленные и малые или быстрые и значительные изменения параметров. Для того чтобы электроэнергетическая система могла нормально функционировать, а потребители электрической энергии могли работать согласно заложенным в их конструкции характеристикам, необходимо соответствие параметров режима определенным значениям. При этом обеспечивается приемлемое качество электроэнергии, подводимой к потребителям, которое характеризуется значениями напряжения, частоты, симметрией (для трехфазного тока) и синусоидальностью (формой кривой переменного тока).

Физические свойства элементов электрической системы и взаимосвязи элементов между собой характеризуются параметрами электрической системы. К ним относятся: сопротивления элементов, моменты инерции и постоянные времени, характеризующие скорости изменения электрических и механических величин, и т. д.

Элементы электрической системы связаны единством происходящих в них процессов. Так, на протекание электромагнитных процессов, вызванных, например, возмущениями в электрической сети, оказывают влияние режимы работы турбин, механическая энергия которых преобразуется в электрическую. На эти же процессы влияют режимы работы электрических двигателей и присоединенных к ним производственных механизмов, так как в двигателях электрическая энергия преобразуется в механическую. Изменения режимов работы турбины, в свою очередь, вызывают изменения параметров пара в паропроводах, а, следовательно, и изменения в работе парогенераторов.

Организация наиболее целесообразной (экономически и технически) оптимальной эксплуатации имеет важное значение для всего народного хозяйства. Поэтому в настоящее время особенно остро ставится проблема привлечения качественно новых, наиболее совершенных методов управления, основанных на новейших достижениях науки и техники.

Электроэнергетическая система, таким образом, тесно связана с другими системами (в том числе и с окружающей биологической средой), образующими глобальную систему. При проектировании развития электроэнергетической системы и управлении ее режимами эти связи необходимо учитывать.

Для того чтобы передать электрическую энергию на расстояние, ее предварительно преобразовывают, повышая напряжение трансформаторами. У мест потребления электроэнергии напряжение понижают до требуемого значения. Все элементы электроэнергетической системы связаны происходящими в них процессами, и поэтому система при решении ряда задач должна рассматриваться как качественно новое (по сравнению с отдельными элементами) единое образование. К таким задачам можно отнести регулирование частоты и напряжения, определение экономически целесообразных потоков мощностей и т.п. Наряду с системными задачами существуют такие, в которых можно ограничиться рассмотрением отдельных элементов, отвлекаясь от их связей с остальной частью системы. Например, если мощность одного из трансформаторов, подключенных к распределительному пункту (РП), намного меньше мощности других трансформаторов, то при изменениях нагрузки рассматриваемого трансформатора напряжение на шинах РП практически будет оставаться неизменным. Иными словами, можно с достаточной для практических целей достоверностью считать, что трансформатор подключен к источнику с неизменным напряжением, и рассматривать режимы работы трансформатора без учета свойств системы.

Часть электрической системы, предназначенная для передачи и распределения электрической энергии, содержащая подстанции, линии электропередачи и распределительные устройства, называется электрической сетью.

На подстанциях производится преобразование, а иногда и распределение электрической энергии. Под преобразованием электрической энергии понимается изменение напряжения и тока в трансформаторах. Передача электрической энергии на

расстояние осуществляется по воздушным или кабельным линиям. Потребление ее происходит различными механизмами, но значительная доля расходуется на приведение в движение производственных механизмов электрическими двигателями переменного тока на различных объектах народного хозяйства.

Режим потребления электрической энергии отдельными предприятиями, группами предприятий, населением городов, поселков в течение суток и года, как правило, неравномерен, что объясняется работой предприятий в одну, две и три смены с неодинаковой нагрузкой, перерывами между сменами, изменением режима работы в летнее время, праздничные дни, а также внешними факторами: продолжительностью светлой части суток, температурой воздуха и др. Значительную неравномерность вносит нагрузка светильников, возникающая в утренние (зимой) и вечерние часы и спадающая днем и ночью, а также летом. Графики нагрузок представляют собой графическое изображение режима работы электроустановки.

Каждый элемент электрической части энергосистемы (генераторы, трансформаторы, сети, потребители) имеют свой график нагрузки. Первый этап проектирования систем электроснабжения базируется на достоверном определении графиков электрических нагрузок. По значению электрических нагрузок выбирают и проверяют электрооборудование системы электроснабжения, определяют потери мощности и электроэнергии в линиях электропередачи, трансформаторах и реакторах. От правильной оценки перспективных нагрузок зависят капитальные затраты на систему электроснабжения, эксплуатационные расходы и надежность работы электрооборудования.

При проектировании систем электроснабжения выполняется ряд расчетов, результаты которых позволяют выбрать оборудование подстанций, сечение и материал проводников, наиболее экономичные способы передачи электроэнергии, конфигурацию сети и т.п. Определение расчетных электрических нагрузок и учет изменения их во

времени в этом случае является исходным материалом для всего последующего проектирования.

Режим потребления электроэнергии может быть представлен графиком нагрузки – зависимостью активной, реактивной или полной мощностей от времени. Различают суточные графики для разных дней недели и разных периодов года (зимний, летний, весенний, осенний), а также годовые графики. Суточные графики нагрузки представляют собой непрерывные кривые зависимости  $P(t)$ ,  $Q(t)$  или  $S(t)$ . Однако при проектировании электроустановок, разного рода расчетов, непрерывные графики обычно заменяют приближенными ступенчатыми графиками (рис. 1.1 а, б). Характерными величинами (показателями) суточного графика являются: максимальная суточная нагрузка  $P_{\max}$ ; минимальная дневная  $P_{\text{дн, min}}$  и минимальная ночная  $P_{\text{min}}$  нагрузки; средняя суточная нагрузка  $P_{\text{ср.сут}} = A_{\text{сут}}/24$ ; коэффициент заполнения графика  $K_{\text{зп,сут}} = P_{\text{ср,сут}}/P_{\max}$ ; коэффициент неравномерности нагрузки или отношение  $K_{\text{нр}} = P_{\text{min}}/P_{\max}$ .

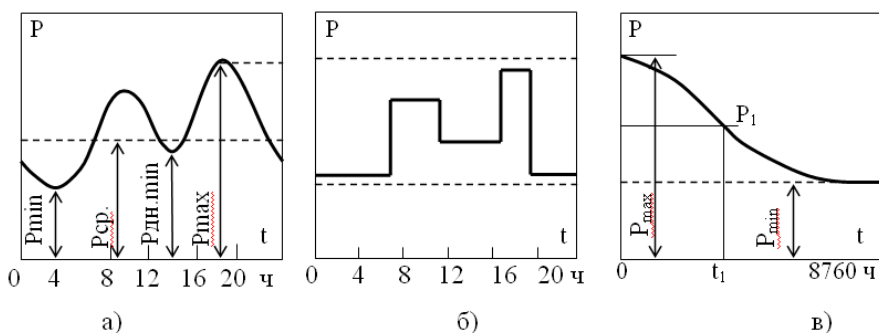


Рис. 1.1. Графики активной нагрузки потребителей:  
 а – суточный непрерывный; б – суточный ступенчатый;  
 в – годовой по продолжительности

Годовые графики (рис. 1.1 в) строят по характерным суточным графикам для зимних, весенне-осенних и летних



дней. При этом координаты этих графиков располагают вдоль оси абсцисс от 0 до 8760 часов в порядке их значений. При таком построении графика абсцисса  $t_1$ , соответствующая ординате  $P_1$ , указывает время в часах, в течение которого нагрузка принимает значение  $P_1$ . Такие графики называют графиками, построенными по продолжительности.

Площадь суточного или годового графика соответствует в некотором масштабе электроэнергии  $A$ , потребленной в течение суток или года.

Для количественного отображения графиков существуют коэффициенты графиков нагрузки.

Коэффициент заполнения или плотность заполнения недельного графика суточного электропотребления характеризуется:

$$K_{\text{нед}} = P_{\text{ср,нед}} / P_{\text{ср,сут}}$$

Плотность месячного графика недельного электропотребления характеризуется коэффициентом межнедельной неравномерности:

$$P_{\text{мес,нед}} = P_{\text{ср,мес}} / P_{\text{ср,нед}}$$

Тогда плотность месячного графика суточного электропотребления:

$$K_{\text{мес}} = K_{\text{нед}} * K_{\text{мес/нед}} = (P_{\text{ср,мес}} * P_{\text{ср,нед}}) / (P_{\text{ср,сут}} * P_{\text{ср,нед}}) = \\ P_{\text{ср,мес}} / P_{\text{ср,сут}} \\ K_{\text{год}} = P_{\text{ср,год}} / P_{\text{ср,мес}}$$

Плотность годового графика месячного электропотребления определяется коэффициентом:

$$K_{\text{год}} = P_{\text{ср,год}} / P_{\text{ср,мес}}$$

Коэффициент летнего снижения максимальных нагрузок:

$$K_{л} = P_{\max,л} / P_{\max,з}$$

Коэффициент годового роста нагрузки:

$$K_{р} = P_{\max,год} / P_{\max,1} \geq 1,$$

где  $P_{\max,1}$  – максимальная нагрузка на начало года (январь).

Коэффициент использования:

$$K_{и} = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{ном}}} = \frac{\sum_{i=1}^n K_{н,i}}{\sum_{i=1}^n P_{н,i}}$$

Коэффициент включения:

$$K_{в} = \frac{t_{в}}{T_{ц}} = \frac{t_{р} + t_{х}}{t_{р} + t_{х} + t_{о}},$$

где  $t_{р}$ ,  $t_{х}$ ,  $t_{о}$  – цикл времени работы, холостого хода, паузы, соответственно.

Коэффициент загрузки:

$$K_{з} = \frac{1}{P_{\text{ном}}} \cdot \frac{1}{t_{в}} \int_0^{T_a} P dt = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{ном}}} \cdot \frac{T_{ц}}{t_{в}}$$

Коэффициент максимума:

$$K_{\text{макс}} = \frac{P_{\text{расч}}}{P_{\text{ср}}}$$

Коэффициент заполнения графика нагрузки:

$$K_{\text{зап}} = \frac{P_{\text{ср}}}{P_{\text{макс}}}.$$

Коэффициент спроса по активной мощности:

$$K_{\text{спр}} = \frac{P_{\text{потр}}}{P_{\text{ном}}}.$$

Коэффициент формы графика нагрузок:

$$K_{\text{ф}} = \frac{S_{\text{ср,кв}}}{S_{\text{ср}}}.$$

Время использования максимума:

$$T_{\text{макс}} = \int_0^{8760} P dt / P_{\text{расч}}.$$

Графики нагрузки предназначены для:

- определения времени пуска и остановки агрегатов, включения и отключения трансформаторов;
- определения количества выработанной (потребленной) электроэнергии;
- ведения экономичного режима работы электроустановок;
- планирования ремонтов электроустановок;
- проектирования и модернизации электроустановок.

Для регулирования графиков нагрузки применяются следующие способы:

- подключение сезонных потребителей (орошение, торфоразработки и т.д.);

- подключение нагрузки ночью (насосные, аккумулирующие станции);
- увеличение числа рабочих смен;
- смещение начала смен;
- разнос выходных дней;
- оплата как за активную, так и за реактивную энергию;
- уменьшение перетоков реактивной мощности по сети;
- объединение электростанций в энергосистемы.

Таким образом, графики нагрузок дают возможность определить некоторые показатели, необходимые при расчетах нагрузок, и более рационально выполнить систему электроснабжения.

Каждая отрасль промышленности имеет свой характерный график нагрузок, определяемый технологическим процессом производства. Групповой график нагрузок складывается из индивидуальных графиков нагрузок приемников, входящих в данную группу.

На рис. 1.2-1.5 приведены характерные суточные графики активной и реактивной нагрузок предприятий различных отраслей промышленности.

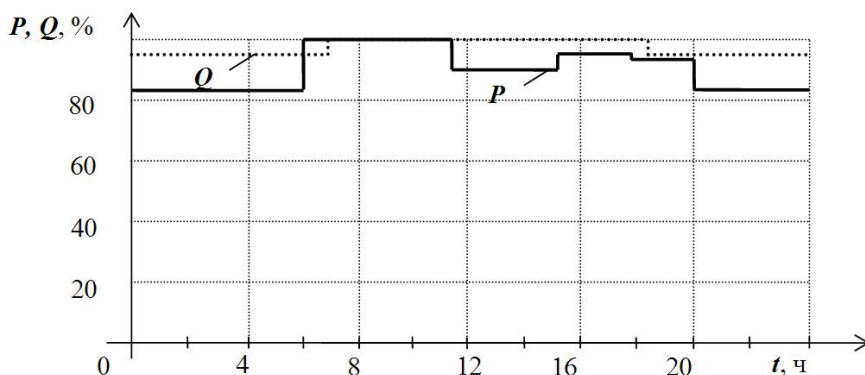


Рис. 1.2. Завод черной металлургии [4]

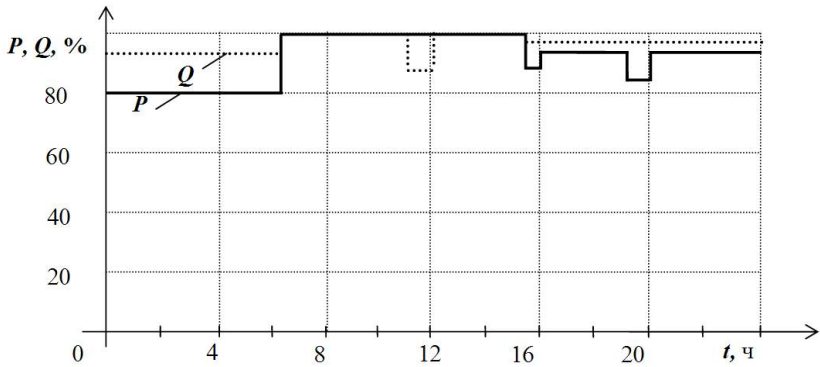


Рис. 1.3. Завод целлюлозно-бумажной промышленности [4]

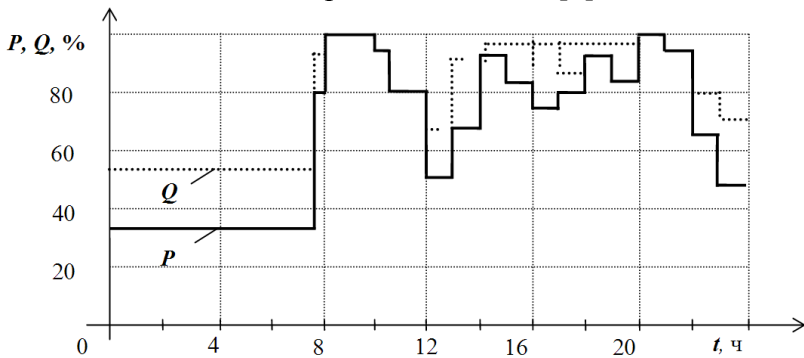


Рис. 1.4. Ремонтно-механический завод [4]

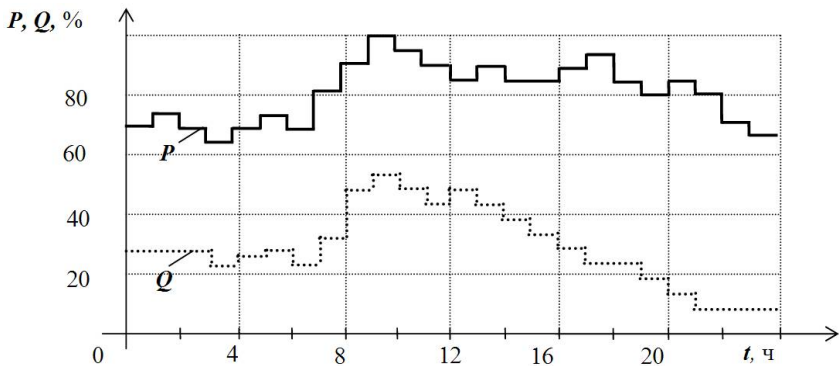


Рис. 1.5. Завод пищевой промышленности [4]

Перед началом любого проектирования или модернизации ЭЭС или какой-либо отдельной ее части, для скорейшего получения более корректных результатов, желательно провести либо физическое, либо математическое моделирование выбранного объекта. Учитывая мощности, уровни напряжений и стоимости физических элементов (а также возможности современных программных продуктов), целесообразно во многих случаях использовать математическое моделирование с помощью ПК.

### Методика проведения лабораторной работы

В данной лабораторной работе требуется провести моделирование простой электрической системы с учетом последующего анализа характера нагрузки потребителей.

На рис. 1.6 представлена эквивалентная энергосистема, питающая 300-километровую линию электропередачи. Линия связана с катушкой индуктивности. Выключатель позволяет подавать питание и обесточивать линию. Для упрощения рассматривается только одна из трех фаз. Параметры, показанные на рис. 1.6, типичны для реальной энергосистемы 735 кВ.

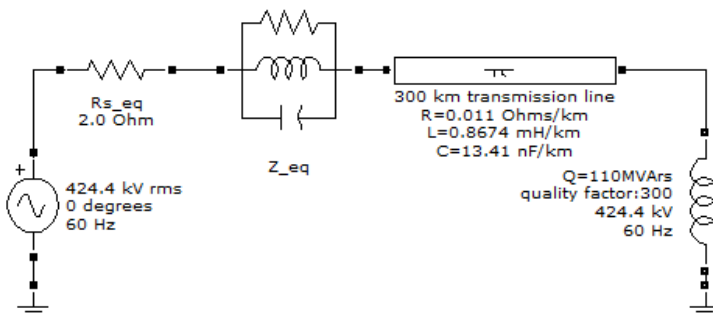


Рис 1.6. Эквивалентная схема энергосистемы

1. Создание электрической цепи с помощью библиотеки Powerlib.

Simulink использует графический пользовательский интерфейс, чтобы связать различные электрические компоненты. Электрические компоненты сгруппированы в специальной библиотеке, называемой Powerlib.

1.1. Открыть библиотеку SimPowerSystems, введя в командной строке MATLAB: `powerlib`. Эта команда отображает окно Simulink, в котором представлены различные библиотеки SimPowerSystems. Внешний вид окна изображен на рис.1.7.

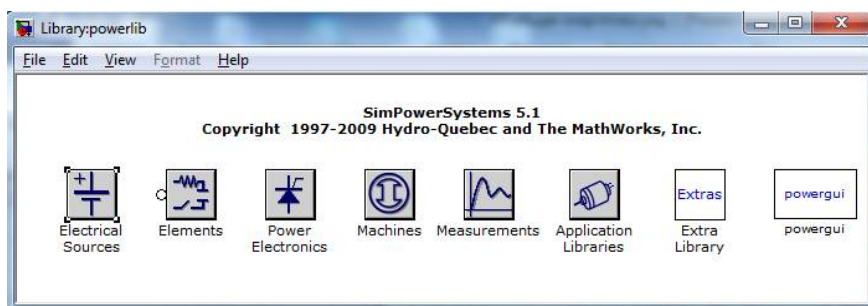


Рис. 1.7. Окно библиотеки SimPowerSystems

Эти библиотеки могут быть открыты, в них содержатся блоки, которые можно скопировать в схему. Каждый компонент представлен специальным блоком, который имеет один или несколько входов и выходов, соответствующих различным терминалам компонента.

1.2. В меню File открыть новое окно, которое будет содержать первую схему, и сохранить её под именем «circuit1».

1.3. Открыть библиотеку Electrical Sources (электрические источники) и переместить AC Voltage Source (источник переменного напряжения) в окно «circuit1».

1.4. Открыть диалоговое окно AC Voltage Source, дважды щелкнув мышкой на блоке, и ввести Amplitude (амплитуду), Phase (фазу) и Frequency (частоту) согласно значениям, показанным на рис. 1.6. Амплитуда, которая будет определена для синусоидального источника — его пиковое

значение  $(424,4 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{2} = 600,2 \text{ кВ})$ . Изменить название блока AC Voltage Source на «Vs».

1.5. Добавить блок Parallel RLC Branch (параллельная RLC цепь), который можно найти в библиотеке Elements (элементы), установить его параметры как показано на рис. 1.6 и изменить его название на «Z\_eq».

1.6. Добавить блок Parallel RLC Branch, который есть уже в файле «circuit1», установить параметр R (сопротивление) согласно рис 1.6, а также параметры L (индуктивность) и C (емкость) соответственно бесконечности «inf» и нулю «0». Переименовать блок в «Rs\_eq».

Когда диалоговое окно закроется, обратите внимание, что L и C компоненты исчезли, на значке теперь показан единственный резистор. Тот же самый результат можно получить с помощью блока Series RLC Branch (последовательная RLC цепь), устанавливая параметры L (индуктивности) и C (емкости) соответственно нулю «0» и бесконечности «inf».

