

УДК 621.317.629.12

М.П. Шилов, Г.И. Коробко

РАЗРАБОТКА И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ГЕНЕРАТОРНЫМ АГРЕГАТОМ В АВТОНОМНЫХ СЕТЯХ

ФГБОУ ВО "Волжский государственный университет водного транспорта"

Состояние вопроса: Исследование процессов в электроэнергетических системах при отсутствии реальной установки, требует разработки виртуальной электроэнергетической системы. Модели, находящиеся в открытом доступе, не дают возможности моделирования синхронизации и распределения нагрузок. Актуальным направлением в данном исследовании является создание модели, оценивающей эффективность автономной электростанции.

Методы исследования: Математический расчет, моделирование автономных электроэнергетических систем в пакете Matlab с использованием библиотек SimPowerSystem и Simulink.

Результаты: Разработана блок-схема и модель, обеспечивающая синхронизацию и распределение активной и реактивной нагрузки между генераторным агрегатом и сетью.

Выводы: Предложенная модель позволила исследовать процессы включения на параллельную работу генераторного агрегата с сетью и распределение между ними активной и реактивной нагрузки. Как показало моделирование, изменение параметров регуляторов мощности влияет на быстродействие и перерегулирование активной и реактивной мощности.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, модель электростанции, синхронизатор, параллельная работа, распределение активной и реактивной нагрузки.

Одной из важнейших характеристик эффективности действия электроэнергетической системы - ЭЭС является качество электроэнергии в установившихся и переходных режимах, сопровождающихся большим количеством процессов. Все автономные потребители электростанций должны бесперебойно получать электроэнергию необходимого качества и количества. При этом амплитуда и частота напряжения на шинах ЭЭС должны поддерживаться номинальными, а мощность работающих источников должна превышать электрическую мощность, потребляемую приемниками.

В процессе разработки автономной ЭЭС необходимо решить ряд задач связанных с расчетом мощности и числа генераторных агрегатов; разработкой структурной схемы электростанции и её схемных решений. Как показывает практика, быстрее и легче решать задачи с использованием моделей элементов и самой электроэнергетической системы в целом.

Современные автономные электростанции, состоящие из нескольких генераторных агрегатов, работают параллельно при переменном графике нагрузки. Очевидно, что включать в работу и отключать генераторные агрегаты целесообразно так, чтобы их нагрузка была близкой к номинальной. При этом КПД генераторов и электростанции в целом будут иметь наибольшую величину. В автономных ЭЭС в качестве приводных двигателей генераторов традиционно применяют дизели и газо-поршневые двигатели.

Как показывает анализ [1], работа дизель-генераторной электростанции зависит от эффективности систем автоматического управления для:

- включения на параллельную работу генераторного агрегата с сетью;
- распределения активной и реактивной мощности между источниками энергии;
- разгрузки активной и реактивной мощности генераторного агрегата после чего он отключается от сети.

На рис. 1 представлена блок-схема системы автоматического управления параллельной работы генераторного агрегата с сетью. Сеть представляет собой совокупность генераторных агрегатов, где используются приводные двигатели генераторов с астатической характеристикой, объединенных для питания, например, судовых приемников электроэнергии [2].

