

МОДЕЛИ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ СТАБИЛИЗАЦИИ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ В АВТОНОМНЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

А.П. Нырков, А.А. Жиленков, С.Г. Черный

Рассмотрена задача обеспечения устойчивой параллельной работы двух и более газодизель-генераторов в составе автономной электроэнергетической системы морских буровых платформ и объектов водного транспорта. Проанализированы условия и особенности работы системы. Даны рекомендации по выбору оптимальных значений параметров регулятора числа оборотов газодизеля. Разработаны модели, позволяющие решить широкий круг задач управления в автономной энергетике и обеспечения необходимых показателей качества электроэнергии.

Ключевые слова: показатель качества, электроэнергетическая система, газодизель-генераторный агрегат, буровая платформа, водный транспорт.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время все более возрастает интерес к возможности применения газодизельных двигателей в автономных электроэнергетических системах (АЭЭС) морских буровых платформ (БП) и объектов водного транспорта в качестве приводных двигателей синхронных генераторов — основных источников энергии. Интерес этот вызван рядом преимуществ применения газодизель-генераторных агрегатов (ГДГА) [1—4]:

— на БП в качестве топлива можно использовать добываемый попутно с нефтью нефтяной газ, что снижает себестоимость эксплуатации БП;

— возможность работы главных источников энергии АЭЭС на дизельном и на газодизельном топливе, что увеличивает надежность АЭЭС;

— улучшение экологических показателей, так как продукты сгорания газодизельного топлива менее (до 80 %) токсичны по сравнению с выхлопами эксплуатируемых в настоящее время дизель-генераторных агрегатов; в выхлопных газах ГДГА нет твердых составляющих — сажи и частиц диоксида серы;

— снижение износа деталей двигателя ГДГА, поскольку из-за отсутствия в продуктах сгорания оксидов серы и сажи на деталях не образуется на-

гар, масло не загрязняется и срок службы двигателя возрастает в 1,5—2 раза.

В многогенераторных АЭЭС ГДГА не получили распространения, поскольку газодизельные двигатели чувствительны к нагрузке, и их типовые системы автоматического регулирования подачи топлива не обеспечивают идентичности динамических характеристик ГДГА, работающих параллельно. В настоящее время в газодизелях используются механические и электронные системы автоматического регулирования подачи топлива.

Механические системы автоматического регулирования подачи топлива отличаются рядом существенных недостатков: большое число передаточных звеньев и различного рода люфтов не позволяют достаточно точно регулировать подачу газов; плохое качество регулирования в переходных режимах; невозможность автоматического контроля аварийных ситуаций; параллельной работы ГДГА. Поэтому применение механических систем регулирования ГДГА возможно только при индивидуальной работе на нагрузку, т. е. в АЭЭС малой мощности.

Электронные системы регулирования теоретически позволяют в той или иной степени избавиться от указанных недостатков и обеспечить возмож-



ность параллельной работы ГДГА в многогенераторных АЭС [1].

В связи с этим возникает задача построения эффективных систем контроля за обменными колебаниями мощности и пропорционального выравнивания нагрузки на ГДГА. Необходимо детальные исследования как собственных колебаний мощности каждого агрегата, так и обменных ее колебаний при совместной работе нескольких ГДГА. Подобные исследования на реальных объектах весьма дорогостоящи и могут приводиться лишь на заключительном этапе построения. Поэтому важной задачей становится разработка адекватных моделей исследуемых объектов.

1. ПРОБЛЕМА УСТОЙЧИВОСТИ ГДГА

Современные АЭС объектов водного транспорта и морских БП представляют собой сложные электротехнические комплексы источников и потребителей электроэнергии, работающих в различных и изменяющихся во времени режимах. Каждый потребитель характеризуется нагрузкой, которая не зависит от режимов работы других электропотребителей. Построить общую диаграмму нагрузок АЭС, учитывая нагрузку каждого потребителя, практически невозможно. Кроме того, необходимо учитывать специфику работы электропривода рассматриваемого объекта. Например, для АЭС буровой установки наиболее тяжелыми являются режимы спуско-подъемных операций и режим бурения, который характеризуется резкими изменениями нагрузок на валу главного привода, связанными с переменными литологическими условиями бурения и прочими трудно детерминированными факторами. Таким образом, нагрузка на источники электроэнергии АЭС в процессе эксплуатации характеризуется как резкопеременная [1].