1.7. Открыть библиотеку Connectors (соединители) и добавить блок busbar (соединительную шину). Открыть свойства блока BusBar (соединительная шина) и установить его параметры — два ввода и два вывода. Переименовать блок в «B1».

При отсутствии в библиотеке блока busbar, соединять выводы элементов напрямую, создавая таким образом узел.

1.8. Добавить блок Ground (заземление) (выбрать блок с выходным соединением).

1.9. Изменить размеры различных компонентов и связать блоки, перемещая линии от выводов до вводов соответствующих блоков, как показано на рис. 1.8.



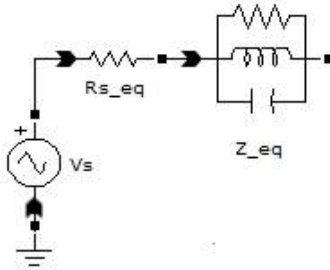


Рис. 1.8. Условные изображения элементов в Simulink

Чтобы завершить схему, показанную на рис. 1.6, необходимо добавить линию электропередачи и токоограничивающий реактор. Выключатель добавить позже.

Модель линии с равномерно распределенными  $R$ ,  $L$  и  $C$  параметрами обычно содержит задержку, которая равняется времени распространения волны по линии. Эта линия не может моделироваться как линейное устройство, потому что задержка соответствует бесконечному числу состояний. Однако хорошее приближение линии с конечным числом состояний можно получить, каскадируя несколько  $\Pi$ -образных схем, каждая из которых представляет малую  $\pi$ -секцию линии.

$\pi$ -секция состоит из ряда  $R$ - $L$  нагрузок и двух  $C$  (емкостных) шунтов цепи. Точность зависит от числа  $\pi$ -секций, используемых для модели.

1.10. Добавить блок  $\pi$  Section Line из библиотеки Elements в окно «circuit1», установить его параметры как показано на рис. 1.6 и определить одну  $\pi$ -секцию линии.

Токоограничивающий реактор будет смоделирован резистором последовательно с катушкой индуктивности.

Более удобно использовать блок Series RLC Load (последовательная RLC нагрузка), который позволяет задавать непосредственно активные и реактивные мощности, поглощаемые токоограничивающим реактором.

1.11. Добавить Series RLC Load, который находится в библиотеке Elements. Переименовать этот блок в «110 Mvar». Установите его параметры следующим образом:

$U_{ном}=424.4\text{кВ}$ ;  $f_{ном}=60\text{Гц}$ ;  $P=110/300\text{ МВт}$  (quality factor (качественный коэффициент)=0.3);  $Q_L=110 \cdot 10^6\text{ var}$  и  $Q_c=0$ .

Поскольку никакая реактивная емкостная мощность не была определена, конденсатор исчезнет на изображении блока, когда диалоговое окно будет закрыто.

1.12. Добавить окончательную соединительную шину В2, дублируя В1, и соединить все новые блоки как показано на рис. 1.9.

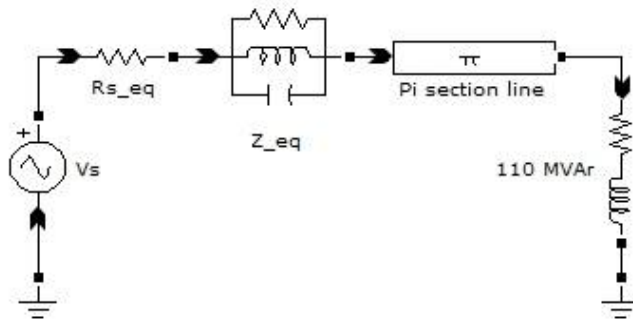


Рис. 1.9. Окончательная схема

Чтобы измерить разность потенциалов на соединительной шине (узле) В1, необходим блок Voltage Measurement (вольтметр). Этот блок располагается в библиотеке Measurements (измерения).

1.13. Добавить блок Voltage Measurement и назвать «U1». Соединить его положительный провод со вторым выходом busbar (узла) В1, а отрицательный – с блоком Ground.

Чтобы не ошибиться с разностями потенциалов в соединительной шине (узле) В1, измеряя разности потенциалов блоком Voltage Measurement, необходимо добавить индикатор.

1.14. Открыть библиотеку Sinks (приемники) Simulink и добавить блок Scope (измеритель) в окно проекта «circuit1».

Если Scope присоединить непосредственно к выходу voltage measurement, то в результате получится индикация разности потенциалов в вольтах. Однако, инженеры-электрики в силовых системах привыкли работать с нормализованными

величинами (в относительных единицах). Напряжение будет выражаться в относительных единицах, если значение в вольтах разделить на базовое значение напряжения, соответствующие пиковому значению номинального напряжения системы. В данном случае коэффициент  $K$  определится как:

$$K = \frac{1}{424,4 \cdot 10^3 \cdot \sqrt{2}}.$$

1.15. Добавить блок Gain (усиление) из библиотеки Math Operations (математические операции) Simulink и установить его коэффициент увеличения  $K$  как было показано выше. Подключить его выход к блоку Scope, а вход – к выходу блока Voltage Measurement. Скопировать эту систему измерения напряжения на соединительную шину (узел) B2 как показано на рис. 1.10.

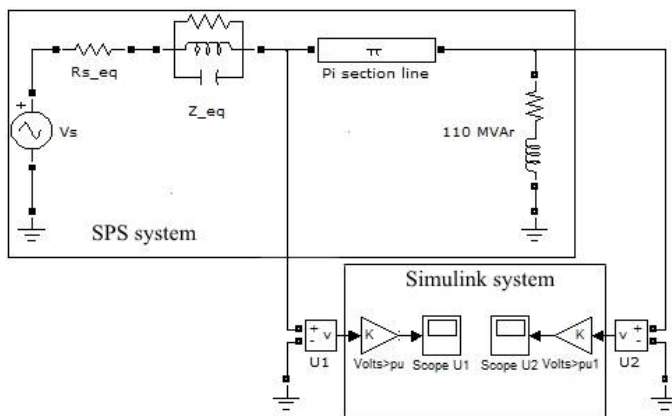


Рис. 1.10. Схема с измерительными приборами

## 2. Связь электрической схемы с Simulink

Voltage Measurement выступает как интерфейс между блоками SimPowerSystems и блоками Simulink. Блоки Voltage Measurement преобразовывают измеренные напряжения в сигналы Simulink.

Блок Current Measurement (амперметр) из библиотеки Measurements можно использовать, чтобы преобразовать любой измеренный ток в сигнал Simulink.

Связь блоков Simulink с электрической схемой также возможна. Например, можно использовать блок Controlled Voltage Source (управляемый источник напряжения) как показано на рис 1.11, чтобы смоделировать источник напряжения в электрической схеме. Напряжение будет управляться сигналом Simulink.

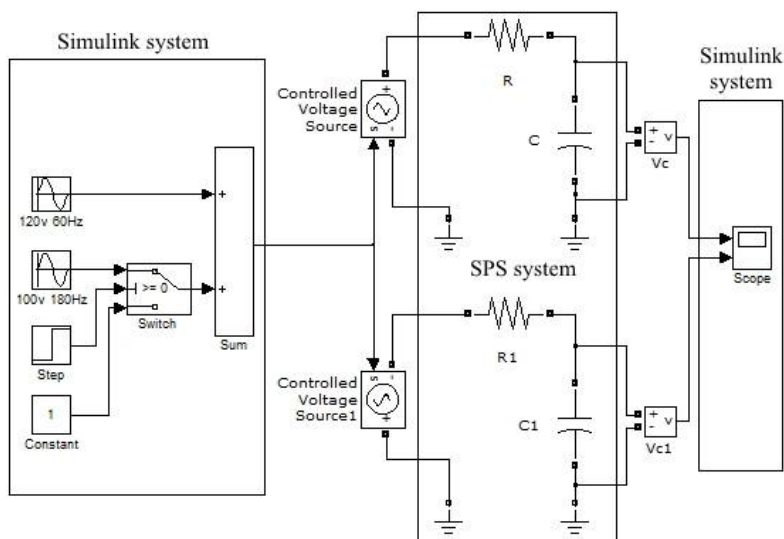


Рис. 1.11. Использование управляемого источника напряжения

### 3. Моделирование схемы

3.1. Добавить блок Powergui в окно проекта «circuit1». Данный блок обязателен для моделирования любой цепи, содержащей блоки библиотеки SimPowerSystems. Он используется для хранения эквивалентной схемы, которая представляет собой уравнения пространства состояний модели.

3.2. В меню Simulation (моделирование) выбрать вкладку «Configuration Parameters...» (параметры

конфигурации). В поле Stop time (время остановки) ввести «0.2».

3.3. Запустить программу на моделирование, нажав кнопку «Start» в меню Simulation. Дважды щелкнуть на блоке Scope для просмотра графиков выходных переменных.

3.4. В то время, как выполняется моделирование, открыть диалоговое окно блока Vs и изменить амплитуду. Следить за изменениями на двух Scopes. Также можно изменять частоту и фазу.

Для изменения масштаба изображения выходного сигнала в окне Scope выделить мышкой (использование левой кнопки мыши) интересующую область. Для просмотра полного графика нажать на кнопку «Autoscale».

#### Обработка данных

4. Сохранить и проанализировать полученные при моделировании графики напряжений для различных вариаций параметров рассматриваемой ЭЭС.

## Лабораторная работа № 2

# КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MATLAB УСТРОЙСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ В ЭЭС

### Теоретические сведения

В соответствии с ГОСТ, на шинах генерирующих электростанций должно обеспечиваться синхронными генераторами встречное регулирование напряжения в пределах  $(1 \div 1,05) U_{\text{ном}}$ . Однако такое регулирование часто недостаточно для поддержания необходимого качества энергоснабжения потребителей. Так, при использовании на электростанции регулировочного диапазона в 5%, общий размах колебания напряжения у удаленного потребителя будет  $(30—9—5) = 16\%$ , тогда как обычно у потребителя допускается отклонение напряжения  $\pm 5\%$ , т.е. размах в 10%.

Учитывая сказанное, данный способ регулирования напряжения применим только в случае короткой сети, питаемой от шин генераторного напряжения. Поэтому в ЭЭС широко используется регулирование напряжения силовых трансформаторов путём изменения их коэффициента трансформации.

Различают повышающие и понижающие трансформаторы. В зависимости от типа трансформатора подбирается его номинальный коэффициент трансформации, определяемый как отношение напряжений основных выводов при холостом ходе трансформатора.

Рассмотрим схему, представленную на рис. 2.1 а. Потеря напряжения в линиях при расчетной нагрузке составляет около 10%. Поэтому в начале линии поддерживается напряжение  $\sim 1,05 U_{\text{ном}}$ . При этом в конце линии оно может быть ниже номинального, например,  $0,95 U_{\text{ном}}$ .

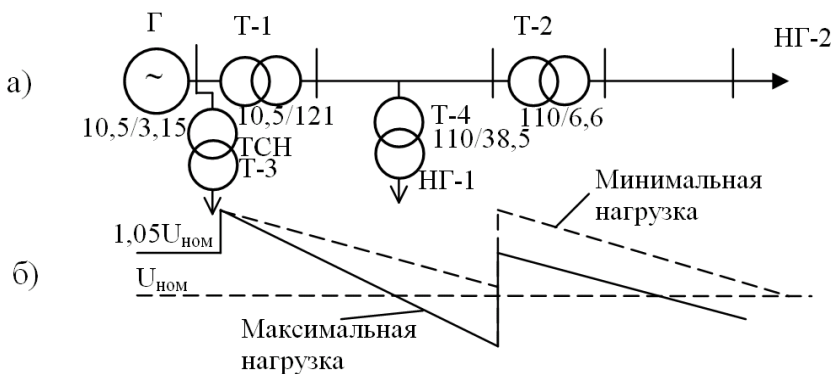


Рис. 2.1. Изменение напряжения в сети при изменении нагрузки: а – поясняющая схема; б – изменение напряжения [8]

У повышающих трансформаторов (Т-1) основной вывод обмотки низкого напряжения (НН) рассчитывается на  $U_{Г\text{ ном}} = 1,05 U_{\text{ ном}}$  сети или на  $U_{\text{ ном}}$  сети, а основной вывод обмотки высокого напряжения (ВН) – на  $1,1 U_{\text{ ном}}$  сети (в сетях 330 – 500 кВ основной вывод рассчитывается на  $1,05 U_{\text{ ном}}$  сети).

У понижающих трансформаторов (Т-2; Т-3; Т-4) обмотка ВН имеет основной вывод, рассчитанный на  $U_{Г\text{ ном}}$  или  $U_{\text{ ном}}$  сети, а обмотка НН –  $1,1 U_{\text{ ном}}$  сети или  $1,05 U_{\text{ ном}}$  сети (в случае короткой сети, например, сети собственных нужд электростанций).

Регулирование коэффициента трансформации трансформатора изменением числа витков обмоток может производиться либо при отключенном положении трансформатора с помощью переключателей числа витков без возбуждения (анцапф), либо под нагрузкой с помощью специального регулировочного устройства.

У трансформаторов 35 кВ регулирование при отключенном положении ( $\pm 2 \times 2,5\%$ ) производится в середине обмотки ВН, а у трансформаторов 110 кВ – в нуле обмотки.

У трехобмоточных трансформаторов регулирование в тех же пределах выполняется на сторонах ВН и СН.

В последнее время все большее распространение получают трансформаторы с регулировкой под нагрузкой (с РПН). Диапазон регулировки может быть разным:  $\pm 4 \times 2,5\%$ ,  $\pm 6 \times 2,5\%$ ,  $\pm 8 \times 1,5\%$ .

Новый типаж на трансформаторы предусматривает регулировку напряжений в пределах  $\pm 10 \div 16\%$ . В дальнейшем подавляющее большинство сетевых трансформаторов будет выпускаться с РПН. В зарубежных странах широко используется регулировка  $\pm 10\%$  (по 5/8%). Основным недостатком трансформаторов с РПН заключается в их повышенной стоимости (такие трансформаторы на 20÷50% дороже трансформаторов без РПН).

Принципиальная схема устройства РПН показана на рис. 2.2.

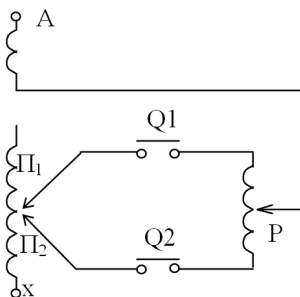


Рис. 2.2. Принципиальная схема устройства РПН [8]

Переключатели  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$  и реактор  $P$  размещаются в баке трансформатора, а выключатели  $Q_1$ ,  $Q_2$  – в специальном выносном устройстве. Последнее вместе с приводным механизмом крепится на баке силового трансформатора.

Для мощных ЛЭП, применяется регулирование напряжения с помощью вольтодобавочных трансформаторов.

Существует несколько схем включения вольтодобавочных трансформаторов (рис. 2.3).



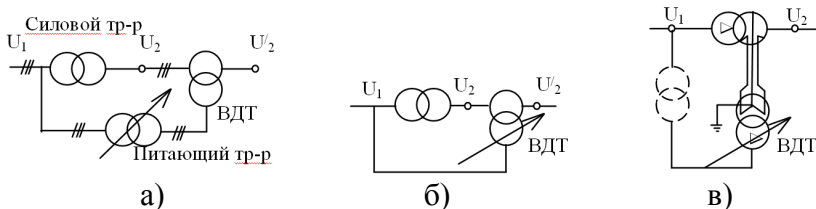


Рис. 2.3. Схемы вольтодобавочных трансформаторов:  
 а – линейный вольтодобавочный трансформатор включен последовательно с силовым и имеет питающий трансформатор;  
 б – линейный регулируемый вольтодобавочный трансформатор включен последовательно с силовым;  
 в – вольтодобавочный трансформатор включен со стороны нуля силового трансформатора [9]

Схемы а и б рис. 2.3 чаще используются в сетях, а схема в — на электростанциях. В зависимости от группы соединений силового и вольтодобавочного трансформаторов можно получить продольное или поперечное регулирование напряжения (рис. 2.4).

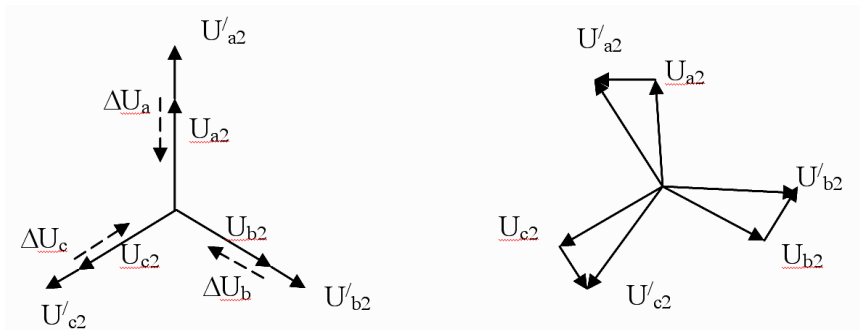


Рис. 2.4. Векторные диаграммы напряжения при продольном (а) и поперечном (б) регулировании напряжения в сети [9]

Продольное регулирование напряжения в основном ведет к изменению потоков реактивных мощностей, а

поперечное - активных мощностей, поэтому последнее используют для принудительного распределения активных мощностей.

Рассмотрим схему, представленную на рис. 2.5 а. Если все трансформаторы имеют одинаковую мощность и одинаковое  $U_k$ , а линии - одну длину, то линии будут загружены неравномерно; существенно больше загрузится линия 220 кВ. Введение поперечного регулирования на трансформаторе Т1 или Т2 позволяет загрузить линию 110 кВ.

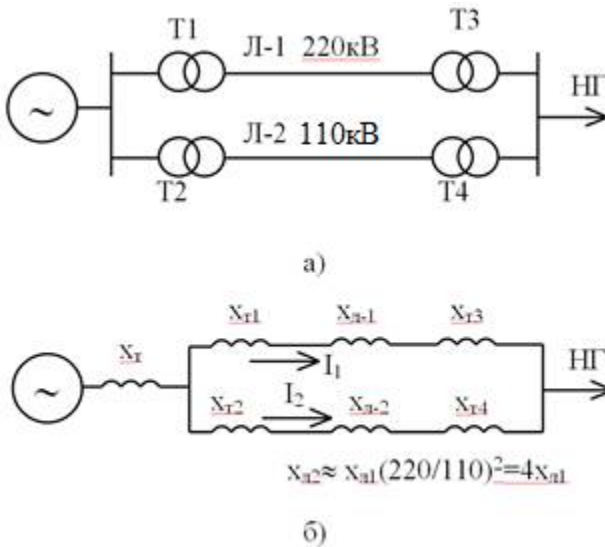


Рис. 2.5. Параллельная работа линий различного напряжения: а – исходная схема; б – схема замещения [9]

Регулирование напряжения возможно и изменением потоков реактивных мощностей. Если в схеме с сосредоточенной нагрузкой на конце (рис. 2.6) поддерживаются неизменными напряжение  $U_2$  и активная нагрузка  $P$ , а реактивная нагрузка  $Q$  изменяется, то меняется напряжение в линии.

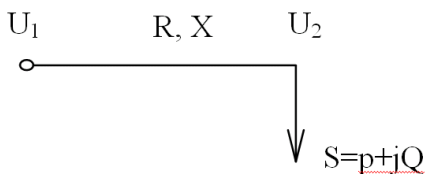


Рис. 2.6. Линия с нагрузкой на конце [10]

При этом конец вектора напряжения в начале линии  $U_1$  скользит по прямой (векторная диаграмма на рис. 2.7).

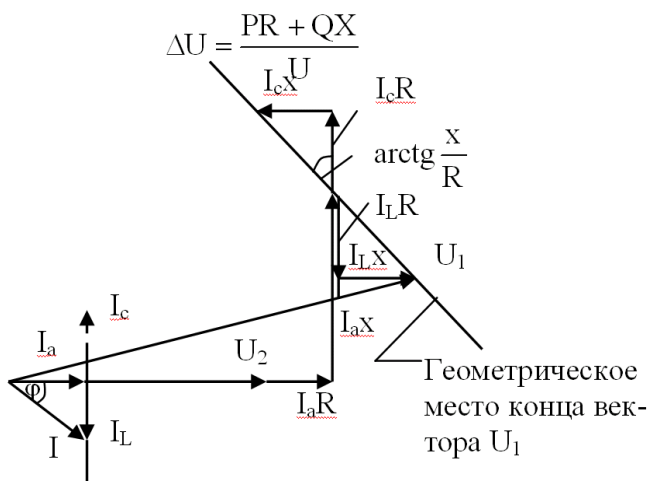


Рис. 2.7. Векторная диаграмма напряжений и токов линии при изменении реактивной нагрузки [10]

Заметим, что не всегда  $|U_1| > |U_2|$ . Например, в случае холостого хода длинной линии электропередачи, обладающей большой распределенной емкостью,  $|U_1| < |U_2|$ , как это видно из рис. 2.8 б. Если же линию нагрузить, то окажется как обычно  $|U_1| < |U_2|$  (рис. 2.8 в).