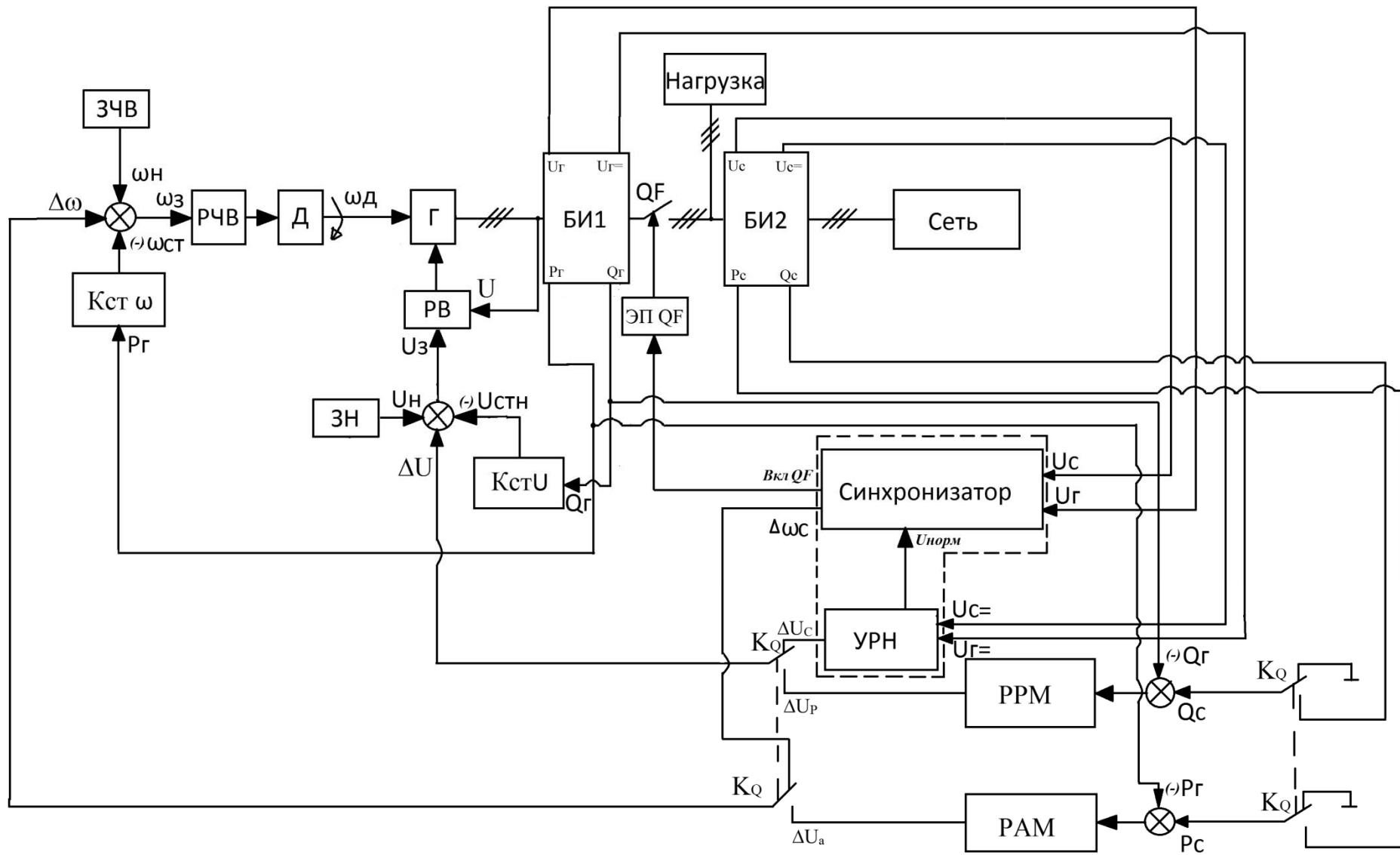


Рис. 1. Блок-схема системы автоматического управления параллельной работой генераторного агрегата с сетью

В состав генераторного агрегата входят синхронный генератор - Г с регулятором возбуждения - РВ. В качестве приводного двигателя используется дизель - Д с регулятором частоты вращения - РЧВ. На вход РВ подается задающее напряжение - U_z , состоящее из трех сигналов: сигнала соответствующего номинальному значению напряжения - U_n , поступающему от датчика напряжения - ЗН; сигнала статизма - $U_{стн}$, пропорционального реактивной мощности генератора, обеспечивающий наклон внешней характеристики генератора в диапазоне 2% - 5% и сигнала управления - ΔU напряжением генератора при синхронизации - ΔU_C или распределения реактивной мощности генераторного агрегата - ΔU_P . На вход РЧВ подается сигнал задающий частоту вращения дизеля - ω_z , состоящая из трех сигналов: сигнал датчика частоты вращения - ЗЧВ, формирующий сигнал - ω_n равный номинальному значению частоты сети 50 Гц; сигнал управления - $\Delta \omega$ частотой вращения дизеля, а, следовательно, и частотой напряжения генератора и углом разности фаз напряжений сети и генератора при синхронизации - $\Delta \omega_c$ или сигнал распределения активной мощности генераторного агрегата - ΔU_a ; сигнал статизма - $\omega_{ст}$, пропорциональный активной мощности генератора и обеспечивающий наклон механической характеристики дизеля в диапазоне 2% - 5%.