Обобщая, рассматриваемые АЭС можно охарактеризовать следующими особенностями:

- коммутация нагрузок в автономной сети носит импульсный характер со случайным распределением величин и длительностей; коммутируемые нагрузки могут достигать сотен киловатт;
- при произвольном наложении всех нагрузок секций главного распределительного щита межкоммутационные интервалы могут составлять от нескольких секунд до нескольких минут;
- периодичность коммутации нагрузок близка к постоянным времени ГДГА;
- при наличии колебательных свойств генерирующих агрегатов коммутация нагрузок способствует «раскачиванию» последних и появлению ко-

лебаний амплитуд напряжений и активной мощности между генераторными агрегатами, которые приводят к появлению колебаний частоты;

— коммутационные процессы подключения-отключения нагрузок носят случайный характер и приводят к случайным колебаниям амплитуд напряжений и отклонений частоты сети. В свою очередь, отклонения частоты сети могут использоваться для оценки процессов коммутации нагрузок в автономной сети.

Эти особенности были обнаружены авторами в результате полевых экспериментов на одной из БП, эксплуатируемых на Азово-Черноморском шельфе [5–9], и анализа данных, записанных при помощи программного обеспечения, поставляемого с оборудованием компании АВВ.

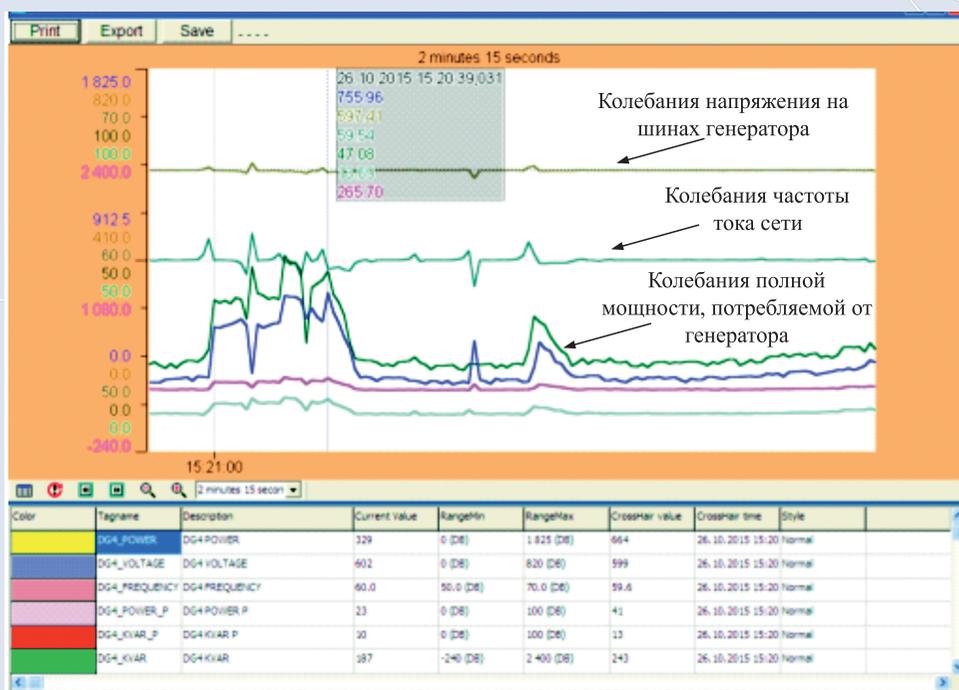
На рис. 1 (см. третью страницу обложки) приведены данные записи основных параметров электроэнергии при работе главной лебедки во время спуско-подъемных операций. Видно, что колебания частоты и напряжения сети испытывают длительные существенные отклонения от номинальных значений. Во время измерений в работе находились два дизель-генераторных агрегата с номинальной частотой вырабатываемого тока 60 Гц и номинальным напряжением 600 В.

Были зарегистрированы повышения напряжения, достигавшие значений 820 В. Частота вырабатываемой дизель-генераторными агрегатами электроэнергии испытывала колебания от 50 до 70 Гц при набросе и сбросе нагрузки.

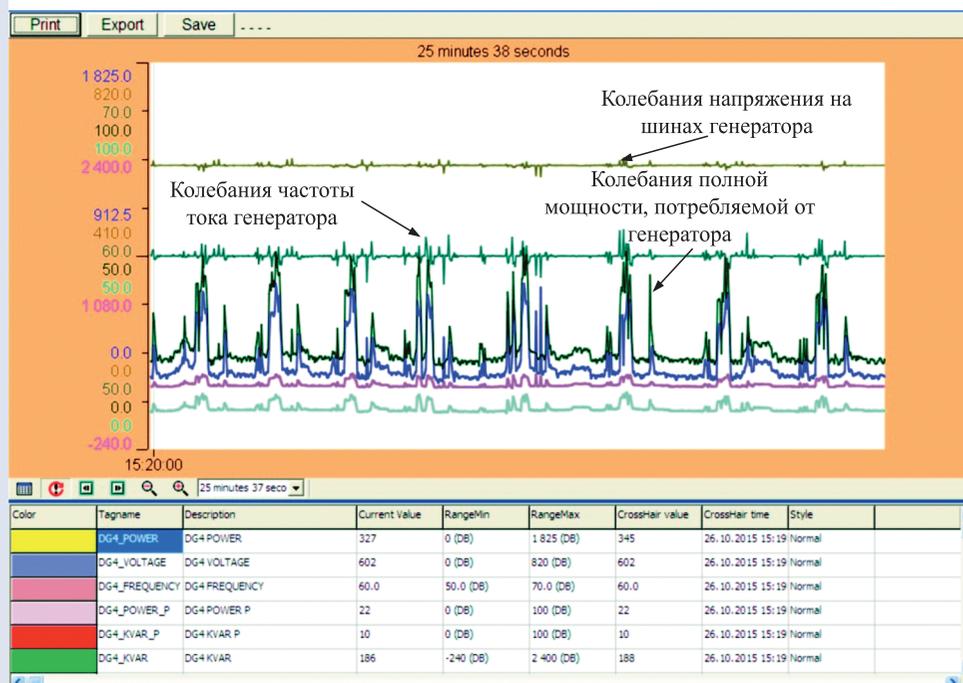
Анализ работы АЭС позволил установить, что коммутационные процессы, обусловленные подключением и отключением нагрузок, приводят к колебаниям напряжений и частоты сети, спектр которых находится в том же частотном диапазоне, что и спектр колебаний оборотов известных ГДГА [2–4], что способствует возникновению обменных колебаний мощности между параллельно работающими генераторами. Экспериментально были получены значения коэффициентов настройки регулятора оборотов газодизель-генератора, которые при заданной мощности обеспечивают наилучший переходный процесс. Анализ показал, что регулятор следует настраивать не при номинальной мощности газодизель-генератора, а при минимальной. Было также показано, что возрастание нагрузки будет приводить к возрастанию запаса устойчивости.

Теоретически, при помощи определенного комплекса аппаратно-программных средств управления параметрами регулятора оборотов ГДГА можно оптимизировать динамические режимы регулирования во всем диапазоне нагрузок и согласно расчетам [2] в 15–20 раз снизить дисперсию колебаний оборотов вала газодизеля. Исследования

**Рисунки к статье А.П. Ныркова, А.А. Жиленкова, С.Г. Черного
«МОДЕЛИ МОНИТОРИНГА И УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССАМИ
СТАБИЛИЗАЦИИ ПОТОКОВ МОЩНОСТИ В АВТОНОМНЫХ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ»
(см. с. 22 – 28)**



а



б

**Рис. 1. Основные параметры электроэнергии АