

# Школа MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники и электромеханики в среде Matlab+Simulink.

## Урок 25. Мехатронная система с двумя генераторами в общей электрической сети переменного тока

**В предыдущей статье (урок 24) описан и проанализирован синхронный магнитоэлектрический генератор с активным выпрямителем. Такая мехатронная система позволяет поддерживать напряжение на выходе активного выпрямителя постоянным при изменении скорости вращения вала генератора и нагрузки. Для создания неизменного напряжения в сети переменного тока к рассмотренной мехатронной системе подключается автономный инвертор, связанный с активным выпрямителем общим звеном постоянного тока. При этом активный выпрямитель поддерживает неизменным напряжение в звене постоянного тока, а автономный инвертор — постоянную частоту в сети и обеспечивает распределение мощностей между генераторами. В настоящей статье исследуется использование такой системы для суммирования мощностей двух генераторов при работе на общую нагрузку: в одном из них скорость изменяется, а в другом — постоянна.**

**Сергей Герман-Галкин,  
д. т. н., профессор**

germangalkin@gmail.com

### Введение

В статье рассматривается энергетическая система, в которой синхронный магнитоэлектрический генератор (СМГ) с изменяющейся скоростью вращения работает параллельно с электромагнитным генератором (СГ) с постоянной скоростью вращения на одну электрическую сеть. Такие системы применяются в судовых электрических сетях, где СМГ связан с валом винта судна, в авиационных системах, в разветвленных автономных электрических сетях с ветрогенераторами и т. д. Решение вопросов, связанных с проблемами работы различных источников на одну электрическую сеть, имеет прямое отношение к созданию так называемых интеллектуальных («умных») электрических сетей (Smart grid) [6, 9, 12–15, 19].

В публикации исследования осуществлены применительно к судовой электрической сети, в которой одним источником энергии является дизель-генератор, а другим — валогенератор.

### Блок-схема

Блок-схема системы, представленная на рис. 1, содержит:

1. Дизель-генератор, включающий двигатель внутреннего сгорания (ДВС) с регулятором скорости дизеля (РСД), и синхронный генератор (СГ) с электромагнитным возбуждением и регулятором напряжения (РН).
2. Валогенератор, механически связанный с валом (В) судна, включающий синхронный магнито-

- электрический генератор (СМГ), активный выпрямитель (АВ) с системой управления (СУАВ).
- 3. Автономный инвертор (АИ) со схемой управления (СУАИ).
- 4. Судовую сеть переменного тока (220/380 В 50 Гц) с изменяющейся нагрузкой (Н).

Напряжение на выходе СМГ изменяется пропорционально его скорости вращения. Для поддержания неизменного напряжения в сети переменного тока к СМГ валогенератора подключены активный выпрямитель (АВ) и автономный инвертор (АИ), связанные звеном постоянного тока. Активный выпрямитель поддерживает неизменным напряжение в звене постоянного тока при изменении напряжения на выходе СМГ, а автономный инвертор поддерживает постоянную частоту в сети и обеспечивает суммирование мощностей двух генераторов. Обведенная пунктиром часть блок-схемы (МССМГАВ) исследована в предыдущем уроке [8], где показано, что в ней напряжение на выходе АВ поддерживается неизменным при изменении скорости вращения СМГ и нагрузки в определенном, ограниченном диапазоне.

В рассматриваемой судовой электрической сети исследуются электромагнитные и энергетические процессы при разделе мощности между генераторами и при переключении всей нагрузки с одного генератора на другой.

При таком анализе исследователь сталкивается с проблемой суммирования мощностей двух (иногда более) источников переменного напряжения. Суммирование мощностей двух (или более) источников энергии имеет давнюю историю [2, 11, 17, 20, 21]. Когда эти источники являются источниками напряжения, в таких системах возникают колебательные процессы, при которых источники обмениваются активными и реактивными мощностями помимо нагрузки.

Проблемы суммирования мощностей двух и более источников решаются значительно проще, когда один является источником напряжения (master mode), а другой (или другие) — источником тока (slave mode). В рассматриваемой системе источник тока легко реализуется на автономном инверторе при токовом управлении [7]. Причем ток на выходе АИ (рис. 1) управляется как по величине, так и по фазе, что позволяет генерировать в нагрузку активную и реактивную мощность и управлять этими мощностями.

При построении энергетических установок для автономных и неавтономных объектов первостепенное значение приобретает задачи оптимизации энергетических характеристик. Эти задачи на практике решаются благодаря успехам в области электромеханики, полупроводниковой и микропроцессорной техники. Их реализация базируется на анализе электромагнитных процессов в рассматриваемых системах.