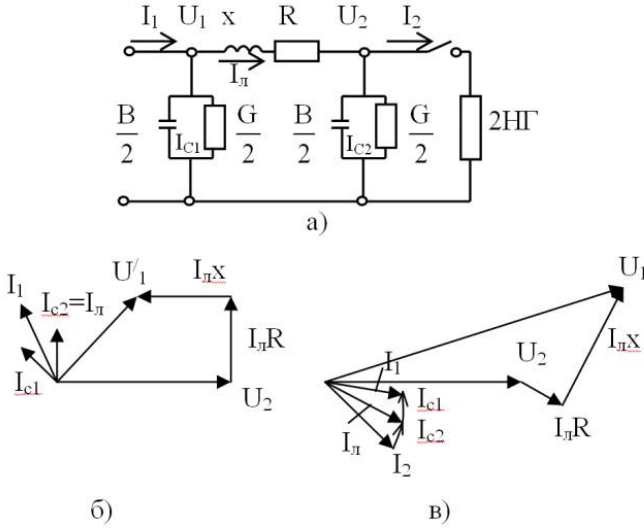


Рис. 2.8. Режимы длинной линии: а – поясняющая схема; б – холостой ход линии; в – нагрузочный режим линии [10]

Изменения перетоков реактивной мощности по линии можно добиться установкой у потребителя синхронных компенсаторов (рис. 2.9) или батарей статических конденсаторов (статическая компенсация).

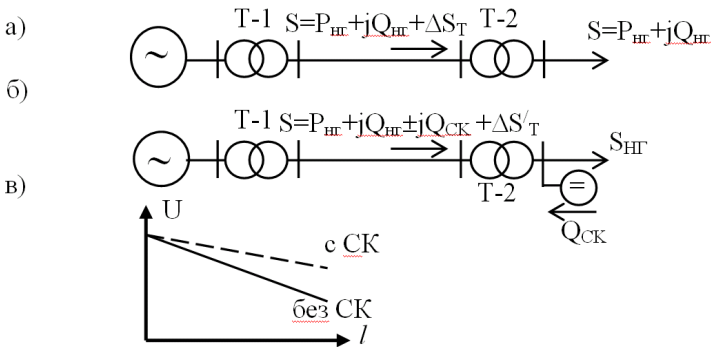


Рис. 2.9. Влияние синхронных компенсаторов: а – исходная схема; б – схема с синхронным компенсатором; в – изменение напряжения в сети [10]

Необходимая мощность компенсирующих устройств находится следующим образом. При отсутствии и наличии компенсирующего устройства напряжения  $U_2$  и  $U_1$  связаны соотношениями:

$$U_1 = U_2 + PR + \frac{QX}{U_2};$$

$$U_2 = U_{2ж} + \frac{PR + (Q - Q_{ск})X}{U_{2ж}},$$

где  $U_{2ж}$  - желаемое напряжение при подключении компенсирующего устройства.

Если  $U_1$  остается неизменным, то

$$U_{2ж} - U_2 + PR + \frac{QX}{U_{2ж}} - \frac{Q_{ск}X}{U_{2ж}} - PR + \frac{QX}{U_2} = 0.$$

$U_{2ж}$  мало отличается от  $U_2$ , поэтому

$$PR + \frac{QX}{U_{2ж}} \approx PR + \frac{QX}{U_2}.$$

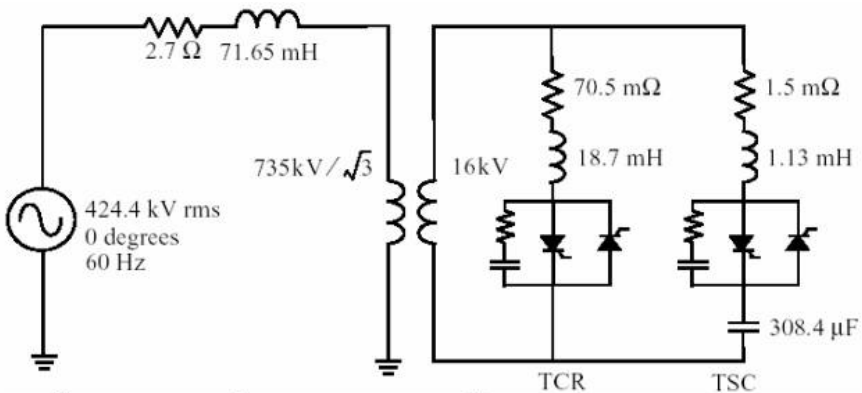
При этом

$$Q_{ск} \approx U_{2ж} - \frac{U_2}{X} \cdot U_{2ж}.$$

На схеме рис. 2.10 представлена однолинейная схема типового статического компенсатора падения напряжения (static VAR compensator), использующегося в ЛЭП напряжением 735 кВ. К вторичной обмотке трансформатора 735кВ/16 кВ подключены параллельно две переменные реактивные нагрузки: одна — реактор с тиристорным управлением (Thyristor controlled reactor) и другая —

конденсатор с тиристорным управлением (Thyristor switched capacitor).

Обе нагрузки, и TCR, и TSC, управляются вентилем, состоящим из двух ветвей с тиристорами, соединенными встречно-параллельно. RC демпфирующие цепочки соединены параллельно для каждого вентиля. TSC ветвь переключается, обеспечивая дискретное изменение SVC емкостного тока. Ветвь TCR является управляемой фазой для того, чтобы получить непрерывное изменение реактивной составляющей тока SVC цепи.



**Параметры трансформатора:**  
 Номинальная мощность 110 МВА  
**Первичная обмотка:** номинальное напряжение 424.4 кВ (среднеквадратическое);  
 Реактивное сопротивление утки = 0.15 о.е.;  
 Сопротивление = 0.002 о.е.;  
**Вторичная обмотка:** номинальное напряжение 16 кВ (среднеквадратическое);  
 Реактивное сопротивление утки = 0 о.е.;  
 Сопротивление = 0.002 о.е.

**Параметры тиристор:**  
 $R_{on} = 1 \text{ мОм}$ ;  $V_f = 14 \cdot 0.8 \text{ В}$  (14 тиристоров последовательно).  
**Параметры демпфирующей цепочки:**  
 $R_s = 500 \text{ Ом}$ ,  $C_s = 0.15 \text{ мФ}$ .

Рис. 2.10. Статический переменный однофазный TCR/TSC компенсатор

## Методика проведения лабораторной работы

### 1. Моделирование TCR нагрузки

- 1.1. Открыть новое окно и сохранить как «circuit3».
- 1.2. Открыть библиотеку PowerElectronics (силовой электроники) и добавить блок Thyristor (тиристор) в модель.
- 1.3. Открыть свойства блока Thyristor и установить параметры следующим образом:  $R_{on}=1e-3$ ;  $L_{on}=0$ ;  $V_f=14 \cdot 0.8$ ;  $R_s=500$ ;  $C_s=0.15e-6$ . Параметры демпфирующей цепочки задаются прямо в диалоговом окне блока Thyristor. Переименовать этот блок в «Th1».

1.4. Скопировать блок «Th1», переименовать в «Th2», подключить этот тиристор «Th2» встречно-параллельно с «Th1» так, как показано на рис. 2.10.

Поскольку схема демпфирующей цепочки уже была определена в «Th1», демпфирующую цепочку Th2 надо удалить.

1.5. Открыть свойства блока «Th2» и установить параметры для демпфирующей цепочки  $R_s=Inf$ ;  $C_s=0$ . После закрытия окна свойств демпфирующая цепочка исчезнет на значке «Th2».

1.6. Из библиотеки Elements добавить блок linear transformer (Линейный трансформатор). Переименовать его в «TrA» и открыть его свойства. Установить его номинальную мощность, частоту и параметры обмоток (1 обмотка – первичная обмотка; 2 обмотка – вторичная обмотка) так, как показано на рис. 2.10.

Реактивное сопротивление рассеяния и сопротивление каждой обмотки должны быть определены непосредственно в относительных единицах. Так как нет никакой третьей обмотки, то необходимо ввести «0» в поле, соответствующее обмотке 3. При этом третья обмотка исчезнет на блоке «TrA».

1.7. Установить значения параметров ветви намагничивания  $R_m$  и  $X_m$  равными [500,500]. Эти значения соответствуют 0.2% активным и индуктивным токам, как определено на рис. 2.10.

1.8. Добавить источник напряжения, последовательные RL элементы и блок заземления. Установить их параметры как показано на рис. 2.10. Добавить амперметр, чтобы измерять ток в первичной цепи.

1.9. Используя соответствующие соединительные шины (узлы), построить схему, показанную на рис. 2.11.

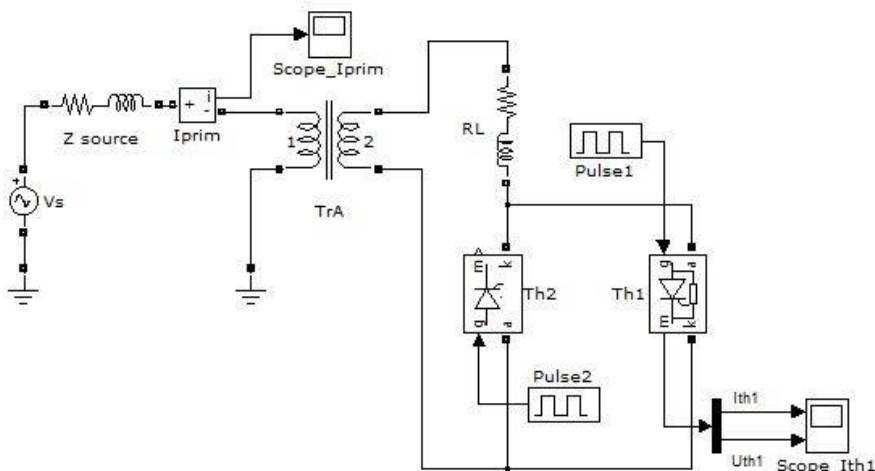


Рис. 2.11. Моделирование TCR цепи

Блоки тиристоров имеют выход с названием «m». В этот выход Simulink передает сигнал в форме вектора, содержащий ток тиристора ( $I_{ak}$ ) и его напряжение ( $V_{ak}$ ).

1.10. Соединить блок Demux (демультиплексор) из библиотеки Routing (распределение сигналов) Simulink с двумя выводами с выходом «Th1». Подключить два вывода Demux к блоку Scope с двумя входами, переименовать его в «Scope\_Th1». Чтобы создать второй вход осциллографа, в меню Scope properties/General установить в поле Number of axes (число осей) – 2. Назвать две линии подключения «Ith1» и «Vth1». Эти обозначения будут автоматически отображены сверху каждой линии.



1.11. Добавить к модели два synchronized pulse generators (синхронных генераторов импульсов) из библиотеки Sources Simuink, назвать их «Pulse1» и «Pulse2» и соединить их с управляющими выводами «Th1» и «Th2». Синхронные генераторы импульсов требуются для запуска (включения) тиристоров «Th1» и «Th2».

Теперь необходимо определить синхронизацию импульсов для «Th1» и «Th2». На каждом периоде должен быть послан импульс каждому тиристоры через  $\alpha$  градусов после пересечения нуля коммутационного напряжения тиристора.

1.12. Установить параметры для «Pulse1» и «Pulse2» следующим образом:

- период:  $1/60$  s;
- рабочий цикл: 1 % (3.6 градуса импульса);
- амплитуда: 1;
- начальное время:  $1/60+T$  для «Pulse1»;  $1/60+1/120+T$

для «Pulse2».

Импульсы, подаваемые на «Th1», отстают на 180 градусов относительно импульсов, подаваемых на «Th2». Задержка  $T$  используется чтобы определить угол коммутации. Чтобы получить угол коммутации  $\alpha=120$ , необходимо задать  $T$  в рабочем пространстве, напечатав  $T=1/60/3$ .

1.13. Открыть меню Simulation/Parameters (моделирование/параметры). Выбрать алгоритм интегрирования – ode23tb. Оставить заданные по умолчанию параметры, но установить relative tolerance (относительную погрешность) –  $1e-4$  и stop time (время останова) – 0.1.

1.14. Запустить моделирование. Результаты моделирования должны быть схожи с графиками, представленными на рис. 2.12.

1.15. Сохранить и проанализировать полученные графики.

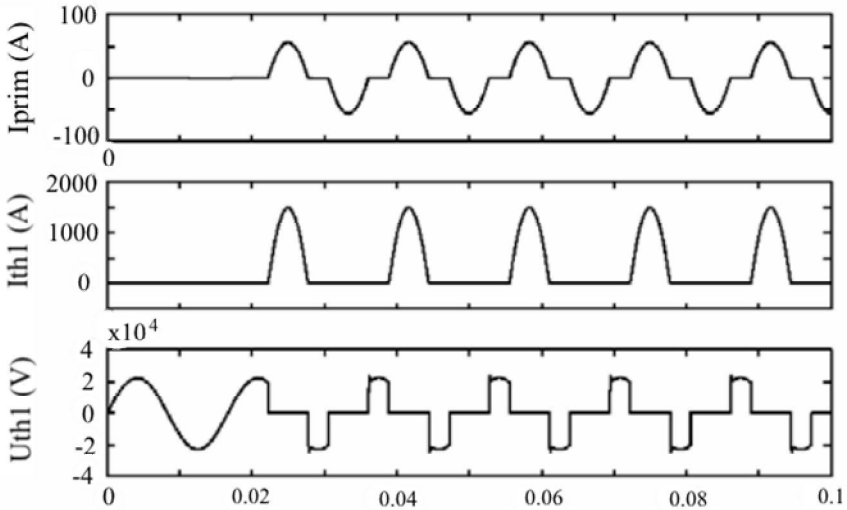


Рис. 2.12. Результаты моделирования TCR нагрузки

## 2. Моделирование TSC нагрузки

2.1. Сохранить «circuit3» под новым именем – «circuit4». Подключить конденсатор последовательно с RL нагрузкой и вентилями Th1/Th2 как показано на рис. 2.13.

2.2. Изменить параметры R, L и C как показано на рис. 2.10.

2.3. Подключить вольтметр и осциллограф, чтобы измерять напряжение на конденсаторе, как показано на рис. 2.13.

В отличие от TCR нагрузки, когда сигнал на отпирание тиристоров контролировался synchronous pulse generator, теперь к этим двум тиристорам будет применяться непрерывная подача открывающего сигнала.

2.4. Удалить генераторы импульсов. Добавить блок Step (шаг) из библиотеки Sources (источники) Simulink и подключить его вход к управляющим электродам тиристоров Th1 и Th2. Установить его параметр step time (время шага) в 1/60/4 (включение тиристоров в первом положительном пике источника напряжения). Конечная схема показана на рис. 2.13.

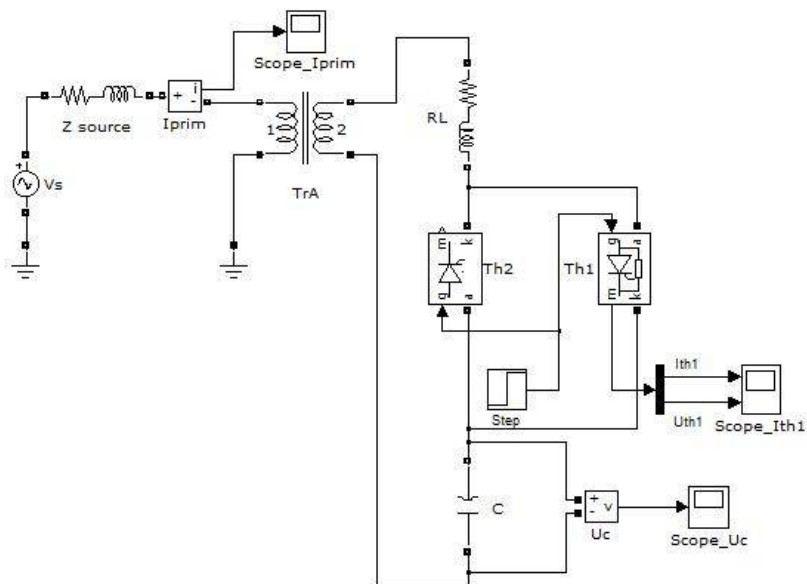


Рис. 2.13. Моделирование TSC нагрузки

2.5. Открыть все три осциллографа и запустить моделирование.

Поскольку конденсатор управляется нулем, на графике будет наблюдаться медленно затухающий переходный процесс для напряжения на конденсаторе и тока первичной обмотки с частотой 200 Гц с наложенными колебаниями с частотой 60 Гц.

2.6. Сохранить и проанализировать полученные графики.

При нормальной работы TSC нагрузки конденсатор заряжен начальной разностью потенциалов, оставшейся от предыдущего интервала коммутации. Чтобы минимизировать переходный процесс включения с заряженным конденсатором, тиристоры TSC нагрузки должны быть включены в момент времени, когда напряжение источника имеет максимальное значение и правильную полярность. Начальная разность потенциалов конденсатора соответствует установившейся разности потенциалов, когда тиристорный переключатель закрыт. Разность потенциалов конденсатора - 17.67 кВ (rms),

когда тиристор находится в открытом состоянии. В закрытом состоянии конденсатор должен быть заряжен до максимального напряжения.

$$U_c = 17670 \cdot \sqrt{2} = 24989\text{В}$$

Чтобы изменить начальное напряжение на конденсаторе необходимо использовать блок Powergui.

2.6.1. Открыть свойства блока Powergui. В меню Tools выбрать Initial States Settings / Display or Set Initial Conditions (начальные значения переменных, зависящих от состояния/просмотр или установка начальных значений). Появится список всех переменных, зависящих от состояния, с их заданными по умолчанию начальными значениями.

2.6.2. Задать начальное значение напряжения на конденсаторе C в демпфирующей цепочке  $U_c$  «snubber» равным 0.3141 В. Это напряжение точно не равно нулю, потому что демпфирующая цепочка дает путь циркуляции небольшого тока, когда оба тиристора закрыты.

2.6.3. Выбрать переменную, зависящую от состояния  $U_{c\_C}$ , и ввести -24989 в верхнее правое поле. Нажать на кнопку Apply (применить), чтобы сделать изменение этого значения.

2.6.4. Запустить моделирование. Убедиться, что переходные составляющие конденсаторного напряжения и тока исчезли.

2.6.5. Сохранить и проанализировать графики.

Типовые графики напряжения, полученные с различными начальными значениями, представлены на рис. 2.14.

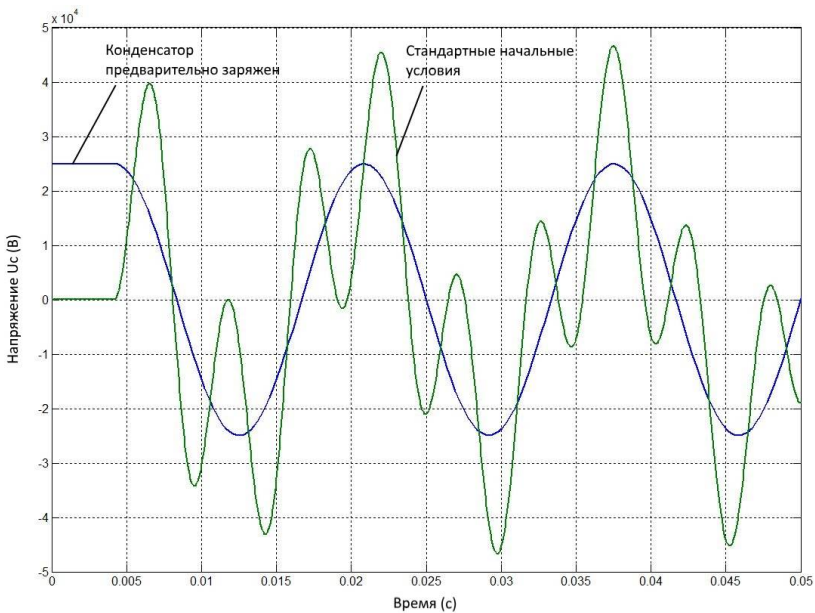


Рис. 2.14. Коммутационные напряжения конденсатора, полученные с различными начальными значениями

## **КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В СРЕДЕ MATLAB ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ**

### Теоретические сведения

В странах СНГ и далекого зарубежья много внимания отводится разработке методов исследований и расчета переходных процессов с целью создания СЭС нового технического уровня, сохранения устойчивости их режимов с необходимыми уровнями экономичности, качества электроэнергии, надёжности и безопасности эксплуатации. Решению задач, которые возникают при анализе и расчете переходных процессов, в значительной мере оказывает содействие широкое использование методов моделирования и средств вычислительной техники. Они дают возможность выбирать наиболее приемлемые схемные решения и электрические характеристики элементов СЭС, а также прогнозировать высокие значения показателей их экономичности и надежности не только в нормальных, а и в переходных режимах.

Одна из главных возможностей библиотек SimPowerSystems Matlab это моделирование переходных процессов в электрических цепях. Они могут быть получены с помощью механических коммутационных выключателей (автоматических размыкателей) или полупроводниковых устройств силовой электроники.

Важной характеристикой SimPowerSystems, которая появилась начиная с версии 2.0, является ее способность моделировать с непрерывными алгоритмами интегрирования с переменным шагом и с дискретными решателями. Для небольших систем алгоритмы с переменным шагом времени обычно быстрее, чем методы с фиксированным шагом, потому что число шагов интегрирования меньше. Однако, для больших

систем, которые содержат много состояний или много нелинейных блоков типа силовых электронных выключателей, лучше применять дискретизацию.

При дискретизации системы точность моделирования будет контролироваться величиной шага. Если используется слишком большой шаг, точность может быть недостаточной. Единственный способ узнать является ли выбранный шаг приемлемым состоит в том, чтобы повторять моделирование с различными шагами и искать компромисс (между скоростью и точностью), выбирая самый большой приемлемый шаг интегрирования. Обычно шаги интегрирования от 20 мс до 50 мс дают хорошие результаты при моделировании переходных процессов при коммутации в энергосистемах, рассчитанных на 50 Гц или 60 Гц, или систем, содержащих коммутационные электронные устройства типа диодов и тиристоров. Необходимо уменьшать шаг интегрирования для электронных силовых устройств с принудительной коммутацией. Эти устройства: полевой транзистор с изолированным затвором (IGBT), полевой транзистор (FET) и запираемый тиристор (GTO), которые работают с высокой частотой переключения.

Например, для модели широтно-импульсного (PWM) инвертора, работающего с частотой 8 кГц, наименьший шаг интегрирования – 1 мс.

## Подготовка к работе

1. Открыть систему «circuit1» и сохранить под именем «circuit2».

Перед добавлением выключателя необходимо изменить принципиальную схему «circuit2». SimPowerSystems позволяет группировать несколько компонентов системы в подсистему. Эта особенность полезна, когда необходимо упростить сложные принципиальные схемы.

2. Выделить два блока с именами  $R_{s\_eq}$  и  $Z_{eq}$ , щелкнуть правой кнопкой мыши и использовать меню Create

Subsystem (создать подсистему). Эти два блока теперь сформировали новый блок с именем Subsystem (подсистема) как показано на рис. 3.1.

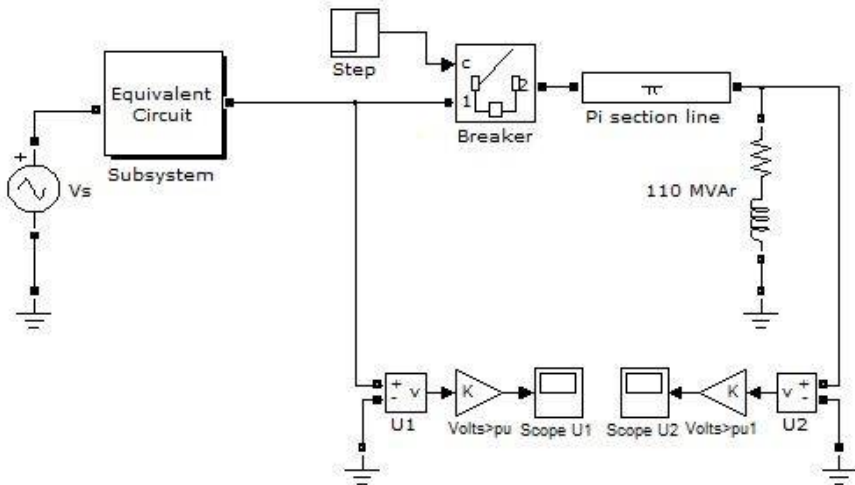


Рис. 3.1. Создание подсистемы

3. Используя меню Edit/Mask Subsystem, заменить значок этой подсистемы. На вкладке Icon (значок) редактора маски напечатать следующую команду рисунка: disp ('Equivalent\nCircuit'). Чтобы показать тень для выбранного блока на схеме, необходимо использовать меню Format/Show Drop shadow. Для просмотра содержимого подсистемы дважды щелкнуть на блоке Subsystem.

4. Открыть библиотеку Elements SimPowerSystems, добавить блок Breaker (выключатель) в «circuit2».

Автоматический выключатель – нелинейный элемент, смоделированный идеальным выключателем последовательно с сопротивлением. Из-за ограничений моделирования, это сопротивление не может быть установлено в 0. Однако значение этого сопротивления может быть установлено очень маленьким, например, 0,001 Ом, и его присутствие не будет влиять на работу схемы.



5. Открыть диалоговое окно блока Breaker и установить его параметры следующим образом:  $R_{on}=0.001$  Ом (сопротивление в открытом состоянии); Initial state (начальное состояние)=0 (open (разомкнут));  $R_s=\infty$ ;  $C_s=0$ ; Switching times (время переключения)=  $[(1/60)/4]$  с.

6. Добавить выключатель последовательно с передающим концом линии, затем перестроить схему, как показано на рис. 3.1.

7. Подключить блок Scope из библиотеки Sinks Simulink к выходу блока Gain, измеряющего напряжение  $U_2$ . Открыть свойства блока Scope (измеритель) и перейти на вкладку Data history (хронология данных). Выбрать Save data to workspace (сохранение данных в рабочее пространство) и определить Variable name (имя переменной) –  $U_2$ , в которую будут сохраняться результаты моделирования. После этого изменить опцию Format для  $U_2$  на Array (массив).

8. Снять галочку Limit rows to last. Это позволит отображать полную форму сигнала в течение длинных моментов моделирования.

### Методика проведения лабораторной работы

1. Непрерывные алгоритмы интегрирования с переменным шагом

1.1. Открыть свойства блока PI sectionLine (линии PI секции) и убедиться, что число секций установлено в 1.

Поскольку теперь система содержит выключатели, необходим жесткий алгоритм интегрирования, чтобы смоделировать схему.

1.2. Открыть меню Simulation/Parameters. В секции Solver (решатель) выбрать переменный шаг и жесткий алгоритм интегрирования ode23tb. Сохранить заданные по умолчанию параметры (relative tolerance (относительная погрешность) –  $1e-3$ ) и установить stop time (время остановки) – 0.02 секунды.

1.3. Открыть Scores и запустить моделирование. Обратить внимание на формы сигналов на входе и выходе, полученные на ScoreU1 и ScoreU2.

1.4. Скопировать переменную «U2» в «U2\_1», введя следующую команду в окне MATLAB:

U2\_1=U2.

Теперь две эти переменные содержат форму сигнала, полученную для модели с одной  $\pi$  секцией.

1.5. Открыть диалоговое окно PI sectionLine и заменить число секций с 1 на 10.

1.6. Запустить моделирование. Обратить внимание на формы сигналов на входе и выходе, полученные на ScoreU1 и ScoreU2.

1.7. Скопировать переменную U2 в «U2\_10».

1.8. Сохранить систему как «circuit2\_10pi» для использования в дальнейшем.

1.9. Удалить блок  $\pi$  sectionline и заменить его блоком Distributed Parameter Line (линия с распределенными параметрами). Установить число фаз равным 1 и использовать те же самые параметры R, L, C и параметры длины, которые использовались для блока  $\pi$  sectionline. Сохраните эту систему как «circuit2\_dist».

1.10. Запустить моделирование и сохранить напряжение U2 под именем «U2\_d».

1.11. Сравнить три формы сигналов, полученные тремя моделями линии. Каждая переменная U2\_1, U2\_10 и U2\_d – это матрица, имеющая два столбца, где время находится в столбце 1, а напряжение находится в столбце 2.

Построить графики этих трех сигналов в одних осях, введя следующую команду:

```
plot (U2_1(:,1), U2_1(:,2), U2_10(:,1), U2_10(:,2),  
U2_d(:,1), U2_d(:,2)).
```

Эти сигналы представлены на рис. 3.2. Модель одной секции  $\pi$  не реагирует на частоты выше, чем 229 Гц. Модель с 10 секциями  $\pi$  дает лучшую точность, но для получения высокочастотных колебаний необходимо использовать

discretization (дискретизацию) линии. На рис. 3.2 видно время задержки прохождения сигнала, равное 1.03 мс, связанное с распределенным параметром линии.

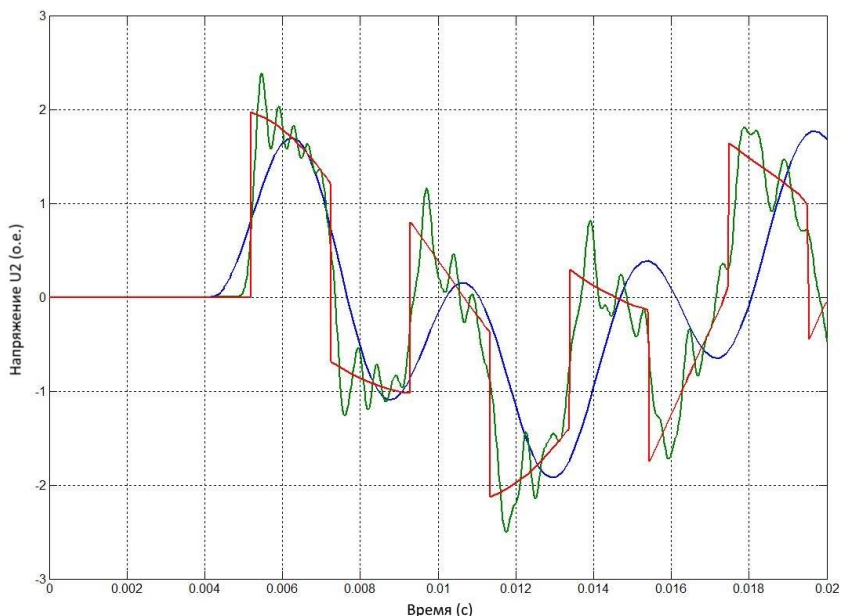


Рис. 3.2. Выходное напряжение, полученное тремя различными моделями линии

## 2. Discretizing (дискретизация) электрической системы

2.1. Открыть систему «circuit2\_10pi».

2.2. Добавить блок Powergui. Открыть его и установить `sampletime` (время выборки) –  $25 \times 10^{-6}$  с. При перезапуске моделирования система станет discretized (дискретизированной) и будет использовать `tustin` - метод (соответствующий интегрированию методом трапеций) с `sampletime`, равным 25 мкс.

2.3. Открыть меню Simulation/Parameters/Solver и установить simulation time (время моделирования) – 0.2 с. Запустить моделирование.

Как только система – discretized (дискретизирована), в электрической системе нет больше непрерывных устройств, поэтому нет необходимости в алгоритме непрерывного интегрирования с переменным шагом моделирования.

2.4. В меню Simulation/Parameters/Solver выбрать опцию Fixed-step/discrete(no continuous states) и установить Fixed-step – 25 мкс.

2.5. Чтобы измерить время моделирования, необходимо перезапустить моделирование, вводя следующие команды:

`tic; sim (gcs); toc.`

Когда моделирование закончится, время, потраченное на расчет, отобразится в окне MATLAB.

2.6. Вернуться к моделированию с непрерывным алгоритмом интегрирования. Сравнить время моделирования непрерывной и дискретной систем. Убедиться, что дискретная система рассчитывается быстрее, чем непрерывная система.

2.7. Чтобы сравнивать точность этих двух методов, выполнить следующие три расчета:

1. Рассчитать непрерывную систему;
2. Рассчитать дискретную систему при  $T_s=25$  мкс;
3. Рассчитать дискретную систему при  $T_s=50$  мкс.

Для каждого моделирования сохранить напряжение  $U_2$  под разными именами. Использовать соответственно  $U_{2c}$ ,  $U_{2d25}$  и  $U_{2d50}$ .

2.8. Построить все сигналы напряжения  $U_2$  в одних осях, введя следующую команду:

`plot(U2c(:,1),U2c(:,2),U2d25(:,1),U2d25(:,2),U2d50(:,1),U2d50(:,2)).`

Типичные графики сигналов приведены на рис. 3.3.

2.9. Используя кнопку zoom (масштаб) графического окна, изменить масштаб изображения от 4 до 12 мс. В данном

масштабе заметны различия высокочастотных колебаний переходного процесса.

## 2.10. Сохранить и проанализировать графики.

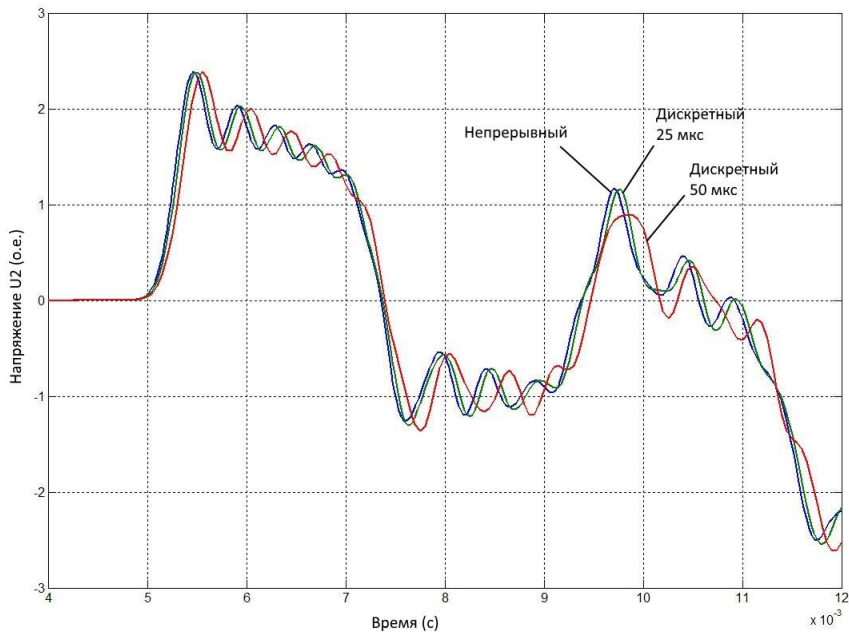


Рис. 3.3. Графики сигналов напряжения при разных значениях дискретности

## **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ГОРЯЧЕГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

### Теоретические сведения

Одним из наиболее распространенных типов производителей электрической энергии являются тепловые электростанции. Внешний вид типовой тепловой электростанции показан на рис. 4.1.



Рис. 4.1. Тепловая электростанция [12]

Государственные районные электрические станции (ГРЭС) оборудованы специальными конденсационными турбинами. Они предназначены для получения электроэнергии и не используются для выработки тепла и обогрева зданий.

На тепловых конденсационных электростанциях (КЭС) химическая энергия сжигаемого топлива преобразуется в парогенераторе (котле) в энергию водяного пара, приводящего во вращение турбоагрегат (паровую турбину, соединенную с генератором). Механическая энергия вращения преобразуется генератором в электрическую энергию. После этого пар конденсируется и снова становится водой, которая возвращается в систему труб. Получается замкнутый процесс.

Топливом для электростанций служат уголь, торф, горючие сланцы, а также газ и мазут.

Значительная удаленность КЭС от потребителей электроэнергии определяет выдачу мощности на высоких и сверхвысоких напряжениях 110...750 кВ, а сами электростанции оснащаются блоками мощностью 200...800 МВт, что обеспечивает быстрое наращивание мощностей электростанции, приемлемую себестоимость электроэнергии и стоимость установленной мощности. Блок представляет собой отдельную электростанцию со своим основным и вспомогательным оборудованием и центром управления блочным щитом. Связь между соседними блоками по технологическим линиям обычно не предусматривается. Построение КЭС по блочному принципу дает определенные технико-экономические преимущества.

Механизмы и установки, обеспечивающие нормальное функционирование всех этих элементов, входят в так называемую систему собственных нужд станции (блока).

КПД электростанции составляет для современных КЭС не более 40...42%. Баланс производства и потребления электроэнергии в системе всегда характеризуется равенством производства и потребления с учетом компенсации потерь в системе и расходов на собственные нужды.

Учитывая низкий КПД КЭС, а также необходимость генерации не только электрической, но и тепловой энергии для потребителей, широкое применение находят следующий тип тепловых электростанций – ТЭЦ. Последние предназначены для централизованного снабжения промышленных

предприятий и городов электроэнергией и теплом, отличаясь от КЭС использованием тепла, "отработавшего" в турбинах пара, для нужд промышленного производства, отопления, кондиционирования воздуха и, главное, горячего водоснабжения (ГВС), чем достигается значительная экономия топлива по сравнению с выработкой электроэнергии на КЭС и получением тепла от местных котельных. Поэтому ТЭЦ получили широкое распространение в районах (городах) с большим потреблением тепла и электроэнергии.

Особенности технологической схемы ТЭЦ показаны на рис. 4.2. Основное отличие заключается в специфике пароводяного контура и способе выдачи электроэнергии.

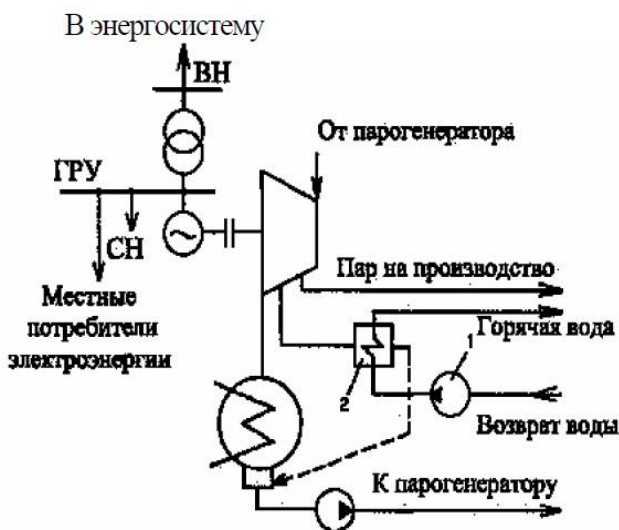


Рис. 4.2. Технологическая схема ТЭЦ:  
1 – Сетевой насос; 2 – Сетевой подогреватель [13]

Специфика электрической части ТЭЦ определяется положением электростанции вблизи центров электрических нагрузок. В этих условиях часть мощности может выдаваться в местную сеть непосредственно на генераторном напряжении.



С этой целью на электростанции создается обычно генераторное распределительное устройство (ГРУ). Избыток мощности выдается, как и в случае КЭС, в энергосистему на повышенном напряжении.

Как было отмечено выше, одним из потребителей тепловой энергии на промышленном предприятии является система горячего водоснабжения, которая используется в том числе для отопления промышленных помещений, офисов, подогрева технической и бытовой воды.

Схемы горячего водоснабжения (ГВС) бывают трех типов: накопительного, проточного, комбинированного (проточный + накопительный). Соответственно для каждого типа схем используются свои компоненты и схемные решения.

Как правило, схема накопительного типа применяется для ГВС коттеджей. Разбор горячей воды в доме имеет периодический пиковый характер, т.е. он интенсивней во время завтрака, обеда и ужина. В качестве накопительной емкости используется бойлер. Типовая схема подключения бойлера к теплоносителю и холодному водоснабжению (ХВС) показана на рис. 4.3.

Работа схемы для приготовления горячей воды, показанной на рис. 4.3, осуществляется следующим образом. В тело бойлера вварена гильза, в которую установлен датчик регулируемого термостата. Этот термостат измеряет температуру воды в бойлере. Если измеренная температура в бойлере ниже установленной уставки термостата, то его контакты переходят в состояние «запроса» на приготовление ГВС. По этому сигналу происходит включение котла и насоса К2 в работу. При достижении температуры воды в бойлере установленной уставки термостата его контакты переходят в состояние «отбой запроса» на приготовление горячей воды, при этом котел и насос К2 переходят в отключенное состояние.

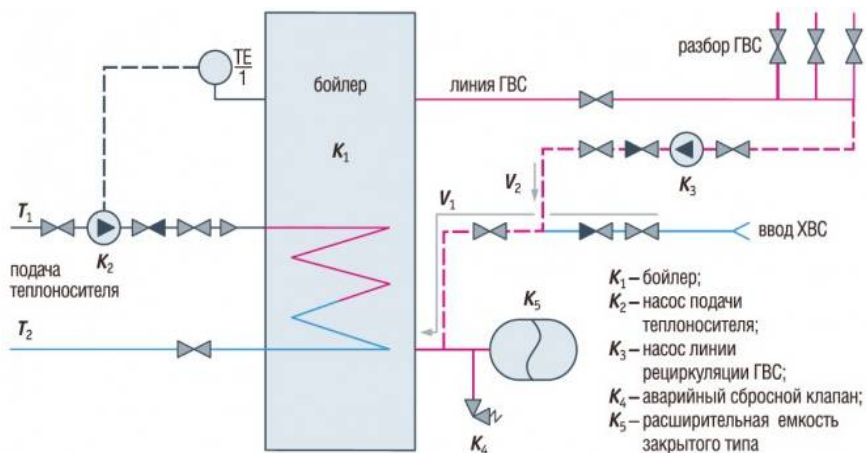


Рис. 4.3. Типовая схема подключения бойлера в накопительной схеме [14]

Ввод ХВС в бойлер осуществляется через обратный клапан, он предотвращает «уход» ГВС во время исчезновения ХВС. На входе в бойлер до его запорной арматуры установлен аварийный сбросной клапан K4, который защищает бойлер от высокого давления, и установлена расширительная емкость закрытого типа K5, для компенсации температурных расширений воды. Рециркуляция ГВС осуществляется от последнего водоразборного крана.

Схему ГВС проточного типа, как правило, применяют на производствах для технологических линий, которые используют постоянный разбор ГВС. В качестве нагревательного элемента ГВС используются теплообменники разных типов (пластинчатые, трубчатые и др.), однако большую популярность завоевали теплообменники пластинчатого типа. Типовая схема подключения пластинчатого теплообменника к теплоносителю и ХВС показана на рис. 4.4.

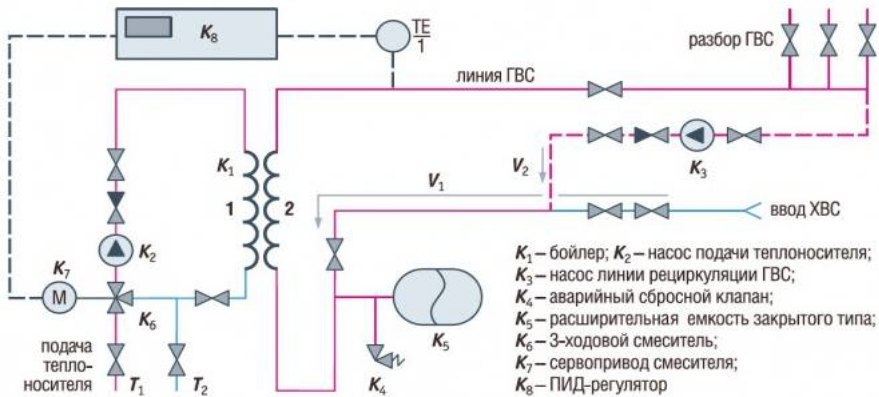


Рис. 4.4. Типовая схема проточного теплообменника с регулированием по первичной стороне теплообменника [14]

Работа схемы для приготовления горячей воды осуществляется следующим образом. По первичной стороне теплообменника установлен насос со своим смесителем и сервоприводом. Температуру ГВС измеряют ПИД-регулятором  $K_8$ , при пониженной температуре ГВС ПИД-регулятор подает сигнал на открытие смесителя, а при повышенной — на закрытие.

Принцип ПИД-регулирования состоит в следующем. Измеряемая температура ГВС сравнивается с уставкой (например, уставка равна  $55\text{--}60^\circ\text{C}$ ), и чем выше разница между измеренной температурой и заданной уставкой, тем больше по времени прибор  $K_8$  выдает сигнал на закрытие смесителя. По истечении установленного времени на измерение прибор  $K_8$  снова измеряет температуру ГВС и сравнивает ее с уставкой, разница температуры уменьшилась и прибор выдает более короткий по времени сигнал на закрытие смесителя.

Методом динамического приближения измеренная температура ГВС и уставки совпадут, ПИД-регулятор перестанет выдавать управляющие сигналы на смеситель. То же самое регулирование происходит и при пониженной измеренной температуре ГВС относительно уставки, в этом

случае ПИД-регулятор будет выдавать сигнал на сервопривод для открытия смесителя.

При любом возмущении температуры ГВС ПИД-регулятор возобновит свою работу для получения требуемой температуры ГВС. При таком регулировании происходит смешивание горячей воды, поступающей от котла, и обратной воды, поступающей от теплообменника, таким образом поддерживается постоянная температура ГВС. Ввод ХВС на теплообменник осуществляется через обратный клапан, он предотвращает «уход» ГВС во время исчезновения ХВС. На входе в теплообменник до его запорной арматуры установлен аварийный сбросной клапан К4, который защищает теплообменник от высокого давления, и установлена расширительная емкость закрытого типа К5, для компенсации температурных расширений воды.

Рециркуляция ГВС осуществляется от последнего водоразборного крана. Схемы приготовления ГВС на теплообменниках должны работать только с линией рециркуляции, в редких случаях линия рециркуляции не используется. Для работы линии рециркуляции на ней установлен насос К3. Во время разбора горячей воды проток воды V1 идет от ХВС, когда нет разбора горячей воды, проток воды V2 идет с линии рециркуляции. На базе этой схемы существуют и ее разновидности, т.е. с регулированием температуры по вторичной стороне теплообменника. Такая схема показана на рис. 4.5.

Преимуществом этой схемы является то, что диаметр труб по вторичной стороне теплообменника, как правило, меньше диаметра труб, используемых на первичной стороне теплообменника. Это снижает стоимость сервопривода и незначительно упрощает монтаж. Кроме того, схема с регулированием температуры ГВС по вторичной стороне теплообменника позволяет получить несколько разных температур с одного теплообменника.

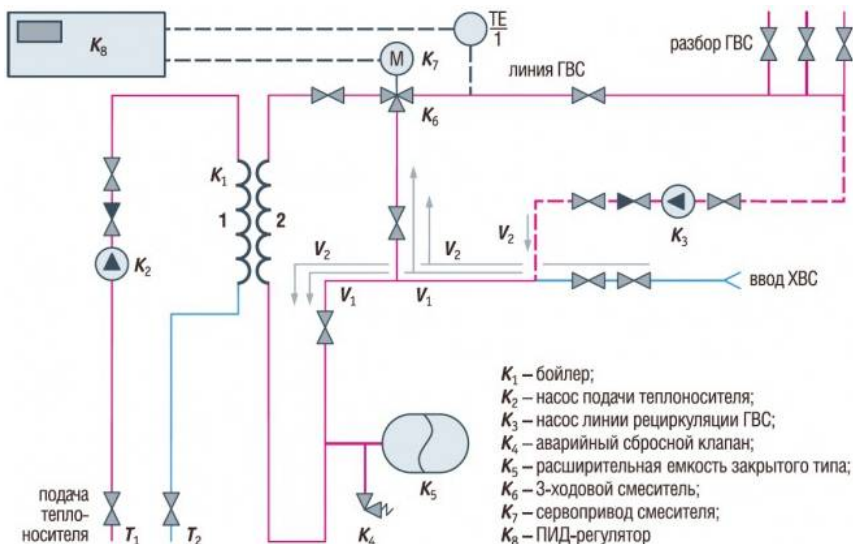


Рис. 4.5. Типовая схема приготовления ГВС с регулированием температуры по вторичной стороне теплообменника [14]

Схему ГВС комбинированного типа (т.е. проточный и накопительный водонагреватели) как правило, применяют на производствах для технологических линий, которые используют постоянный и периодический пиковый разбор ГВС (рис. 4.6 и 4.7).

В качестве нагревательного элемента ГВС используется проточный теплообменник. Бойлер используется как накопитель тепловой энергии для пикового разбора ГВС. Теплообменник в бойлере не используется, поскольку он более инертный, чем теплообменник проточного типа. Схема, показанная на рис. 4.6, соответствует работе проточного теплообменника с регулированием по первичной стороне теплообменника, а схема, показанная на рис. 4.7, соответствует работе проточного теплообменника с регулированием по вторичной стороне теплообменника.

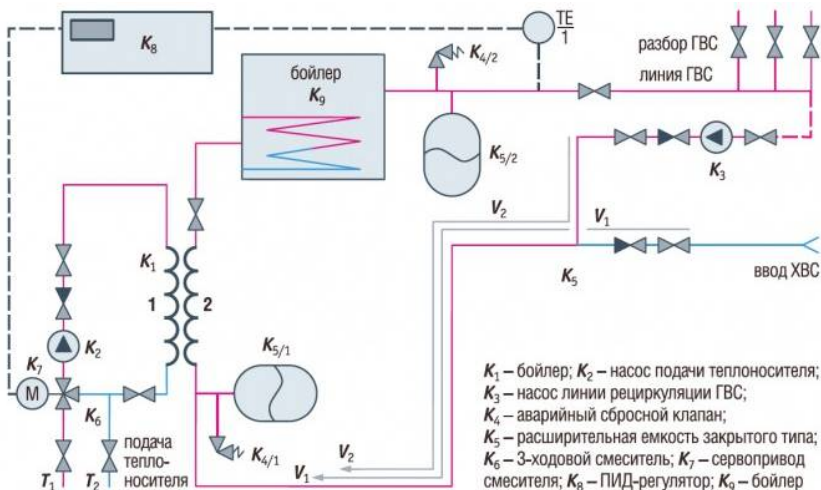


Рис. 4.6. Типовая схема приготовления ГВС комбинированного типа при использовании постоянного пикового разбора ГВС [14]

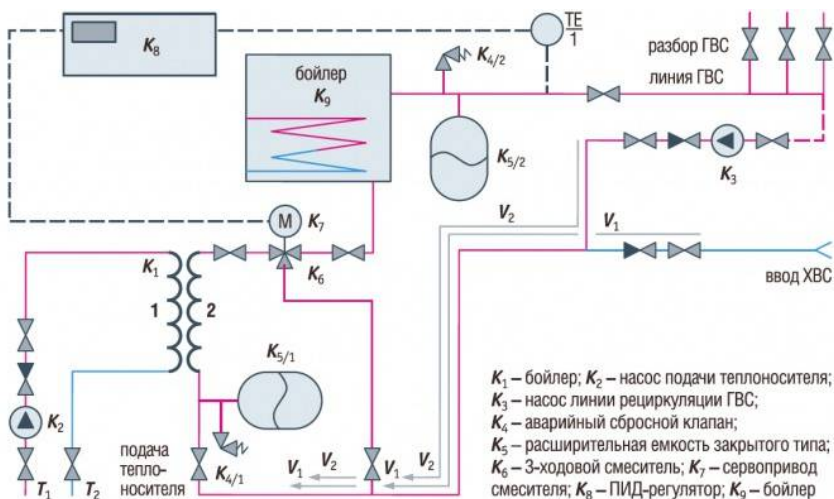


Рис. 4.7. Типовая схема приготовления ГВС комбинированного типа при использовании периодического пикового разбора ГВС [14]

## Описание физической модели

Внешний вид лабораторного стенда изображен на рис. 4.8. Схема рассматриваемой физической модели является упрощенной накопительной схемой ГВС. Гидравлическая схема физической модели приведена на рис. 4.8. Вместо бойлера и линии подачи теплоносителя используется проточный водонагреватель. Резервуар емкостью 40 л выполняет функции теплообменника. В него поступает нагретая вода и из него она расходуется. Большой объем выбран для создания большей инерционности тепловых процессов, то есть для большего сходства с реальной системой. Потребителем горячей воды является радиатор с вентилятором мощностью 110 Вт. В радиаторе нагретая вода охлаждается, имитируется расход тепла системой отопления и горячего водоснабжения. Перекачивает воду от нагревателя к радиатору насос Wilo PB-201EA мощностью 340 Вт. На стенде также смонтирован расширительный бак для предотвращения гидроударов, так как отсутствует система плавного пуска насоса. Давление в системе измеряется электроконтактным манометром, а скорость протекания воды – счетчиком расхода. Система является замкнутой, поэтому ХВС отсутствует. Его роль выполняет охлажденная вода, поступающая от радиатора. Функциональная схема, отражающая основные элементы физической модели, приведена на рис. 4.10. Электрическая принципиальная схема лабораторного стенда приведена на рис. 4.11.

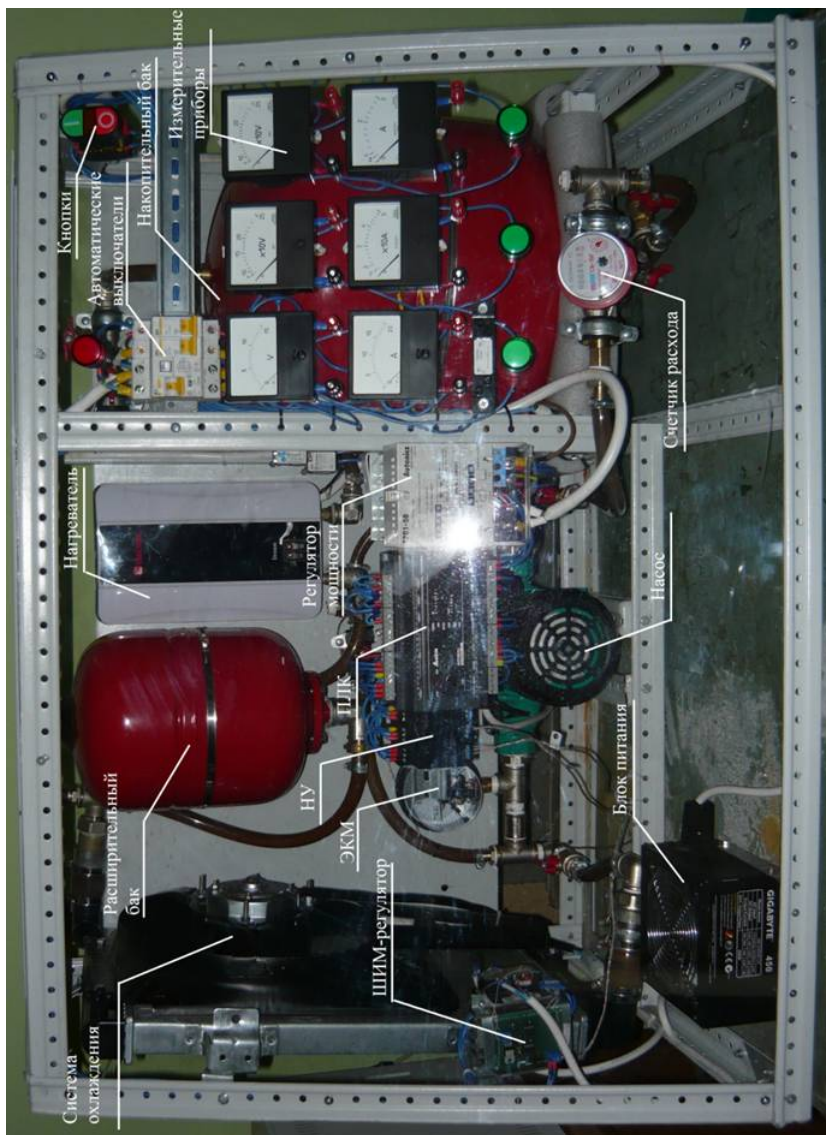


Рис. 4.8. Внешний вид лабораторного стенда



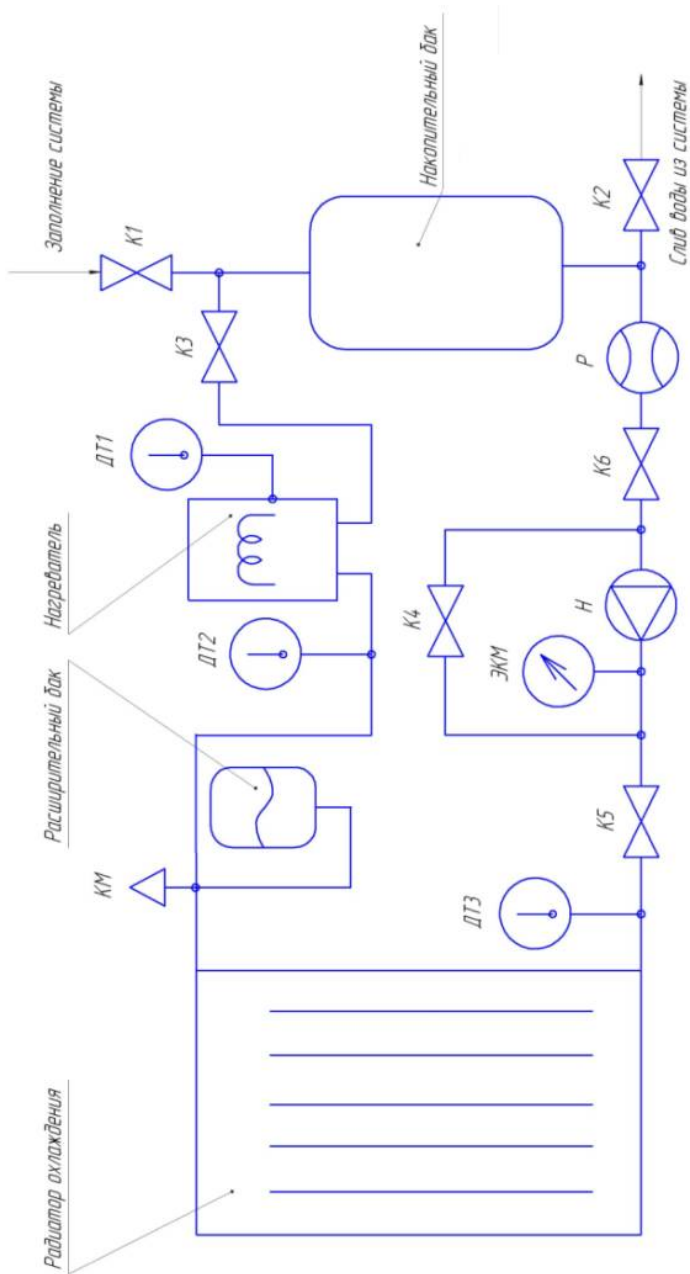
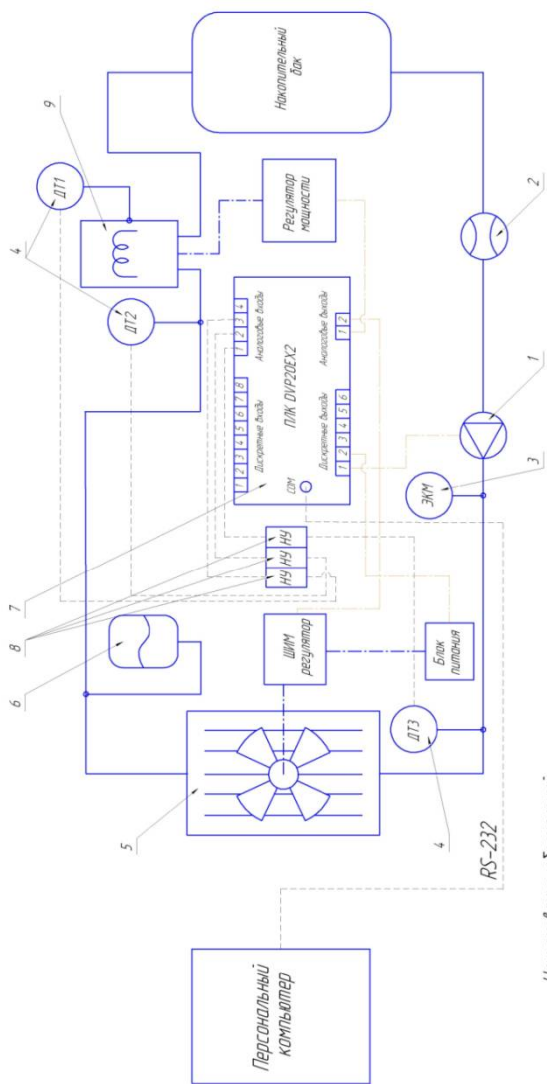


Рис. 4.9. Гидравлическая схема физической модели



Наименование обозначений

Обозначение	Наименование
1	Циркуляционный насос Wilo PB-201EA
2	Счетчик расхода воды
3	Электроработный манометр
4	Датчики температуры ДТС034-50M
5	Система охлаждения
6	Расширительный бак
7	Программируемый логический контроллер Delta DVP20E2
8	Нормирующие усилители НУ-01
9	Проточный нагреватель Thermex Stream 700

Рис. 4.10. Функциональная схема физической модели

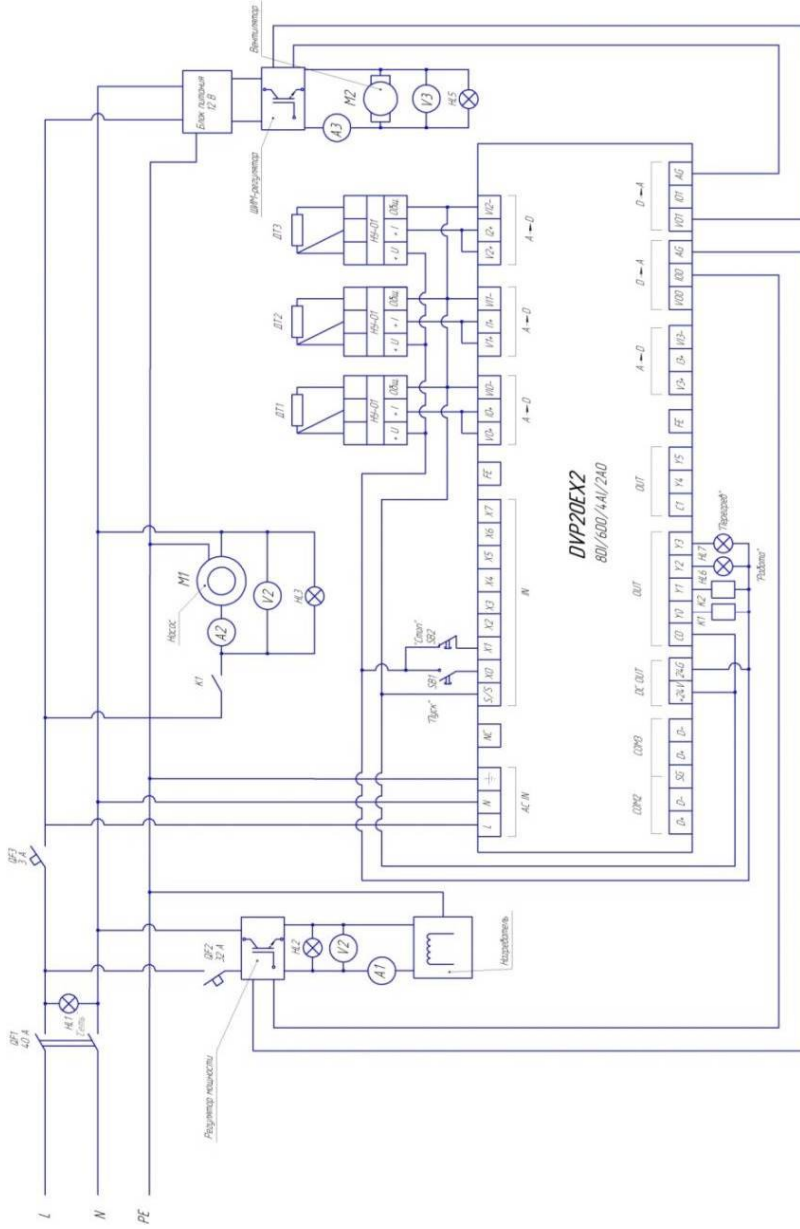


Рис. 4.11. Электрическая принципиальная схема лабораторного стенда

## Указание мер безопасности

Перед началом выполнения лабораторных работ, студенты обязаны изучить инструкцию по технике безопасности и противопожарным мерам для работающих в лаборатории, ознакомиться с расположением силового электрооборудования и распределительного щита.

Во избежание несчастных случаев при работе в лаборатории необходимо строгое выполнение следующих основных положений правил техники безопасности:

1. До начала работы все ее участники должны на месте подробно ознакомиться со схемой соединений, усвоить расположение электрических цепей и элементов электрооборудования, обратив особое внимание на место расположения выключателей со стороны питающей сети.

2. Сборка схемы и ее изменение должны производиться без напряжения, при отключенных выключателях со стороны питающей сети.

3. Нельзя прикасаться руками к неизолированным проводам, соединительным клеммам и другим частям схемы, находящимся под напряжением.

4. Перед включением установки необходимо проверить, что отсутствует опасность прикосновения к токоведущим элементам схемы.

5. В случае неисправности установки необходимо её немедленно отключить и сообщить об этом преподавателю.

6. Несоблюдение правил техники безопасности может вызвать несчастный случай с людьми и выход из строя дорогостоящего оборудования.

7. Если произойдет несчастный случай, то лабораторную установку следует немедленно обесточить, а пострадавшему оказать первую помощь.

8. При возникновении в схеме установки аварийных режимов (перегрузка током, электрические пробой изоляции, короткие замыкания, чрезмерное увеличение скорости

вращения электрических машин и т. д.) установка должна быть отключена и об этом следует сообщить преподавателю.

9. Одежда лиц, работающих с вращающимися агрегатами, должна быть аккуратной, чтобы полностью исключить опасность захвата частей одежды вращающимися частями машин. Прическа не должна ограничивать поле зрения работающего во избежание случайного прикосновения элементов схем, находящихся под напряжением.

### Методика испытаний по стенду Подготовительная часть

1. Подключить один конец интерфейсного кабеля к разъему на лицевой панели микроконтроллера, другой – к порту RS-232 на задней стороне корпуса системного блока персонального компьютера.

2. Вставить силовую вилку питания стенда в соответствующую розетку.

3. Включить автомат QF1, переведя ручку автомата в верхнее положение. Нажать на кнопку «Т» (Тест) на автомате, при этом автомат должен отключиться (ручка отщелкнуться в нижнее положение). Отключение автомата после нажатия кнопки «Т» свидетельствует об исправной работе. При неисправности остановить выполнение лабораторной работы, отключить автомат вручную, вытащить силовую вилку питания из розетки и сообщить о неисправности преподавателю или ассистенту.

4. При исправной работе автомата QF1 включить автоматы QF2, QF3, переведя ручки автоматов в верхнее положение. При этом должна загореться лампа «Сеть».

5. Убедиться, что на лицевой панели ПЛК загорелся индикатор «Power». Дождаться, пока на лицевой панели ПЛК загорится индикатор «Run». Если индикатор «Power» не загорелся или индикатор «Run» не загорелся спустя минуту после индикатора «Power», остановить выполнение лабораторной работы, отключить автоматы, вытащить силовую

вилку питания из розетки и сообщить о неисправности преподавателю или ассистенту.

6. При исправной работе ПЛК на персональном компьютере запустить ярлык «Collector», находящийся на рабочем столе. После этого должна запуститься программа SCADA-системы.

7. Убедиться, что установлена связь ПЛК – SCADA-система по интерфейсу RS-232. Для этого проверить наличие показаний датчиков температуры в окне программы. При отсутствии показаний сообщить о неисправности преподавателю или ассистенту.

### Экспериментальная часть

8. В программе нажать кнопку «Старт». При этом в течение 10-ти секундного интервала времени должен включиться насос. Если насос не включился, остановить выполнение лабораторной работы, нажать в программе на кнопку «Стоп», сообщить о неисправности преподавателю или ассистенту.

9. Включить выключатель охладителя и нагревателя, нажав на соответствующие кнопки «Вкл.».

10. С помощью ползунка задания мощности последовательно изменять мощность нагревателя от 0% до 100%, перемещая ползунок вверх. При этом следить за показаниями датчиков температуры и графиками мощности. Показания датчиков не должны превышать 60°C, для этого мощность нагревателя следует уменьшать до 0% при показаниях хотя бы одного датчика температуры, равных 55°C. Отключить нагреватель, нажав на соответствующую кнопку «Выкл.».

11. С помощью ползунка задания мощности последовательно изменять мощность охладителя от 0% до 100%, перемещая ползунок вверх. При этом следить за показаниями датчиков температуры и графиками мощности.

Отключить охладитель, нажав на соответствующую кнопку «Выкл.».

12. Согласно заданию от преподавателя или ассистента установить мощность охладителя. Вручную изменять мощность нагревателя так, чтобы температура потребителя ( $t_3$ ) была равна заданной с погрешностью  $\pm 5^\circ\text{C}$ .

13. Выключить нагреватель и охладитель, нажав на соответствующие кнопки «Выкл.». Нажать на кнопку «Стоп». Отключить автоматы, вытащить силовую вилку питания из розетки.

#### Обработка данных

14. Сохранить и проанализировать графики, полученные в результате проведения работ.

## **ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ УСТРОЙСТВ РЕГУЛИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ И НАПРЯЖЕНИЯ НА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ОБЪЕКТАХ**

### Теоретические сведения

Учитывая огромное разнообразие технологических процессов и те требования, которые они предъявляют исполнительным механизмам по целому ряду параметров (скорость, точность, КПД, быстродействие и т.д.), существует жесткая необходимость применения современных автоматизированных устройств управления ими. Наиболее распространенной системой управления современными асинхронными электроприводами (ЭП) являются системы с частотными преобразователями (ПЧ-АД). Но они достаточно дороги. Наряду с преобразователями частоты в регулируемом асинхронном электроприводе используется тиристорный регулятор напряжения (ТРН). Он изменяет амплитуду напряжения, подводимого к потребителю, без изменения частоты и используется главным образом для управления пуском (устройства плавного пуска) и осуществления ряда других полезных функций.

Применение устройств плавного пуска электродвигателей обеспечивает ограничение скорости нарастания и максимального значения пускового тока от нуля до номинального значения в течение заданного времени. В большинстве случаев устройство плавного пуска строится на основе тиристорного регулятора напряжения. В электронных устройствах плавного пуска ограничение тока достигается путём плавного нарастания напряжения на обмотках электродвигателя. Это позволяет во время пуска удерживать параметры электродвигателя (ток, напряжение и т. д.) в безопасных пределах, что снижает вероятность перегрева



обмоток и устраняет рывки в механической части привода, а также вероятность возникновения гидравлических ударов в трубах и задвижках в момент пуска и остановки. В конечном итоге правильно выбранное и настроенное устройство плавного пуска повышает показатели долговечности и безотказности электродвигателя и его привода. Аналогичные системы регулирования напряжения и электрической мощности широко применяются и для разнообразных термических установок в промышленности.

Принципы работы таких устройств можно продемонстрировать на примере регулятора мощности нагревателя, входящего в состав лабораторного стенда, используется регулятор мощности активной однофазной нагрузки Autonics SPC1-50, номинальный ток которого составляет 50А. На примере данного регулятора возможно рассмотрение принципов функционирования тиристорного регулятора напряжения. Регулятор имеет различные способы задания мощности:

- токовый сигнал 4-20 мА;
- сигнал напряжения 1-5 В;
- внешний сигнал напряжения 24 В;
- внешний переменный резистор (1 кОм);
- внешняя контактная группа (вкл./выкл.).

Среди функций регулятора имеются:

- подстройка (ограничение) выходной мощности;
- функция плавного пуска;
- световая индикация выхода;
- автоматическая адаптация к частоте сетевого напряжения 50/60 Гц.

AutonicsSPC1 использует различные способы регулирования, которые выбираются с помощью переключателя:

- регулирования изменением фазы (рис. 5.1);
- регулирование изменением количества полных периодов напряжения, передаваемых в нагрузку (коммутация при переходе через нуль) (рис. 5.2);

– двухпозиционное регулирование (коммутация при переходе через нуль) (рис. 5.3).

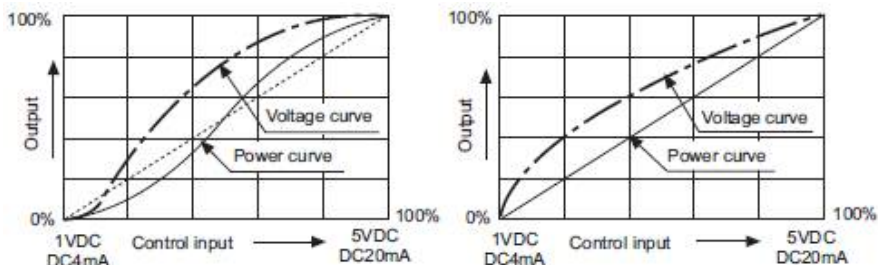


Рис. 5.1. Выходная мощность в зависимости от управляющего входа [18]

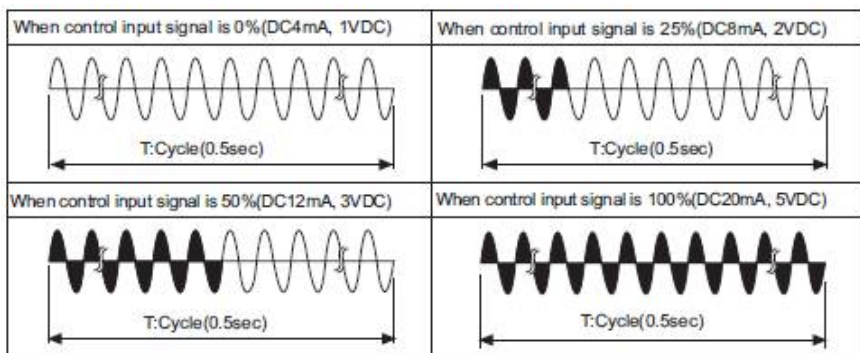


Рис. 5.2. Количество полных периодов напряжения в зависимости от управляющего входа [18]

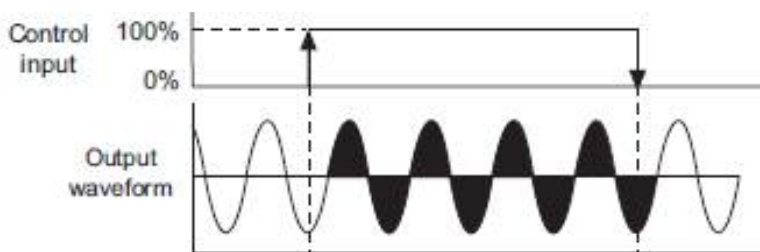


Рис. 5.3. Выходная характеристика при двухпозиционном регулировании [18]

Широкие функциональные возможности данного регулятора позволяют реализовать широкий спектр режимов работы системы ГВС.

Для осуществления циркуляции жидкости в системе используется насос WiloPB-201EA с максимальной потребляемой мощностью 340 Вт. При необходимом для стенда напоре воды 2 м, подача воды насосом составляет 62 л/мин.

В качестве потребителя тепла используется радиатор системы охлаждения двигателя автомобиля, совмещённый с вентилятором. Выбор обусловлен необходимостью интенсивного охлаждения воды в системе, а также регулирования потребления тепла. Вращение вентилятора осуществляет электродвигатель постоянного тока МЭ-27, номинальная мощность которого равна 110 Вт. Для питания вентилятора необходим источник постоянного напряжения 12 В. В качестве источника питания был выбран блок питания персонального компьютера GIGABYTEGE-C450N-C4 с максимальным током по линии «+12 В» 17 А.

Для регулирования мощности вентилятора используется широтно-импульсный преобразователь оригинальной конструкции, сигнал задания на который подается с потенциального аналогового выхода контроллера. Регулятор преобразует постоянное напряжение 12 В на его входе в регулируемое (0-12) В на выходе в соответствии с управляющим сигналом.

Для анализа происходящих в лабораторном стенде процессов и снятия результатов исследований в электрические цепи насоса, нагревателя и вентилятора установлены измерительные приборы (амперметры и вольтметры). При выборе измерительных приборов необходимо было учитывать номинальные параметры элементов стенда. Эти параметры приведены ниже:

$$\begin{aligned} \text{Насос: } P_{\text{ном}} &= 340 \text{ Вт, } U = 220 \text{ В,} \\ I_{\text{ном}} &\approx P_{\text{ном}}/U = 340/220 = 1,6 \text{ А;} \end{aligned}$$

Нагреватель:  $R_{ном} = 7 \text{ кВт}$ ,  $U = 220 \text{ В}$ ,  
 $I_{ном} = R_{ном}/U = 7000/220 = 32 \text{ А}$ ;

Вентилятор:  $R_{ном} = 110 \text{ Вт}$ ,  $U = 12 \text{ В}$ ,  
 $I_{ном} = R_{ном}/U = 110/12 = 9,2 \text{ А}$ ;

Исходя из приведенных выше параметров, были выбраны следующие измерительные головки:

– в цепи насоса: амперметр Э8030 (0-3А), вольтметр Э8030 (0-250 В);

– в цепи нагревателя: амперметр Э8030 (0-50 А), вольтметр Э8030 (0-250 В);

– в цепи вентилятора: амперметр М42300 (0-15 А), вольтметр М42300 (0-15В).

Вольтметры Э8030 0-250 В и амперметр Э8030 0-3 А включаются непосредственно в измеряемую цепь, а амперметр Э8030 0-50 А – с помощью измерительного шунта 75ШСМЗ-20-0,5.

Программируемый логический контроллер в ходе управления процессами выдает на выходы управляющие сигналы, которые характеризуются малой мощностью. Непосредственно микроконтроллер не позволяет управлять мощными потребителями напрямую, поэтому для коммутации силовых цепей используются реле.

Для управления включением и выключением насоса выбрано реле FINDER 55.13.9.024.0000, которое соответствует электрическим параметрам насоса: 3 перекидных контакта, номинальный ток контакта 10 А, номинальное напряжение переменного тока на контактах 250 В.

Для коммутации цепи питания вентилятора выбрано реле FINDER 46.52.9.024.0040. Данное реле выбиралось с учетом параметров блока питания постоянного тока (~230 В, 450 Вт): номинальный ток контакта 8 А, номинальное напряжение переменного тока на контактах 250 В.

Для коммутации питания и защиты лабораторного стенда от короткого замыкания используются автоматические выключатели.

На входе электрической схемы лабораторного стенда установлен автоматический выключатель дифференциального тока со встроенной защитой от сверхтоков АВДТ32. Выбор обусловлен необходимостью защиты от прямого и косвенного прикосновения к токоведущим частям электроустановок.

При проектировании энергосистемы какого-либо объекта особую важность представляет расчет автоматических выключателей для защиты потребителей от экстратоков. На примере лабораторного стенда рассмотрим расчет автоматического выключателя по мощности и току. Номинальный ток выключателя выбирается в соответствии с номинальным током оборудования стенда.

Полная мощность оборудования стенда вычисляется по следующей формуле:

$$P_{\text{стенда}} = P_{\text{нас}} + P_{\text{нагр}} + P_{\text{вент}},$$

где  $P_{\text{нас}}$  – мощность насоса, Вт;

$P_{\text{нагр}}$  – мощность нагревателя, Вт;

$P_{\text{вент}}$  – мощность вентилятора, Вт.

Подставляя величины мощностей в формулу, получаем:

$$P_{\text{стенда}} = 340 + 7000 + 110 = 7450 \text{ Вт.}$$

Номинальный ток оборудования стенда равен:

$$I_{\text{стенда}} = P_{\text{стенда}} / U_{\text{сети}}$$

$$I_{\text{стенда}} = 7450 / 220 = 33,86 \text{ А.}$$

Номинальный ток автомата выберем 40 А.

Для защиты водонагревателя, как самого мощного потребителя, выберем отдельный автоматический выключатель.

Номинальный ток нагревателя найдем по следующей формуле:

$$I_{\text{нагр}} = P_{\text{нагр}} / U_{\text{сети}}$$
$$I_{\text{нагр}} = 7000 / 220 = 31,81 \text{ А}$$

Выберем автоматический выключатель ВА47-29 1Р 32А. Для остальной группы потребителей выберем общий автоматический выключатель ВА47-29 1Р 3А.

В данной лабораторной работе проводится опыт с частичной автоматизацией процессов, в частности, используется система управления для регулирования мощности нагревателя. Включение/отключение и изменение мощности всех приборов, кроме нагревателя, выполняется исполнителями работ.

### Указание мер безопасности

Перед началом выполнения лабораторных работ, студенты обязаны изучить инструкцию по технике безопасности и противопожарным мерам для работающих в лаборатории, ознакомиться с расположением силового электрооборудования и распределительного щита.

Во избежание несчастных случаев при работе в лаборатории необходимо строгое выполнение следующих основных положений правил техники безопасности:

1. До начала работы все ее участники должны на месте подробно ознакомиться со схемой соединений, усвоить расположение электрических цепей и элементов электрооборудования, обратив особое внимание на место расположения выключателей со стороны питающей сети.

2. Сборка схемы и ее изменение должны производиться без напряжения, при отключенных выключателях со стороны питающей сети.

3. Нельзя прикасаться руками к неизолированным проводам, соединительным клеммам и другим частям схемы, находящимся под напряжением.

4. Перед включением установки необходимо проверить, что отсутствует опасность прикосновения к токоведущим элементам схемы.

5. В случае неисправности установки необходимо её немедленно отключить и сообщить об этом преподавателю.

6. Несоблюдение правил техники безопасности может вызвать несчастный случай с людьми и выход из строя дорогостоящего оборудования.

7. Если произойдет несчастный случай, то лабораторную установку следует немедленно обесточить, а пострадавшему оказать первую помощь.

8. При возникновении в схеме установки аварийных режимов (перегрузка током, электрические пробой изоляции, короткие замыкания, чрезмерное увеличение скорости вращения электрических машин и т. д.) установка должна быть отключена и об этом следует сообщить преподавателю.

9. Одежда лиц, работающих с вращающимися агрегатами, должна быть аккуратной, чтобы полностью исключить опасность захвата частей одежды вращающимися частями машин. Прическа не должна ограничивать поле зрения работающего во избежание случайного прикосновения элементов схем, находящихся под напряжением.

### Методика испытаний по стенду Подготовительная часть

1. Подключить один конец интерфейсного кабеля к разъему на лицевой панели микроконтроллера, другой – к порту RS-232 на задней стороне корпуса системного блока персонального компьютера.

2. Вставить силовую вилку питания стенда в соответствующую розетку.

3. Включить автомат QF1, переведя ручку автомата в верхнее положение. Нажать на кнопку «Т» (Тест) на автомате, при этом автомат должен отключиться (ручка отщелкнуться в нижнее положение). Отключение автомата после нажатия

кнопки «Т» свидетельствует об исправной работе. При неисправности остановить выполнение лабораторной работы, отключить автомат вручную, вытащить силовую вилку питания из розетки и сообщить о неисправности преподавателю или ассистенту.

4. При исправной работе автомата QF1 включить автоматы QF2, QF3, переведя ручки автоматов в верхнее положение. При этом должна загореться лампа «Сеть».

5. Убедиться, что на лицевой панели ПЛК загорелся индикатор «Power». Дождаться, пока на лицевой панели ПЛК загорится индикатор «Run». Если индикатор «Power» не загорелся или индикатор «Run» не загорелся спустя минуту после индикатора «Power», остановить выполнение лабораторной работы, отключить автоматы, вытащить силовую вилку питания из розетки и сообщить о неисправности преподавателю или ассистенту.

6. При исправной работе ПЛК на персональном компьютере запустить ярлык «Collector», находящийся на рабочем столе. После этого должна запуститься программа SCADA-системы.

7. Убедиться, что установлена связь ПЛК – SCADA-система по интерфейсу RS-232. Для этого проверить наличие показаний датчиков температуры в окне программы. При отсутствии показаний сообщить о неисправности преподавателю или ассистенту.

### Экспериментальная часть

8. В программе нажать кнопку «Старт». При этом в течение 10-ти секундного интервала времени должен включиться насос. Если насос не включился, остановить выполнение лабораторной работы, нажать в программе на кнопку «Стоп», сообщить о неисправности преподавателю или ассистенту. В программе последовательно включить/выключить выключатель насоса, охладителя. Описать происходящие при этом процессы.



9. В программе поочередно включить и затем отключить выключатели насоса, охладителя. Описать происходящие при этом процессы.

10. Включить выключатель насоса. В программе в поле для задания температуры ввести заданное преподавателем или ассистентом число. Включить выключатель нагревателя и выключатель «ПИД-регулятор». При этом должен начаться нагрев рабочей жидкости, что фиксируется по датчику температуры  $t_1$ .

11. В программе включить выключатель охладителя. Изменять мощность охладителя согласно заданию преподавателя или ассистента. При этом следить за показаниями датчиков температуры, графиками мощности. Сохранить и проанализировать графики во время переходных процессов температуры  $t_3$ .

12. Выключить нагреватель и охладитель, нажав на соответствующие кнопки «Выкл.». Нажать на кнопку «Стоп». Отключить автоматы, вытащить силовую вилку питания из розетки.

#### Обработка данных

13. Сохранить и проанализировать графики, полученные в результате проведения работ.

## **АНАЛИЗ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ И ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕТРАДИЦИОННЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ (ГЕЛИОСИСТЕМ)**

### Теоретические сведения

Хозяйственная деятельность человека сопряжена с расходом громадного количества органического топлива, накопленного природой за миллионы лет эволюции. Значительную часть потребляемых в мире топливно-энергетических ресурсов использует энергетика – базовая отрасль современной экономики.

Сжигание органического топлива приводит к опасным экологическим последствиям: загрязнению атмосферы диоксидом серы, оксидами азота, несгоревшими углеводородами, золой и сажей. Выбросы углекислоты или диоксида углерода  $CO_2$  приводят к парниковому эффекту, потеплению климата планеты и повышению уровня Мирового океана с затоплением прибрежных участков суши. Проблема усугубляется вырубкой леса – основного переработчика углекислого газа в атмосфере Земли.

Нетрадиционное получение электроэнергии получается более мягким в смысле воздействия на окружающую среду, чем сжигание ископаемого органического топлива. За последнее время интерес к нетрадиционным источникам энергии стал возрастать более интенсивнее. Так запасы ископаемого топлива понемногу исчерпывают себя. К 2050 году запасы угля, нефти и газа сократятся втрое по сравнению с 1980 годом, а природные виды энергии неисчерпаемы. Повышение цен на нефть, газ послужило главной причиной того, что человечество вновь обратило внимание на водную, ветровую, солнечную и другие виды энергии. Все эти виды энергии относятся к возобновляемым.

Солнечная энергия – это самый значительный из всех нетрадиционных энергоресурсов. Она является источником ряда других неисчерпаемых источников энергии: ветровой, энергии приливных волн и волн морей и океанов, энергии разности температур слоёв воды в океанах, тепла геотермальных вод и т.д.

Солнечная энергия – это кинетическая энергия излучения света и тепла, образующаяся в результате реакций в недрах Солнца. Энергия солнечных лучей у поверхности Земли изменяется в зависимости от местоположения данного района, времени суток и состояния атмосферы. Ежегодное количество солнечной энергии у поверхности земли превышает в 25 раз все разведанные запасы угля и в 3÷10 тысяч раз больше ежегодно расходуемой энергии человечеством.

Солнечную энергию можно использовать для производства электроэнергии различными способами. Один из таких способов это использование гелиосистем. В конструкции гелиосистемы основным элементом гелиосистем является солнечный коллектор, или гелиоколлектор. Именно в поглощающей панели гелиоколлектора под воздействием солнечного излучения, а точнее, инфракрасной ее составляющей, и происходит преобразование солнечной энергии в тепловую. В результате панель разогревается, а прокачиваемый через нее жидкий теплоноситель отбирает полученное тепло. Тепло передается теплоносителем в теплообменник и далее по контуру нагрева воды (а возможно и отопления), затем охладившийся теплоноситель возвращается в коллектор и вновь нагревается, и таким образом цикл замыкается. Таков принцип работы системы. В ситуации, когда солнечный коллектор не может покрыть текущее теплотребление, в помощь ему включается ТЭН, который догревает систему до необходимой температуры.

От эффективности работы солнечного коллектора в значительной степени зависит эффективность работы всей системы, поскольку чем больше солнечной энергии поглотит

гелиоколлектор и чем меньше ее потеряет, тем эффективнее будет работать система.

### Описание физической модели гелиосистемы

Физическая модель содержит в себе функционально те же элементы, что и реальная гелиосистема. Роль солнечного коллектора и ТЭНа выполняет электрический проточный водонагреватель THERMEX Stream 700 мощностью 7 кВт. Резервуар емкостью 40 л выполняет функции теплообменника. В него поступает нагретая вода и из него она расходуется. Большой объем выбран для создания большей инерционности тепловых процессов, то есть для большего сходства с реальной гелиосистемой. Потребителем горячей воды является радиатор с вентилятором мощностью 110 Вт. В радиаторе нагретая вода охлаждается, имитируется расход тепла системой отопления и горячего водоснабжения. Перекачивает воду от нагревателя к радиатору насос Wilo PB-201EA мощностью 340 Вт. На стенде также смонтирован расширительный бак для предотвращения гидроударов, так как отсутствует система плавного пуска насоса. Давление в системе измеряется электроконтактным манометром, а скорость протекания воды – счетчиком расхода.

Управление данной физической моделью осуществляет программируемый логический контроллер (ПЛК) DeltaElectronics DVP20EX2. Контроллер, в соответствии с заложенной в него программой, управляет мощностью нагревателя и вентилятора. Мощность нагревателя изменяется регулятором мощности Autonics SPC1. В составе данной физической модели регулятор мощности управляется ПЛК с помощью токового аналогового выхода 4-20 мА. Программа для нагревателя имитирует солнечную активность в течение дня, но в более короткие сроки.

Для регулирования мощности блока охлаждения используется широтно-импульсный преобразователь, сигнал задания на который подается с потенциального аналогового выхода контроллера. С помощью термосопротивлений и

нормирующих преобразователей, подключенных к аналоговым входам, контроллер собирает информацию о температуре воды в нагревателе, в резервуаре и в радиаторе, сравнивает значения и выдает управляющие сигналы на насос и нагреватель.

В программе контроллера задается желаемая температура у потребителя. В начале для быстрого нагрева воды совместно с имитацией коллектора запускается имитация ТЭНа, то есть повышается мощность водонагревателя. Начинается интенсивный нагрев воды в водонагревателе и включается насос. Далее, по достижении заданной температуры в резервуаре, имитация ТЭНа отключается, и система работает только от имитации солнечной энергии. В это время вентилятором имитируется суточное потребление тепла. При падении температуры ниже заданного уровня, контроллер снова запускает имитацию ТЭНа, добавляя мощности нагрева. В случае, если мощность нагрева коллектора превысит потребление тепла и горячей воды, то нагреватель отключится, имитируя перевод тепла от коллектора на другие нужды (например, нагрев бассейна).

#### Описание алгоритмов работы физической модели гелиосистемы

В программе контроллера задается желаемая температура у потребителя. В начале для быстрого нагрева воды совместно с имитацией коллектора запускается имитация ТЭНа, то есть повышается мощность водонагревателя. Начинается интенсивный нагрев воды в водонагревателе и включается насос. Далее, по достижении заданной температуры в резервуаре, имитация ТЭНа отключается, и система работает только от имитации солнечной энергии. В это время вентилятором имитируется суточное потребление тепла. При падении температуры ниже заданного уровня, контроллер снова запускает имитацию ТЭНа, добавляя мощности нагрева. В случае, если мощность нагрева коллектора превысит потребление тепла и горячей воды, то нагреватель отключится,

имитируя перевод тепла от коллектора на другие нужды (например, нагрев бассейна).

В данной лабораторной работе проводится полностью автоматизированный опыт. Включение/отключение всех приборов, изменение их мощности происходит в автоматическом режиме, исполнитель лабораторной работы только запускает/останавливает эксперимент.

### Указание мер безопасности

Перед началом выполнения лабораторных работ, студенты обязаны изучить инструкцию по технике безопасности и противопожарным мерам для работающих в лаборатории, ознакомиться с расположением силового электрооборудования и распределительного щита.

Во избежание несчастных случаев при работе в лаборатории необходимо строгое выполнение следующих основных положений правил техники безопасности:

1. До начала работы все ее участники должны на месте подробно ознакомиться со схемой соединений, усвоить расположение электрических цепей и элементов электрооборудования, обратив особое внимание на место расположения выключателей со стороны питающей сети.

2. Сборка схемы и ее изменение должны производиться без напряжения, при отключенных выключателях со стороны питающей сети.

3. Нельзя прикасаться руками к неизолированным проводам, соединительным клеммам и другим частям схемы, находящимся под напряжением.

4. Перед включением установки необходимо проверить, что отсутствует опасность прикосновения к токоведущим элементам схемы.

5. В случае неисправности установки необходимо её немедленно отключить и сообщить об этом преподавателю.

6. Несоблюдение правил техники безопасности может вызвать несчастный случай с людьми и выход из строя дорогостоящего оборудования.

7. Если произойдет несчастный случай, то лабораторную установку следует немедленно обесточить, а пострадавшему оказать первую помощь.

8. При возникновении в схеме установки аварийных режимов (перегрузка током, электрические пробой изоляции, короткие замыкания, чрезмерное увеличение скорости вращения электрических машин и т. д.) установка должна быть отключена и об этом следует сообщить преподавателю.

9. Одежда лиц, работающих с вращающимися агрегатами, должна быть аккуратной, чтобы полностью исключить опасность захвата частей одежды вращающимися частями машин. Прическа не должна ограничивать поле зрения работающего во избежание случайного прикосновения элементов схем, находящихся под напряжением.

### Методика испытаний по стенду Подготовительная часть

1. Подключить один конец интерфейсного кабеля к разъему на лицевой панели микроконтроллера, другой – к порту RS-232 на задней стороне корпуса системного блока персонального компьютера

2. Вставить силовую вилку питания стенда в соответствующую розетку

3. Включить автомат QF1, переведя ручку автомата в верхнее положение. Нажать на кнопку «Т» (Тест) на автомате, при этом автомат должен отключиться (ручка отщелкнуться в нижнее положение). Отключение автомата после нажатия кнопки «Т» свидетельствует об исправной работе. При неисправности остановить выполнение лабораторной работы, отключить автомат вручную, вытащить силовую вилку питания из розетки и сообщить о неисправности преподавателю или ассистенту.

4. При исправной работе автомата QF1 включить автоматы QF2, QF3, переведя ручки автоматов в верхнее положение. При этом должна загореться лампа «Сеть».

5. Убедиться, что на лицевой панели ПЛК загорелся индикатор «Power». Дождаться, пока на лицевой панели ПЛК загорится индикатор «Run». Если индикатор «Power» не загорелся или индикатор «Run» не загорелся спустя минуту после индикатора «Power», остановить выполнение лабораторной работы, отключить автоматы, вытащить силовую вилку питания из розетки и сообщить о неисправности преподавателю или ассистенту.

6. При исправной работе ПЛК на персональном компьютере запустить ярлык «Collector», находящийся на рабочем столе. После этого должна запуститься программа SCADA-системы.

7. Убедиться, что установлена связь ПЛК – SCADA-система по интерфейсу RS-232. Для этого проверить наличие показаний датчиков температуры в окне программы. При отсутствии показаний сообщить о неисправности преподавателю или ассистенту.

### Экспериментальная часть

8. В программе в поле для задания температуры ввести заданное преподавателем или ассистентом число.

9. Нажать на кнопку «Пуск имитации гелиосистемы».

10. Наблюдать за изменением графиков температур и мощностей.

11. После окончания эксперимента отключить стенд.

12. Сохранить и проанализировать полученные графики. На основании графиков определить объект теплоснабжения.

### Обработка данных

13. Сохранить и проанализировать графики, полученные в результате проведения работ.



## **ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ РАБОТЫ ДИСПЕТЧЕРСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕМЕНТАМИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ**

### Теоретические сведения

Автоматизированная система диспетчерского управления энергосистемой (АСДУЭ) это совокупность устройств телемеханики, средств связи и вычислительной техники для обеспечения согласованной работы звеньев энергосистемы, предупреждения и обнаружения аварийных ситуаций, достижения высоких технико-экономических показателей. Основными функциями АСДУЭ являются: диагностика состояния электросетей и оборудования; обнаружение отказов и аварийных ситуаций; принятие решений о локализации аварийных ситуаций и способах их ликвидации, а также о резервных переключениях в системе; переводы системы с одного режима на другой; контроль и ведение выбранных режимов, взаимодействие с автоматизированными системами управления технологическими процессами и оперативным персоналом на местах; учет отпускаемой и потребляемой энергии.

Управление в автоматизированной системе диспетчерского управления энергосистемой представляет собой решение о выборе наилучшего варианта из множества возможных альтернатив. При этом отдельные альтернативы являются различного рода переключениями в электрической сети (питающих подстанциях, группах потребителей). При этом осуществляется перестройка технологии, схемы или структуры энергосистемы, чем достигается требуемое изменение режимов работы звеньев энергообеспечения и энергопотребления. Если выбор вариантов целей управления в изменяющейся ситуации практически не поддается формализации, то после того как этот выбор сделан

диспетчером, решение конкретных задач в рамках перечисленных функций может быть формализовано и реализовано автоматически с помощью ЭВМ с применением определенных методов. Для решения задач диагностики и обнаружения аварий наиболее эффективны методы распознавания образов и обнаружения стохастических сигналов. Задачи о локализации аварийных ситуаций и способах их ликвидации – типичный класс задач о выборе вариантов с хорошо формализуемым критерием сравнения. К подобному классу задач относится и принятие решений о резервных переключениях в системе. При этом должны быть разработаны предварительные программы переключений и алгоритмы управления с учетом реальных условий, влияющих на выбор режима. Наиболее сложными и трудно формализуемыми задачами являются контроль и ведение выбранных режимов при взаимодействии диспетчера с автоматизированной системой диспетчерского управления энергосистемой. Здесь может возникать множество непредвиденных обстоятельств, возмущающих режимы всей системы в целом или отдельных ее частей. Трудности выявления причин нарушения режимов и выбора наилучших альтернатив заставляют прибегать к методам экспертных систем и ситуационного управления.

Важнейшей особенностью автоматизированной системы диспетчерского управления энергосистемой является развитая система телемеханизации, информация с которой через средства связи вводится в персональную ЭВМ. Средства алгоритмической поддержки объединены по используемым методам и математическому аппарату в три основных блока: блок экспертной системы (БЭС), где решаются все неформализуемые задачи; блок математического моделирования (БММ) и блок критериальных расчетов (БКР), в которых решаются все формализованные задачи.

Обмен информацией диспетчера с ЭВМ реализуется через специальную диалоговую систему (ДС), являющуюся центральным звеном разработки автоматизированной системы

диспетчерского управления энергосистемой. От того, насколько удачно решена задача построения ДС, в значительной мере зависит конечный результат внедрения автоматизированной системы диспетчерского управления энергосистемой – повышение надежности и экономичности энергосистемы.

Сбор информации и выработка команд управления осуществляются в диспетчерских пунктах (ДП). ДП представляют собой локальные части АСДУЭ и различаются по степени охвата оборудования энергосистемы.

### Описание физической модели ОДП

Физическая модель объединенного диспетчерского пункта (ОДП) позволяет создать единую энергосистему с учетом генерации, распределения и потребления энергии. На базе модели реализованы необходимые для объединения и автоматизации функции. В качестве подчиненных устройств выступают следующие лабораторные стенды:

- генерации и распределения тепловой мощности с использованием нетрадиционных источников энергии;
- изучения режимов работы и нагрузки асинхронного двигателя с частотным управлением.

Каждый из стендов, находящихся под контролем объединенного диспетчерского пункта, представляет собой физическую модель отдельного технологического процесса.

Объединенный диспетчерский пункт собирает информацию с подчиненных стендов, получая ее с преобразователя частоты (напряжение питания и частота вращения асинхронного двигателя, напряжение питания и частота вращения нагрузочного двигателя постоянного тока) стенда с асинхронным двигателем и программируемого логического контроллера (значения с трех датчиков температуры, состояние насоса, текущая мощность охладителя и текущая мощность нагревателя) стенда генерации. Внешний вид стенда ОДП представлен на рис. 7.1.

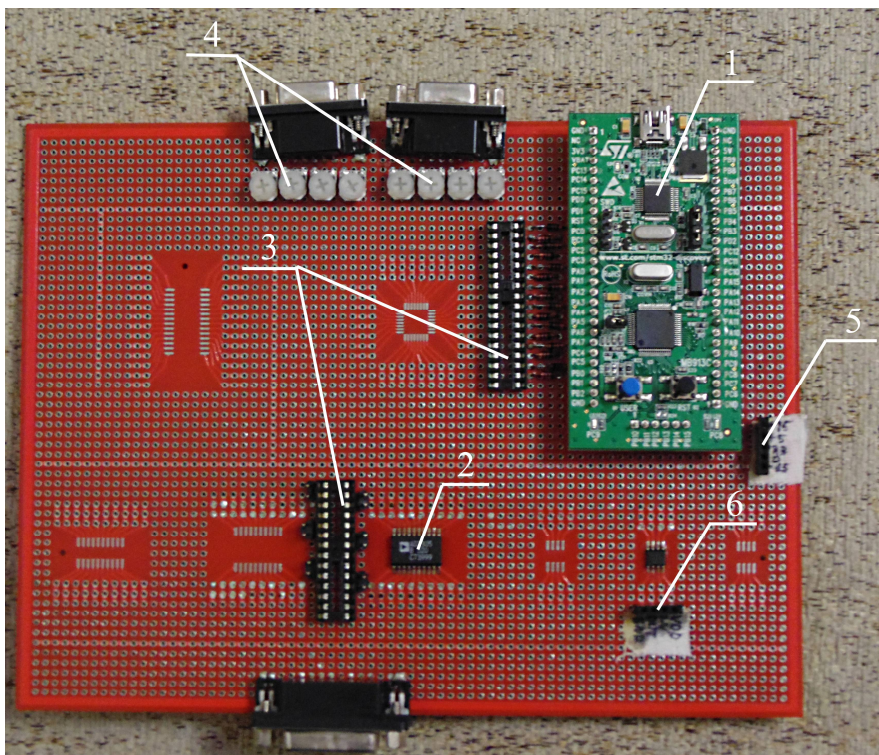


Рис. 7.1. Внешний вид стенда ОДП

На рис. 7.1 обозначены:

- 1 - управляющий микроконтроллер со встроенным АЦП;
- 2 - модуль ЦАП для управления стендами;
- 3 - модуль масштабирования сигналов на основе операционных усилителей;
- 4 - модули масштабирования сигналов на основе переменных резисторов;
- 5 - разъем питания;
- 6 - информационный разъем (передача данных).

Полученные данные отображаются на мнемосхеме технологического процесса, которая является связующим звеном человеко-машинного интерфейса. Она приведена на рис. 7.2.

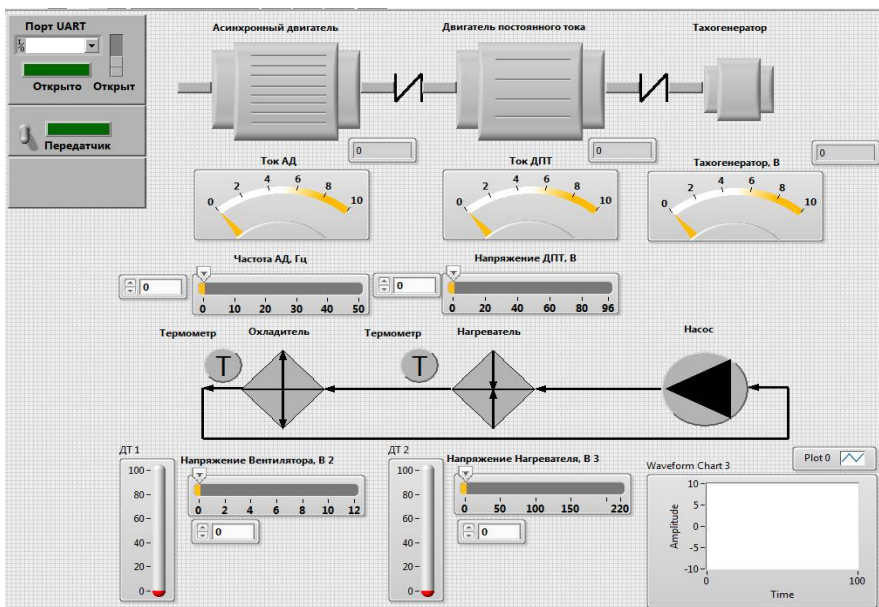


Рис. 7.2. Мнемосхема ОДП

Оператор анализирует по мнемосхеме состояние оборудования, показания датчиков и составляет полную картину о происходящих в подчиненном оборудовании процессах. С помощью регуляторов на мнемосхеме возможно осуществление непосредственного диспетчерского управления параметрами оборудования: изменение значения частоты вращения асинхронного двигателя; варьирование напряжения питания нагрузочного двигателя постоянного тока; изменение значения мощности нагревателя и охладителя, включение и отключение насоса.

На рис. 7.3 приведена функциональная схема физической модели объединенного диспетчерского пункта.

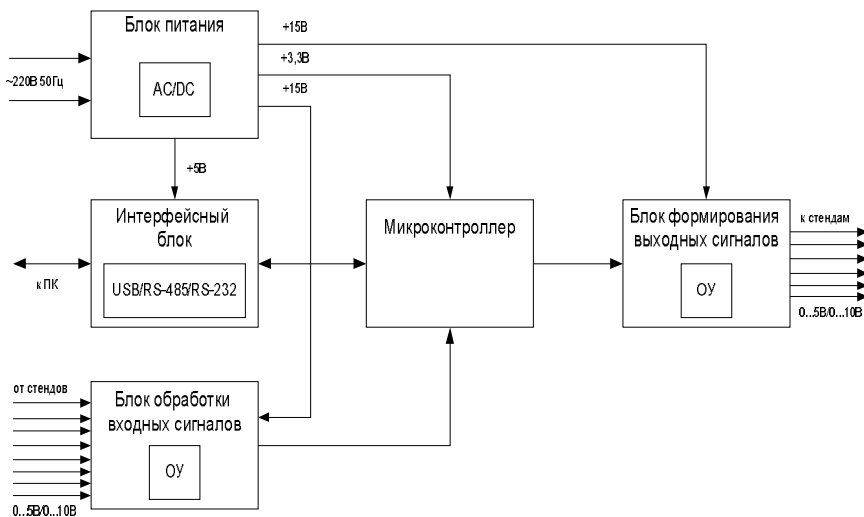


Рис. 7.3. Функциональная схема ОДП

Как видно из рис. 7.3, лабораторный стенд состоит из нескольких узлов, каждый из которых отвечает за выполнение определенной задачи. Блок питания преобразовывает входное переменное напряжение 220 В, 50 Гц в постоянное со значениями +3,3 В, +5 В и +15 В, которые необходимы для питания остальных элементов. Интерфейсный блок обеспечивает обмен данными лабораторного стенда с персональным компьютером и поддерживает интерфейсы USB, RS-485, RS-232. Все сигналы, передаваемые от подчиненного оборудования, поступают на блок обработки входных сигналов. В нем происходит прием и согласование уровней напряжения сигналов. Далее, принятые и отмасштабированные сигналы поступают на входы микроконтроллера, который производит их обработку, формирует массив данных для отправки на персональный компьютер, а также подает управляющее воздействие на блок формирования выходных сигналов. Для управления подчиненным оборудованием необходимо усилить управляющие сигналы микроконтроллера и преобразовать в аналоговый вид. Данные процессы

происходят в блоке формирования выходных сигналов. Цифро-аналоговый преобразователь в его составе отвечает за формирование аналогового сигнала из цифрового кода, а операционные усилители обеспечивают согласование уровней напряжений.

### Алгоритмы работы физической модели ОДП

Общий алгоритм работы программы, заложенной в ОДП, представлен на рис. 7.4.

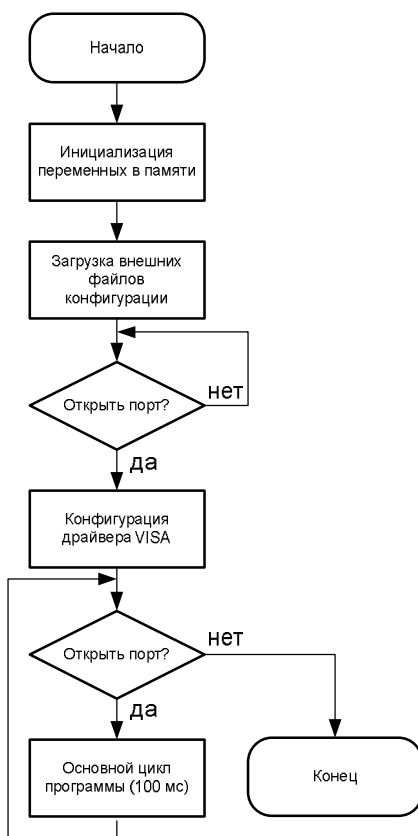


Рис. 7.4. Общий алгоритм работы программы

Основной цикл программы состоит из следующих действий:

- составление массива данных на отправку в стенд;
- отправка массива данных;
- ожидание 100 мс отправки данных;
- прием данных;
- визуализация принятых и отправленных данных.

Программа поддерживает два режима работы:

- работа в режиме обмена данными (тумблер передатчик переведен в верхнее положение);
- режим просмотра (тумблер передатчик переведен в нижнее положение).

Программа после инициализации и конфигурации драйверов сканирует состояние функциональных блоков, задающих режимы работы (выходные напряжения ЦАП) подключенных к ОДП систем, отправляет данные на стенд ОДП, после чего поток данных, содержащий управляющие команды, распределяется между составными частями энергосистемы.

### Указание мер безопасности

Перед началом выполнения лабораторных работ, студенты обязаны изучить инструкцию по технике безопасности и противопожарным мерам для работающих в лаборатории, ознакомиться с расположением силового электрооборудования и распределительного щита.

Во избежание несчастных случаев при работе в лаборатории необходимо строгое выполнение следующих основных положений правил техники безопасности:

1. До начала работы все ее участники должны на месте подробно ознакомиться со схемой соединений, усвоить расположение электрических цепей и элементов электрооборудования, обратив особое внимание на место расположения выключателей со стороны питающей сети.



2. Сборка схемы и ее изменение должны производиться без напряжения, при отключенных выключателях со стороны питающей сети.

3. Нельзя прикасаться руками к неизолированным проводам, соединительным клеммам и другим частям схемы, находящимся под напряжением.

4. Перед включением установки необходимо проверить, что отсутствует опасность прикосновения к токоведущим элементам схемы.

5. В случае неисправности установки необходимо её немедленно отключить и сообщить об этом преподавателю.

6. Несоблюдение правил техники безопасности может вызвать несчастный случай с людьми и выход из строя дорогостоящего оборудования.

7. Если произойдет несчастный случай, то лабораторную установку следует немедленно обесточить, а пострадавшему оказать первую помощь.

8. При возникновении в схеме установки аварийных режимов (перегрузка током, электрические пробой изоляции, короткие замыкания, чрезмерное увеличение скорости вращения электрических машин и т. д.) установка должна быть отключена и об этом следует сообщить преподавателю.

9. Одежда лиц, работающих с вращающимися агрегатами, должна быть аккуратной, чтобы полностью исключить опасность захвата частей одежды вращающимися частями машин. Прическа не должна ограничивать поле зрения работающего во избежание случайного прикосновения элементов схем, находящихся под напряжением.

### Методика испытаний по стенду Подготовительная часть

1. Подключить один конец интерфейсного кабеля к информационному разъему на лицевой стороне платы стенда ОДП, другой – к порту RS-232 на задней стороне корпуса системного блока персонального компьютера.

2. Подключить интерфейсные кабели лабораторных стендов, задействованных в эксперименте, к входным и выходным разъемам стенда ОДП.

3. Соединить разъем блока питания и разъем питания на лицевой стороне платы, вставить блок питания в соответствующую розетку.

4. Соответствующим образом включить подчиненные стенды (согласно методикам на каждый стенд).

5. На персональном компьютере запустить программу ODP.exe. Выбрать порт, к которому подключен интерфейсный разъем стенда ОДП. Переместить слайдер и тумблер «передатчик» в верхнее положение.

6. Убедиться, что установлена связь ПК – ОДП. При этом индикаторы «Открыто» и «Передатчик» должны загореться зеленым цветом. При отсутствии свечения сообщить о неисправности преподавателю или ассистенту.

### Экспериментальная часть

7. С помощью ползунка задания частоты последовательно изменять частоты вращения асинхронного двигателя от 0 до 50 Гц, перемещая ползунок вправо.

8. С помощью ползунка задания напряжения последовательно изменять напряжение, подаваемое на обмотки двигателя постоянного тока, от 0 до 96 В, перемещая ползунок вправо. При этом следить за графиком потребляемого тока асинхронного двигателя. Не допускать, чтобы ток потребления превышал 1 А.

9. Выставить ползунки в крайнее левое положение.

10. С помощью ползунка задания напряжения последовательно изменять напряжение, подаваемое на вентилятор, от 0 до 12 В, перемещая ползунок вправо.

11. С помощью ползунка задания напряжения последовательно изменять напряжение, подаваемое на нагреватель, от 0 до 220 В, перемещая ползунок вправо. При этом следить за показаниями датчиков температуры. Показания

датчиков не должны превышать  $60^{\circ}\text{C}$ , для этого мощность нагревателя следует уменьшать до 0% при показаниях хотя бы одного датчика температуры, равных  $55^{\circ}\text{C}$ .

12. Согласно заданию от преподавателя выставить с помощью слайдеров режим работы подчиненных стендов. Следить за показаниями измерительных приборов и графиками, отображаемыми в окне мнемосхемы.

13. Сдвинуть все ползунки в крайнее левое положение. Переместить слайдер и тумблер «передатчик» в нижнее положение.

14. Соответствующим образом выключить подчиненные стенды (согласно методикам на каждый стенд).

15. Отключить блок питания ОДП от розетки.

#### Обработка данных

16. Сохранить и проанализировать графики, полученные в результате проведения работ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебном пособии рассмотрены вопросы компьютерного моделирования электроэнергетических систем, отдельных ее элементов. Наряду с работой систем в установившихся режимах, даны указания по моделированию переходных процессов.

Приведено описание современных автоматизированных систем горячего водоснабжения. Дано руководство по работе с физической моделью таких систем.

Описана аппаратная часть одного из современных устройств регулирования электрической мощности и напряжения, а также физическая модель, содержащая такое устройство.

Рассмотрен один из вариантов использования солнечной энергии и преобразования ее в энергию теплоносителя. Описываются принципы построения и работы физической модели гелиосистемы.

Приведено описание и ключевые особенности автоматизированных систем диспетчерского управления энергосистемой. На примере физической модели описан объединенный диспетчерский пункт, его функциональные особенности и алгоритмы работы.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Проблемы альтернативных источников энергии [Электронный ресурс] : Режим доступа: World Wide Web. URL: <http://bio-x.ru/articles/problemy-alternativnyh-istochnikov-energii>.

2. Крысанов, В.Н. Аппаратно-программное управление режимами узлов нагрузки региональных сетей электроснабжения с помощью статических устройств: монография / В.Н. Крысанов. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. 232 с.

3. Крысанов, В.Н. Программно-аппаратное обеспечение систем управления ЭЭС на базе технологии FACTS: монография / В.Н. Крысанов. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. 232 с.

4. Расчет мощности подстанции. Студенческая библиотека онлайн [Электронный ресурс] : Режим доступа: World Wide Web. URL: [http://studbooks.net/2011798/matematika\\_himiya\\_fizika/raschet\\_moschnosti\\_podstantsii](http://studbooks.net/2011798/matematika_himiya_fizika/raschet_moschnosti_podstantsii).

5. ГОСТ Р 1.4.- 2004. Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций. Общие положения [Текст]. – Введ. 2004-12-30. – М.: Госстандарт России, 2004. – 27 с.

6. Основы современной энергетики [Текст] / Под ред. Е.В. Аметистова. – М.: МЭИ, 2008. – 352 с.

7. Веников, В.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем [Текст] / В.А. Веников, В.Г. Журавлев, Т.А. Филиппова. - М.: Энергоиздат, 1990. – 352 с.

8. Коэффициент трансформации [Электронный ресурс] : Режим доступа: World Wide Web. URL: <http://poznayka.org/s60709t1.html>.

9. Регулирование напряжения с помощью вольтодобавочных трансформаторов [Электронный ресурс] :

Режим доступа: World Wide Web. URL: <http://poznayka.org/s60710t1.html>.

10. Регулирование напряжения изменением перетоков реактивных мощностей [Электронный ресурс] : Режим доступа: World Wide Web. URL: <http://poznayka.org/s60711t1.html>.

11. Крысанов, В.Н. Общая энергетика: учеб. пособие [Текст] / В.Н. Крысанов, А.Ю. Писаревский. – Воронеж: ВГТУ, 2015. – 238 с.

12. Что такое электростанция. Оборудование электростанций. Энергетика. Энергосистема [Электронный ресурс] : Режим доступа: World Wide Web. URL: <http://energосmi.ru/archives/9500>.

13. ТЭЦ. Энергетика. Оборудование. Документация [Электронный ресурс] : Режим доступа: World Wide Web. URL: <http://forca.ru/info/spravka/tec.html>.

14. Типовые схемы ГВС [Электронный ресурс] : Режим доступа: World Wide Web. URL: <https://www.c-o-k.ru/articles/tipovye-shemy-gvs>.

15. Зайцев, А.И. Энергосберегающие технологии в распределенных электроэнергетических сетях [Текст] / А.И. Зайцев, В.Н. Крысанов. – Воронеж: ВГТУ, 2016. – 243 с.

16. Зайцев, А.И. Силовая промышленная электроника [Текст] / А.И. Зайцев, А.С. Кожин, А.С. Плехов. – Нижний Новгород: НГТУ им. Алексева, 2014. -281 с.

17. Справочник по проектированию электроэнергетических систем [Текст] / Под ред. С.С. Рокотяна. – М.: Энергопромиздат, 1985. – 352 с.

18. Блок управления током резистивной нагрузки (регулятор мощности) [Электронный ресурс] : Режим доступа: World Wide Web. URL: [http://www.promsytex.ru/files/tech/rus/power\\_controller\\_SPC1.pdf](http://www.promsytex.ru/files/tech/rus/power_controller_SPC1.pdf).

19. Герман-Галкин, С.Г. Электрические машины: лабораторные работы на ПК [Текст] / С.Г. Герман-Галкин, Г.А. Кардонов. – СПб: КОРОНА принт, 2003. – 256 с.

20. Герман-Галкин, С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 [Текст] / С.Г. Герман-Галкин. – СПб: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.

21. Тиристоры низкочастотные силовые [Электронный ресурс]: Режим доступа WorldWideWeb. URL: <http://www.ferrol.ru/nomen/130715.html>.

22. Арзамасцев, Д.А. АСУ и оптимизация режимов энергосистем [Текст] / Д.А. Арзамасцев, Г.И. Бартоломей, А.М. Холян. - М.: Высшая школа, 1983. – 208 с.

23. Гамм, А.З. Вероятностные модели режимов электроэнергетических систем [Текст] / А.З. Гамм. – Новосибирск: Наука, 1993. – 115 с.

24. Гельман, Г.А. Автоматизированные системы управления энергоснабжения промышленных предприятий [Текст] / Г.А. Гельман. – М.: Энергоиздат, 1984. – 256 с.

25. Веников, В.А. Теория подобия и моделирования [Текст] / В.А. Веников. – М.: Высш. Шк., 1996. – 479 с.

26. Автоматизация диспетчерского управления в электроэнергетике [Текст] / Под общей ред. Ю.Н. Руденко, В.А. Семенова. - М.: Издательство МЭИ, 2000. -648 с.

27. Городов, Р.В. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. пособие / Р.В. Городов, В.Е. Губин, А.С. Матвеев. – 1-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 294 с.

28. Распоряжение Правительства РФ от 13.11.09 г. N 1715 ОБ Энергетической стратегии России на период до 2030 года [Текст] // Энергетическая политика – М.: ГУ ИЭС, 2007.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	3
Лабораторная работа № 1. Компьютерное моделирование в среде MATLAB элементов электроэнергетической системы ЭЭС.....	4
Лабораторная работа № 2. Компьютерное моделирование в среде MATLAB устройств регулирования напряжения в ЭЭС.....	22
Лабораторная работа № 3. Компьютерное моделирование в среде MATLAB переходных процессов систем энергоснабжения.....	38
Лабораторная работа № 4. Физическое моделирование современных автоматизированных систем горячего водоснабжения производственных объектов.....	46
Лабораторная работа № 5. Физическое моделирование современных устройств регулирования электрической мощности и напряжения на производственных объектах.....	64
Лабораторная работа № 6. Анализ принципов работы и физическое моделирование нетрадиционных источников энергии (гелиосистем).....	74
Лабораторная работа № 7. Изучение принципов работы диспетчерского управления элементами энергосистемы.....	81
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	92
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	93



**Учебное издание**

**Крысанов Валерий Николаевич  
Иванов Константин Владимирович**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
ПО ОБЩЕЙ ЭНЕРГЕТИКЕ**

Подписано в печать 23.04.2018.  
Формат 60x84 1/16. Бумага для множительных аппаратов.  
Усл. печ. л. 6,1. Тираж 350 экз. Заказ № 62.

ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический  
университет»  
394026 Воронеж, Московский просп., 14

Участок оперативной полиграфии издательства ВГТУ  
394026 Воронеж, Московский просп., 14