Система управления включением генераторного агрегата на параллельную работу с сетью состоит из двух блоков: синхронизатора и устройство разности напряжений - УРН. Для управления состоянием генераторного автомата, синхронизатор получив на входы значения переменного напряжения сети и генератора - U_c , U_g , сформированные в блоках измерения - БИ1 и БИ2, выполняет проверку параметров необходимых для метода точной синхронизации. Значения частоты питающей сети - f_c и частоты подключаемого генератора - f_g , а также значение разности углов одноименных векторов фазных напряжений - $\Delta \Psi$ подключаемого генератора и сети должны находиться в требуемых диапазонах.

Поддержание амплитуды выходного напряжения генераторного агрегата до напряжения сети осуществляет УРН, получив на входы значения выпрямленных выходных напряжений генератора - $U_{г=}$ и сети - $U_{с=}$, сформированные в блоках БИ1 и БИ2, формируют два сигнала - ΔU и $U_{норма}$. Сигнал $U_{норма}$ указывает, что задача о выравнивании амплитуды напряжений выполнена и находится в пределах допустимой ошибки ΔU 0.1%. При этом синхронизатор разрешает выполнить включение генераторного автомата - QF, с помощью электропривода - ЭП. Задачи, выполняемые системой управления, обеспечивают вход в синхронизм дизель - генератора с сетью без существенных отклонений по частоте питающей сети и напряжению.

После включения генераторного агрегата на параллельную работу происходит одновременное переключение контактов реле - K_Q на входы регуляторов реактивной - РРМ и активной мощности (РАМ) соответственно. Задающими сигналами регуляторов являются разности между мощностями сети и генератора как по реактивной - Q_c, Q_g , так и по активной - P_c, P_g мощности соответственно. Для получения сигналов пропорциональных мощности формируются в БИ1 и БИ2. Таким образом, на выходе регуляторов будут сформированы сигналы распределения активной и реактивной мощности - ΔU_Q и ΔU_P , соответственно.

Для исследования параллельной работы генераторного агрегата с сетью, разработана модель, которая изображена на рис. 2. Моделирование выполнено в пакете программ Matlab 7.11.0. Модель разрабатывалась с помощью стандартных блоков из библиотек SimPowerSystem и Simulink [3]. В качестве генератора используется явнополюсная синхронная машина - Synchronous Machine pu Fundamental. Параметры машины имеют следующие значения: мощность $S=250$ кВА, номинальное выходное напряжение $U_{ном}=400$ В, частота $f_{ном}=50$ Гц, номинальная частота вращения $n_{ном}=1500$ об/мин. Частота вращения дизеля задается регулятором частоты вращения - РЧВ-Д. Регулятор возбуждения генератора выполнен блоком Excitation System, на вход V_{ref} подается задание величины напряжения в относительных единицах. Блок - Measurement Demux разделяет измеренные на выходе - m параметры генератора. Сеть Three Phase Programmable Voltage Source представляет собой трехфазный источник напряжения со следующими параметрами: напряжение 400 В и частоту 50 Гц.

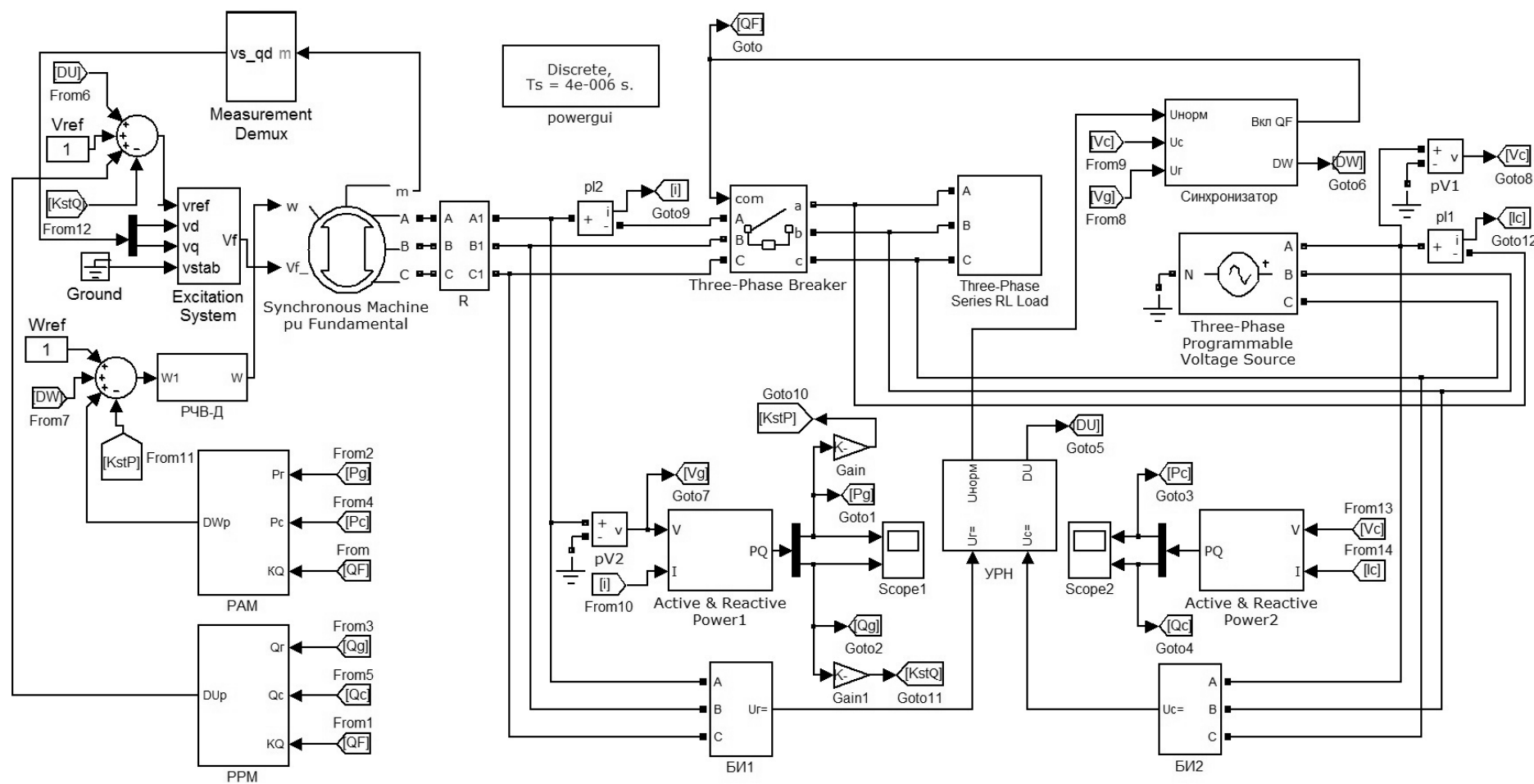


Рис. 2. Модель для параллельной работы генераторного агрегата с сетью

Для измерения активной и реактивной мощностей используются блоки измерений генераторного агрегата Active & Reactive Power1 и сети Active & Reactive Power2, на входы которых поступают измеренные значения тока и напряжения от датчиков pI1, pI2 и pV1, pV2. К выходам измерителей подключены осциллографы Scope1 и Scope2, передатчики сигнала Goto 1-4, а также элементы Gain и Gain1 для создания сигналов статизма по активной - K_{stP} и реактивной - K_{stQ} мощности. Блоки измерений выпрямленных напряжений генератора и сети представлены как БИ1 и БИ2. Они состоят из преобразователей, с которых пониженное, выпрямленное и отфильтрованное напряжение поступает на УРН, дающий сигнал управления - DU при синхронизации и разрешающий сигнал включения на параллельную работу - $U_{норма}$.

Включение на параллельную работу выполняет синхронизатор. Для задания момента включения определены требования точной синхронизации, при выполнении которых поступает команда в виде логической единицы на входы K_Q РАМ и РРМ и на внешний управляемый com-порт автоматического выключателя - Three-Phase Breaker, который подключает синхронный генератор к шинам сети. Таким образом, сеть и генератор работают на общую активно-индуктивную нагрузку с $\cos\varphi=0.8$, которая представлена блоком Three-Phase Series RL Load, соединенная звездой (при необходимости ее характер может изменяться).

Диаграммы работы синхронизатора до и после включения на параллельную работу генератора с сетью представлены на рис. 3. Напряжение генератора в момент времени $t=0.005$ с опережает напряжение сети рис. 3, а. При включении синхронизации, сигнал управления регулятора частоты вращения дизеля Dw изменяет величину угла разности фаз напряжений генератора и сети - $\Delta\Psi$. В момент времени при $t=0.039$ с, который соответствует минимально допустимой величине - $\Delta\Psi$, формируется логическая единица (см. рис. 3, б), для включения генераторного автомата - Three-Phase Breaker. После этого напряжения сети и генератора совпадают.

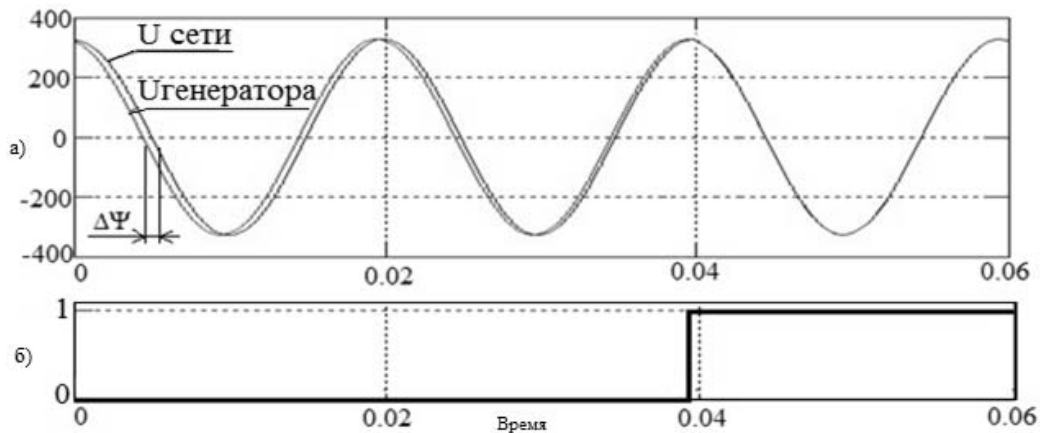


Рис. 3. Диаграммы напряжений сети и генератора (а) и сигнал включения генераторного автомата (б)

Моделирование системы автоматического распределения активной и реактивной нагрузки показано на рис. 4. Изменение полной мощности нагрузки, представленной на рис. 4, а, производилось включением трех блоков нагрузок. В момент времени $t = 0$ с включалась первая нагрузка, составляющая 20% от номинальной мощности генератора. При $t = 1.5$ с и $t = 3.5$ сек. включались вторая и третья нагрузки, равные по 40% соответственно.

Распределение активной и реактивной мощности между сетью и генератором показано на диаграммах (рис. 4, б, в). В момент времени $t = 0.12$ с включается на параллельную работу генератор с сетью, а затем происходит выравнивание активной и реактивной мощности, отдаваемой в нагрузку сетью и генератором. Переходный процесс распределения активной нагрузки заканчивается в момент времени $t = 0.7$ с, а реактивной в момент $t = 0.4$ с, после которого установившийся режим будет соответствовать равной нагрузке сети и генератора. При включении второй и третьей нагрузки в момент времени $t = 1.5$ с и $t = 3.5$ с соответст-

венно, характер изменения активной и реактивной мощности генератора и сети аналогичен предыдущему случаю.

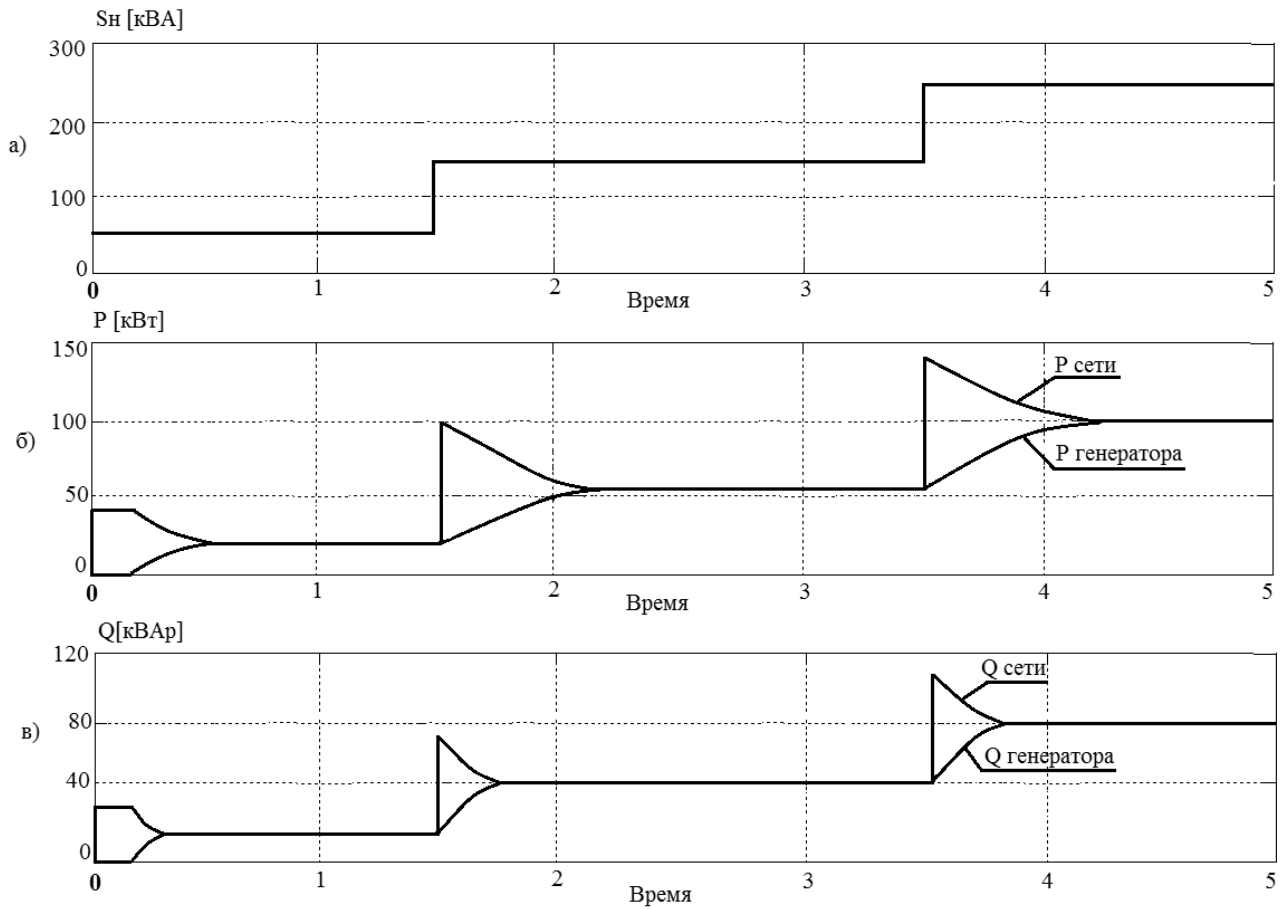


Рис. 4. Диаграммы изменения полной мощности нагрузки (а), распределения активной (б) и реактивной (в) мощности генератора и сети

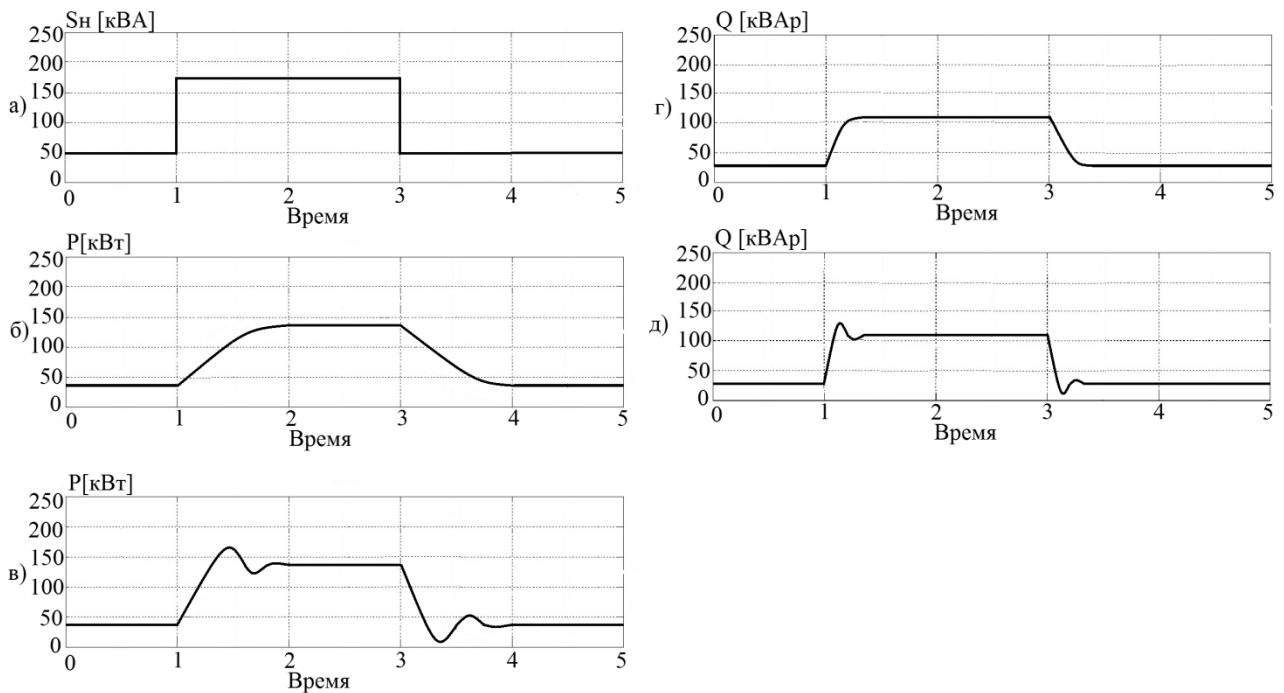


Рис. 5. Диаграмма изменения полной мощности нагрузки (а), активной (б, в) и реактивной (г, д) мощности генератора и сети при разных постоянных времени регулятора

Как видно из диаграмм (рис. 4, б, в), быстродействие системы регулирования активной мощности ниже, чем у системы регулирования реактивной мощности генератора. Это объясняется значительным моментом инерции генераторного агрегата, а постоянная времени возбуждения существенно меньше механической постоянной времени.

На рис. 5, а представлена диаграмма изменения мощности нагрузки при набросе от 20% до 70% в момент времени $t = 1$ с и при сбросе от 70% до 20% в момент времени $t = 3$ с от номинальной мощности генератора. Процесс изменения активной и реактивной мощности генератора при настройке регуляторов на монотонный характер представлен на рис. 5, б, в. При уменьшении постоянной времени интегрирования ПИ - регуляторов в переходной характеристике время нарастания снижается и появляется перерегулирование, как видно на рис. 5, в, д, что соответствует колебательному процессу.

Выводы

Анализ разработанных систем автоматического регулирования дизель-генератора автономной электроэнергетической системы и её модели показал, что работа систем поддержания частоты вращения дизеля и напряжения синхронного генератора, систем синхронизации и распределения активной и реактивной мощности соответствует поставленной задаче. Применение разработанной модели позволит разрабатывать и изготавливать как опытные, так и промышленные элементы и системы для автономных электростанций, что в настоящее время является перспективным и экономически целесообразным.

Библиографический список

1. **Коробко, Г.И.** Исследование параллельной работы автономного генераторного агрегата с сетью / Г.И. Коробко, С.В. Попов, А.В. Бишлетов, А.С. Филатов // Актуальные проблемы электроэнергетики. – Н.Новгород, НГТУ, 2011. – С. 116-120.
2. **Баранов, А.П.** Судовые автоматизированные электроэнергетические системы: учебник для вузов / А.П. Баранов. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Судостроение, 2005. – С. 528.
3. **Черных, И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystem и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – С. 288.

*Дата поступления
в редакцию 20.10.2017*

G.I. Korobko, M.P. Shilov

DEVELOPMENT AND MODELING OF CONTROL SYSTEMS OF GENERATOR SET IN AUTONOMOUS MAINS.

Volga State University of Water Transport,

The state of the issue: Investigation of processes in electric power systems in the absence of a real installation requires the development of a virtual power system. Models that are in the publicly available do not allow modeling of synchronization and distribution of loads. The actual direction in this study is the creation of a model that evaluates the efficiency of an autonomous power plant.

Research methods: Mathematical calculation, modeling of autonomous electric power systems in the Matlab package using the SimPowerSystem and Simulink libraries.

Results: A block diagram and a model of synchronization and distribution of active and reactive load between the generator set and the mains are developed.

Conclusions: The proposed model allowed to study the processes of switching on the parallel operation of the generator set with the mains and the distribution of the active-reactive load between them. As the simulation showed, changing the parameters of the power regulators changed the speed and overshoot of the active and reactive power.

Key words: electric power system, power plant model, synchronizer, parallel operation, distribution of active and reactive power.