**Анализ**

Базой аналитических методов данного класса систем служат теоретические положения,

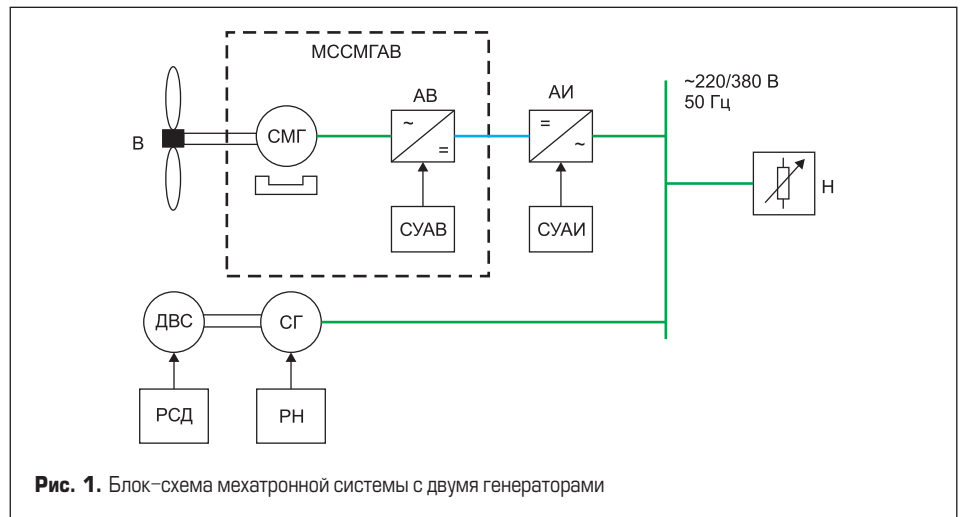


Рис. 1. Блок-схема мехатронной системы с двумя генераторами

изложенные в классических трудах по электрическим машинам и полупроводниковым преобразователям, управляющим их работой [1, 3, 5, 7, 10, 16, 18, 21, 22].

При этом исследование электромагнитных и энергетических процессов необходимо осуществлять с различной степенью упрощения в зависимости от решаемых задач [21].

Ниже эти задачи описаны без учета демпферных обмоток СГ, аperiodических составляющих токов статора СГ и изменения скорости вращения вала СГ.

При таком исследовании систему координат удобно связать с продольной ( $d$ ) и поперечной ( $q$ ) координатами синхронной машины, вращающихся с синхронной скоростью ( $\omega = p\omega_m = \text{const}$ ). В этом случае вектор потока сцепления возбуждения совпадает с осью  $d$ , а вектор ЭДС синхронной машины — с осью  $q$ .

При построении схемы управления АИ, рассчитанной на работу с изменяющейся нагрузкой, управление инвертором организуется в синхронно вращающейся системе координат ( $d, q$ ), с релейной отрицательной обратной связью по составляющим  $I_d, I_q$  [1, 7]. Такое управление получило название «токовый коридор».

Электромагнитные процессы в системе при учете оговоренных выше допущений могут

быть исследованы на основании эквивалентной схемы, представленной на рис. 2.

В этой эквивалентной схеме замещения автономный инвертор (АИ) представлен управляемым источником тока  $J$ , который подключен параллельно нагрузке и статорным обмоткам синхронного генератора с неизменной ЭДС ( $E_1$ ). Индуктивное и активное сопротивление в схеме замещения являются внутренними параметрами СГ.

Математическое описание системы во вращающейся синхронно с валом СГ системе координат может быть представлено в виде:

$$\begin{aligned} \vec{E}_1(t) &= \vec{U}_1(t) + L \frac{d\vec{I}_1(t)}{dt} + \\ &+ r\vec{I}_1(t) + jx_d\vec{I}_{1d}(t) + jx_q\vec{I}_{1q}(t), \\ \vec{I}_L(t) &= \vec{I}_1(t) + \vec{J}(t), \end{aligned} \quad (1)$$

где  $\vec{E}_1(t)$  — пространственный (результатирующий) вектор ЭДС на статорных обмотках СГ дизель-генератора;  $\vec{U}_1(t)$  — пространственный вектор напряжения на нагрузке;  $\vec{I}_1(t)$  — пространственный вектор тока в якоре СГ дизель-генератора;  $\vec{I}_{1d}(t), \vec{I}_{1q}(t)$  — пространственный вектор токов СГ в осях  $d, q$ ;  $\vec{J}(t)$  — пространственный вектор первой гармоники тока, генерируемый инвертором;  $\vec{I}_L(t)$  — пространственный вектор тока в нагрузке;  $x_d = x + x_{ad} = \omega(L + L_d), x_q = x + x_{aq} = \omega(L + L_q)$ , — реактивные параметры СГ по продольной и поперечной осям;  $r$  — активное сопротивление синхронного генератора (СГ).

Заметим, что запись  $\vec{E}_1(t), \vec{U}_1(t), \vec{I}_1(t), \vec{I}_{1d}(t), \vec{I}_{1q}(t), \vec{J}(t)$  и т. д. в уравнениях (1) подчеркивает то обстоятельство, что эти величины являются постоянными с изменяющимися во времени значениями. Изменения значений токов, напряжений и ЭДС наблюдаются во время переходных процессов.

В установившемся режиме, при учете соотношения  $r \ll x_d, r \ll x_q$  [5], система уравнений (2) преобразуется к виду:

$$\begin{aligned} \vec{E}_1 &= \vec{U}_1 + jx_d\vec{I}_{1d} + jx_q\vec{I}_{1q}, \\ \vec{I}_L &= \vec{I}_1 + \vec{J}. \end{aligned} \quad (2)$$

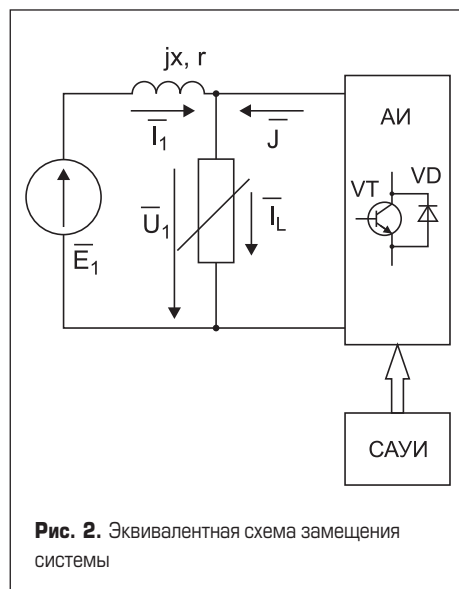


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения системы

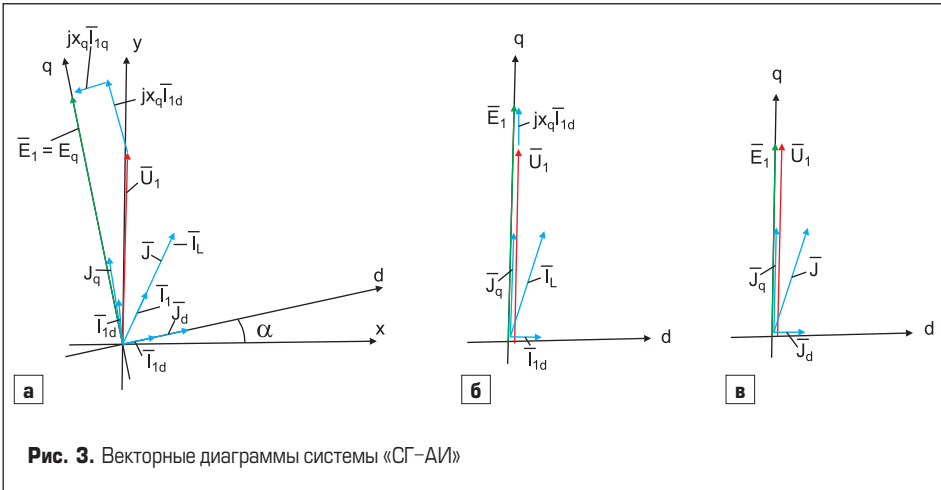


Рис. 3. Векторные диаграммы системы «СГ-АИ»

Величина угла смещения  $\alpha$  определяет активную мощность, отдаваемую СГ в общую сеть [5], а значение этого угла равно:

$$\alpha = \arcsin \frac{x_q I_{1q}}{U_1} \quad (4)$$

Когда вся активная нагрузка включена на валогенератор, угол  $\alpha = 0$ , связь токов нагрузки, СГ дизель-генератора и источника тока (автономного инвертора) принимает вид:

$$\bar{I}_{Ld} = \bar{I}_d, \bar{I}_{Lq} = \bar{J}_q, \bar{J}_d = 0, \bar{I}_{1q} = 0. \quad (5)$$

Векторная диаграмма в синхронно вращающейся системе координат для этого случая построена на рис. 3б.

Когда вся нагрузка включена на валогенератор, связь токов нагрузки, СГ дизель-генератора и источника тока (автономного инвертора) принимает вид:

$$\bar{I}_{Ld} = \bar{J}_d, \bar{I}_{Lq} = \bar{J}_q, \bar{I}_{1d} = 0, \bar{I}_{1q} = 0, \quad (6)$$

а векторная диаграмма в синхронно вращающейся системе координат для этого случая построена на рис. 3в.

Из представленных векторных диаграмм следует, что наличие активного тока в якоре СГ приводит к смещению систем координат  $d, q$  СГ и  $x, y$ , что следует учитывать при построении системы управления инвертором.

Таблица 1. Параметры дизель-генератора

Параметры СГ	$S_{ном}$ , кВ·А	$\omega_{м, ном}$ , рад/с	$U^*_{1ном}$ , В	$r$ , Ом	$L$ , мГн	$L_d$ , мГн	$L_q$ , мГн	$p$	$m$
Значение	85	157	310	0,055	0,3595	12,82	5,692	2	3

Примечание.  $U^*_{1ном}$  — амплитуда фазного напряжения.

Наличие управляемого по величине и фазе источника тока позволяет разгрузить СГ дизель-генератора либо от части активного и реактивного тока, либо при необходимости от полного или активного тока и тем самым переключить нагрузку на валогенератор. Ниже физика работы двух генераторов на общую нагрузку анализируется с использованием векторных диаграмм, построенных на основании уравнений (2). В качестве примеров рассмотрены режим равенства нагрузки на дизель-генератор и валогенератор и режимы, когда вся активная нагрузка, а также когда вся нагрузка включена на валогенератор.

В случае равенства активной и реактивной нагрузки на дизель-генератор и валогенератор связь токов нагрузки, генератора и источника тока (автономного инвертора) имеет вид:

$$\bar{I}_{1d} = \bar{J}_d = \frac{\bar{I}_{Ld}}{2}, \bar{I}_{1q} = \bar{J}_q = \frac{\bar{I}_{Lq}}{2}. \quad (3)$$

Для этого примера по уравнениям (2) на рис. 3а построена векторная диаграмма в синхронно вращающейся системе координат. В данном случае оси  $d, q$  СГ смещены относительно осей  $x, y$ , связанных с напряжением на нагрузке.

### Моделирование

Далее рассматривается система с синхронным явнополюсным дизель-генератором с электромагнитным возбуждением 50 Гц 400 В 85 кВ·А 1500 RPM, параметры генератора приведены

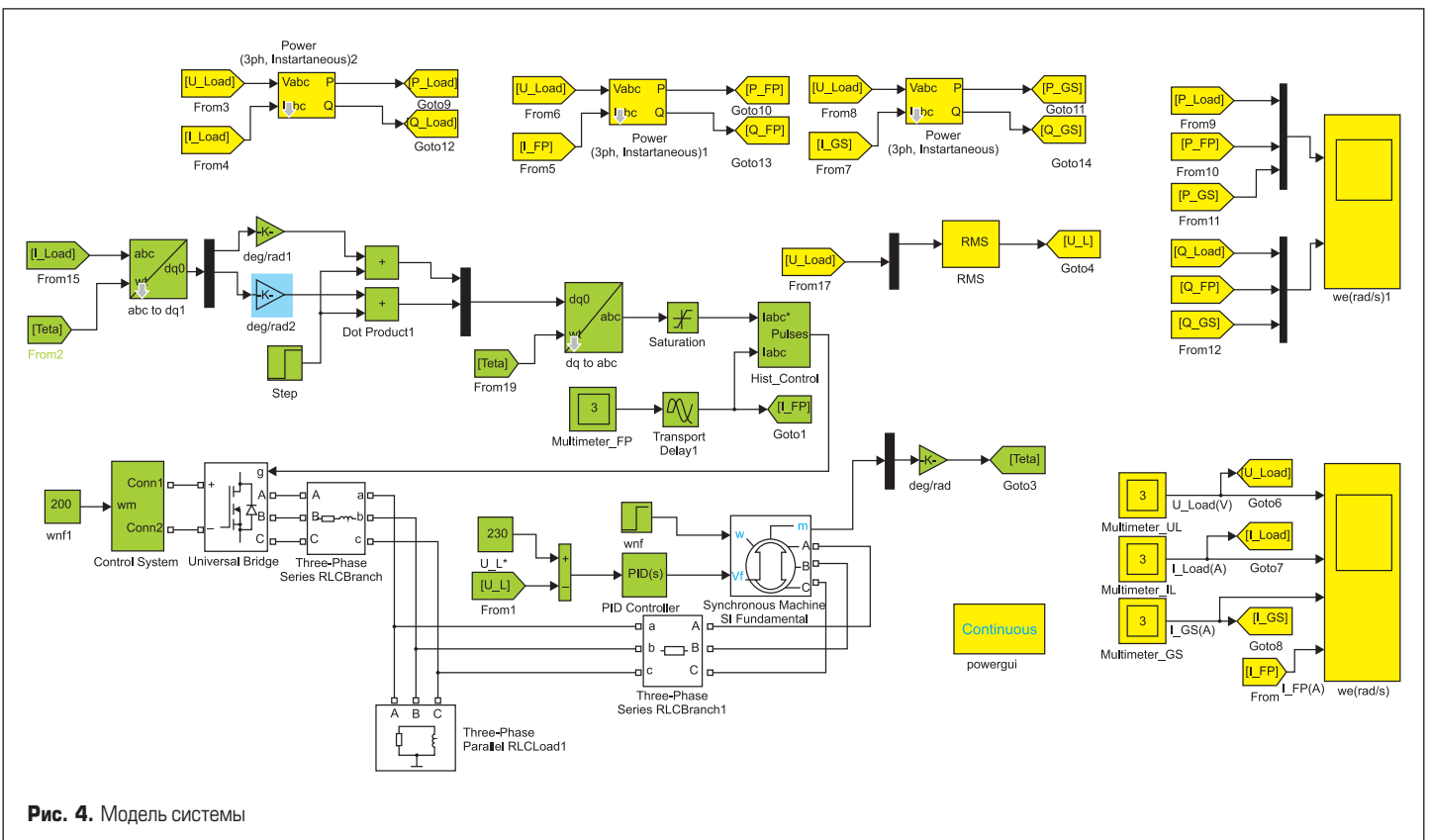


Рис. 4. Модель системы

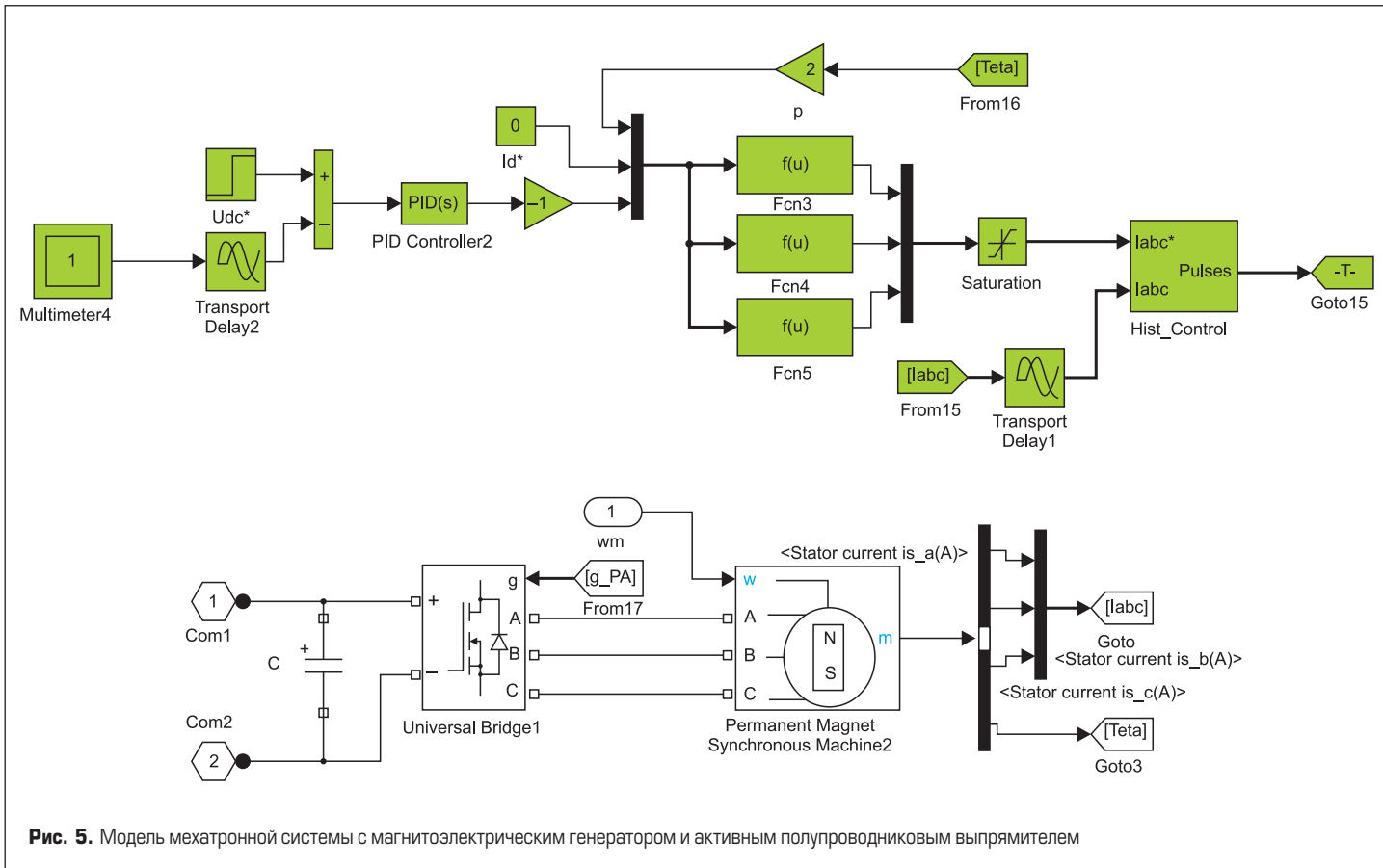


Рис. 5. Модель мехатронной системы с магнитоэлектрическим генератором и активным полупроводниковым выпрямителем

в таблице 1. Параметры нагрузки в общей сети следующие:  $P_{Load} = 50$  кВт,  $Q_{Load} = 20$  кВ·А.

Виртуальная модель рассматриваемой мехатронной системы приведена на рис. 4. В ней вся математика энергетической подсистемы «спрятана» в виртуальных блоках па-

кета Sim Power System. В блоках управления АИ реализуется преобразование Парка — Горева [10] для привязки управления инвертором к осям  $d, q$  СГ. В управляющей части модели задаются токи инвертора в координатах  $d, q$ , первая из которых в определен-

ном масштабе есть реактивная мощность, а вторая — активная мощность в нагрузке. В блоке Control System, модель которого показана на рис. 5, реализована модель мехатронной системы с магнитоэлектрическим генератором и активным полупроводнико-

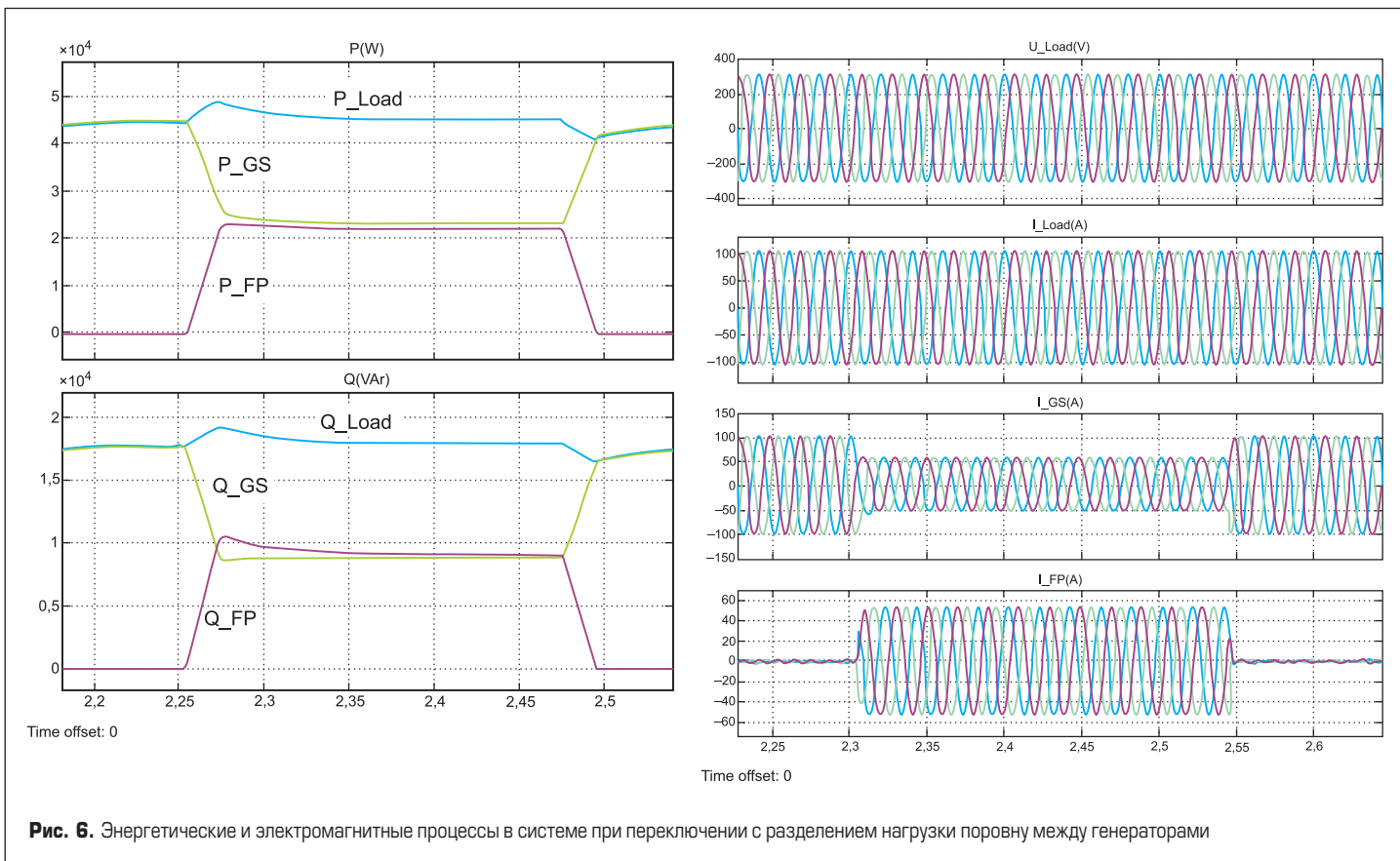
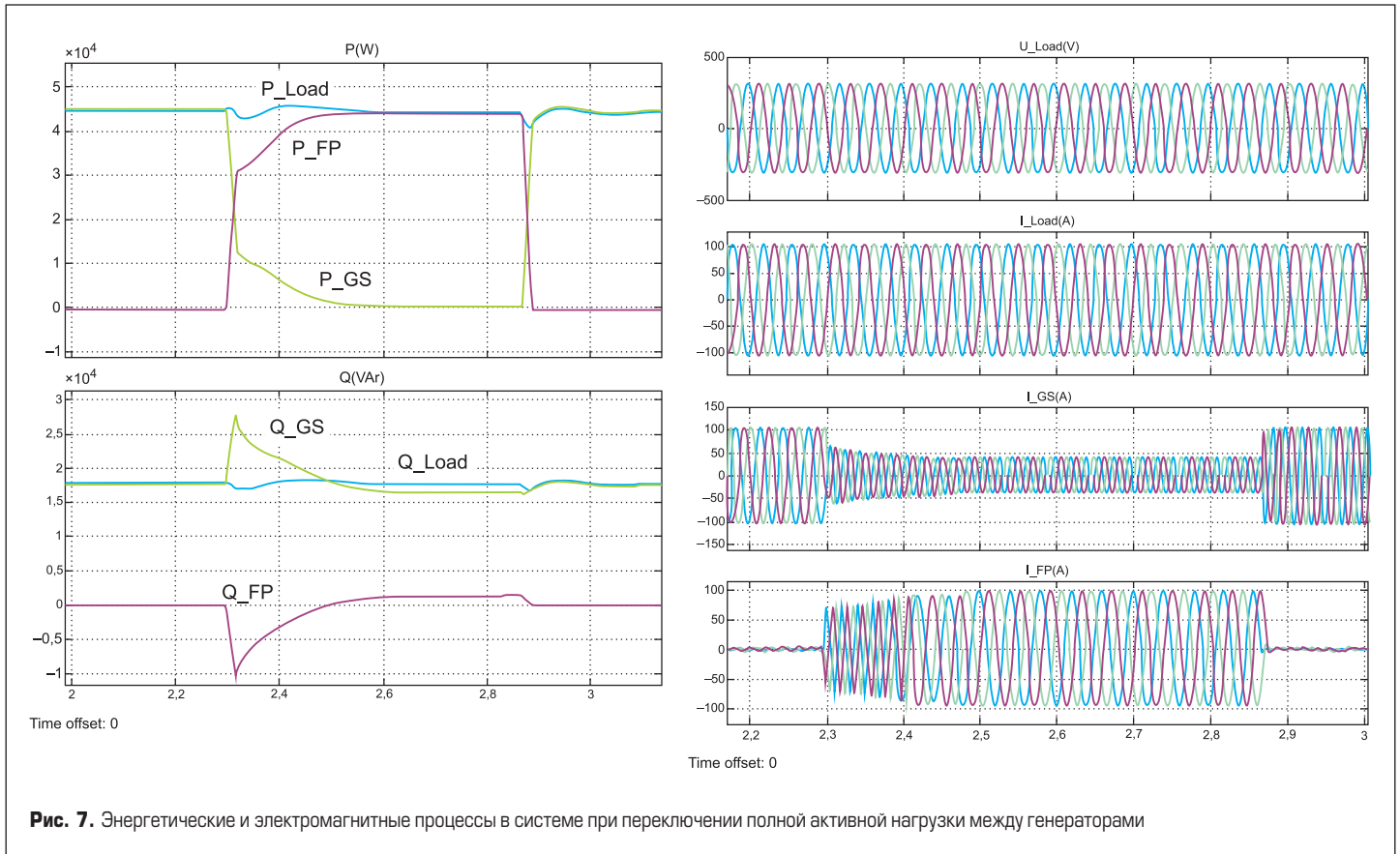


Рис. 6. Энергетические и электромагнитные процессы в системе при переключении с разделением нагрузки поровну между генераторами



вым выпрямителем, разработанная и исследованная в [8].

При представлении результатов моделирования введены следующие обозначения:  $U_{Load}$ ,  $I_{Load}$ ,  $P_{Load}$ ,  $Q_{Load}$  — напряжение, ток, активная и реактивная мощность в нагрузке;  $U_{GS}$ ,  $I_{GS}$ ,  $P_{GS}$ ,  $Q_{GS}$  — напряжение, ток, активная и реактивная мощность

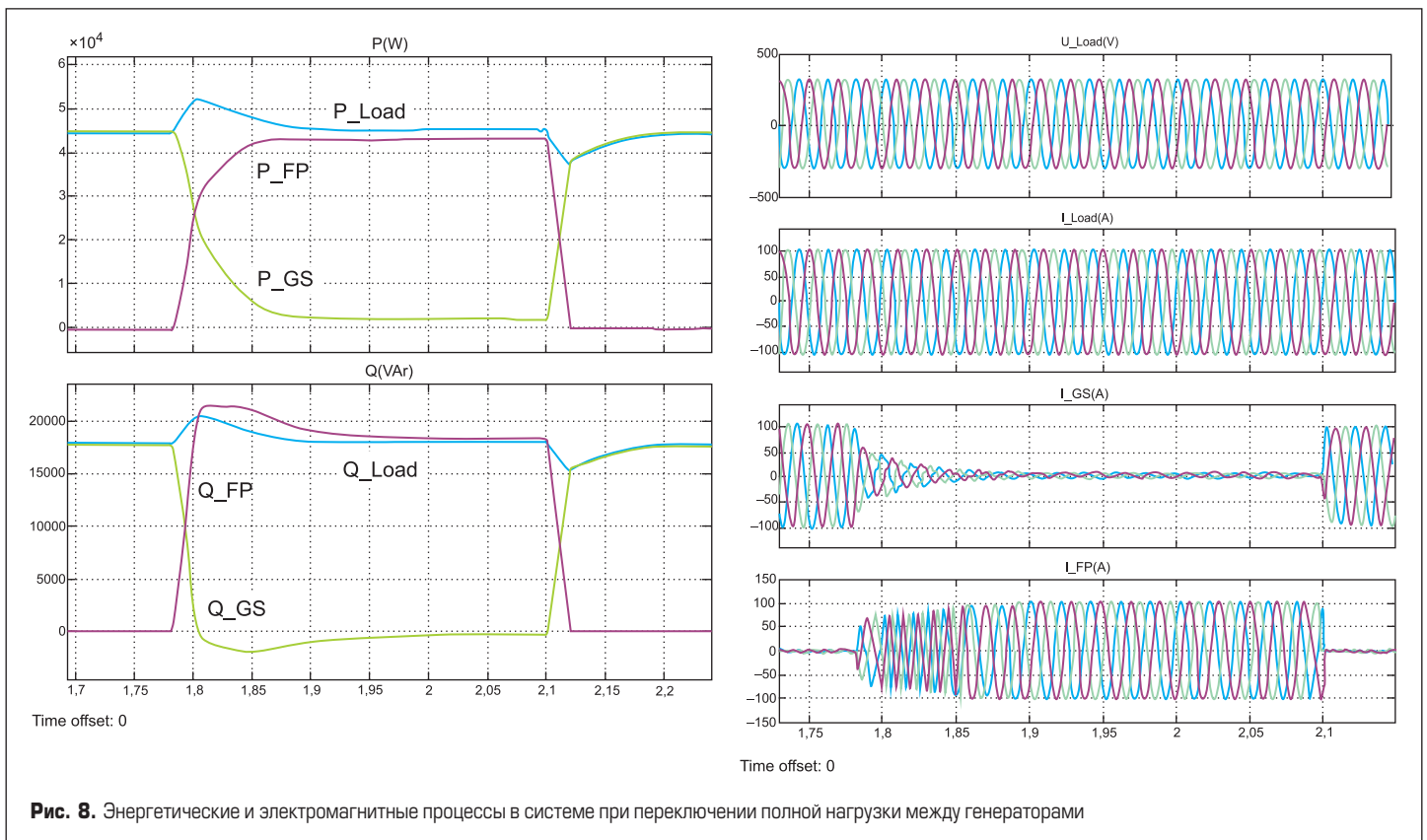
СГ дизель-генератора;  $U_{FP}$ ,  $I_{FP}$ ,  $P_{FP}$ ,  $Q_{FP}$  — напряжение, ток, активная и реактивная мощность АИ валогенератора.

Заданием токов инвертора в осях  $d, q$  СГ осуществляется управление мощностью АИ. При этом мощность от СГ дизель-генератора автоматически изменяется в соответствии с выращениями:

$$\begin{aligned} P_{GS} &= P_{Load} - P_{FP}, \\ Q_{GS} &= Q_{Load} - Q_{FP}. \end{aligned} \quad (7)$$

Результаты моделирования представлены на рис. 6–8.

На рис. 6 отображен режим подключения и отключения подсистемы МССМГВБ (рис. 1) на половину активной и реактивной мощности



нагрузки. В этом случае активная и реактивная мощности разделяются поровну между генераторами, а переходные энергетические и электромагнитные процессы близки аperiodическим.

На рис. 7 представлен случай, когда валогенератор в подсистеме МССМГАВ подключается и отключается на полную активную мощность нагрузки. В этом случае при подключении валогенератора он принимает на себя всю активную мощность, а всю реактивную мощность в нагрузке обеспечивает СГ. При подключении валогенератора в системе наблюдаются нелинейные переходные процессы, физика которых подлежит выяснению.

На рис. 8 проиллюстрирован случай, когда валогенератор в подсистеме МССМГАВ подключается и отключается на полную мощность нагрузки. В этом случае активная и реактивная мощности переключаются между генераторами, и полная мощность нагрузки обеспечивается СМГ валогенератора.

Таким образом, моделирование подтверждает способность рассматриваемой системы разделять активную и реактивную мощность в нагрузке пропорционально заданным сигналам управления инвертором. При этом перераспределение мощностей осуществляется без возникновения колебательных процессов обмена активными и реактивными мощностями между генераторами помимо нагрузки.

### Заключение

Специфика применения судовых генераторов часто требует их параллельной работы. Это условие вызвано не только потребляемой мощностью нагрузки, но прежде всего, обеспечением безопасности судна, особенно в трудных условиях плавания или маневрах. Одним из способов решения этой проблемы является асимметричная параллельная работа генераторов, реализованная таким образом, чтобы один генератор был нагружен на 70–80%, а другой на 30–20% от всей мощности нагрузки. В этом случае большая мощность обеспечивается валогенератором, а меньшая — дизель-генератором.

Разработанная модель позволяет исследовать любые возможные случаи перераспределения мощностей двух генераторов как в установившихся, так и в переходных режимах работы.

### Литература

1. Бродовский В. Н., Иванов Е. С. Приводы с частотно-токовым управлением. М.: Энергия, 1974.
2. Болотин Б. И., Вайнер В. Л. Инженерные методы расчетов устойчивости судовых автоматизированных систем. Л.: Судостроение, 1974.
3. Булгаков А. А. Новая теория управляемых выпрямителей. М.: Наука, 1970.
4. Бельский А. А., Абрамович Б. Н. Критерий выбора оптимальных параметров ветродизельных комплексов для энергообеспечения потребителей минерально-сырьевого комплекса. XI Неделя науки СПбГПУ: материалы межд. науч.-практ. конф., ч. II. СПб.: изд-во СПбГПУ, 2011.
5. Вольдек А. И. Электрические машины. М.: Энергия, 1978.
6. Васьюк А. Г., Тягунов М. Г. Распределенные системы энергоснабжения на основе гибридных энергокомплексов с установками возобновляемой энергетики // Новое в российской электроэнергетике. 2013. № 4.
7. Герман-Галкин С. Г. Matlab — Simulink. Проектирование мехатронных систем. СПб.: Корона-Век, 2008.
8. Герман-Галкин С. Г. ШКОЛА MATLAB. Виртуальные лаборатории устройств силовой электроники в среде Matlab+Simulink. Урок 24. Мехатронная система с магнитоэлектрическим генератором и активным полупроводниковым выпрямителем // Силовая электроника. 2018. № 1.
9. Елистратов В. В. Возобновляемая энергетика. СПб., Изд-во Политехнического университета, 2016.
10. Ковач К. П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Пер. с нем. М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963.
11. Константинов В. Н. Синхронизация судовых синхронных генераторов. Теория и методы расчета. Л.: Судостроение, 1978.
12. Бердников Р. Н., Бушуев В. В., Васильев С. Н. и др. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС). М.: ОАО «НТЦ ФСК ЕЭС», 2012.
13. Кундас С. П., Шенк Ю., Вайцехович Н. Н. Гибридные технологии в использовании возобновляемых источников энергии // Энергоэффективность. 2012. № 2.
14. Лукутин Б. В., Суржикова О. А., Шандарова Е. Б. Возобновляемая энергетика в децентрализованном электроснабжении. М.: Энергоатомиздат, 2008.
15. Минин В. А. Оценка экономической эффективности совместной работы дизельных электростанций и ветроэнергетических установок в условиях Севера // Альтернативная энергетика и экология. 2010. № 7.
16. Розанов Ю. К. Силовая электроника. М.: Издательский дом МЭИ, 2007.
17. Савенко А. Е., Голубев А. Н. Обменные колебания мощности в судовых электротехнических комплексах. Иваново, 2016.
18. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным управлением. М.: Академия, 2006.
19. Соснина Е. Н., Шалухо А. В., Липужин И. А. Simulink-модель ветродизельной электростанции с вставкой постоянного тока. Сборник статей Всерос. науч.-техн. конф. Актуальные проблемы электроэнергетики. Нижний Новгород, 2015.
20. Тимченко В. Ф. Колебания нагрузок и обменной мощности энергосистем. М.: Энергия, 1975.
21. Токарев Л. Н. Математическое описание, расчет и моделирование физических процессов в судовых электростанциях. Л.: Судостроение, 1980.
22. Ясаков Г. С. Корабельные электроэнергетические системы. Часть 1. СПб., Военно-морская академия им. Адмирала Флота Советского Союза Н.Г. Кузнецова, 1999.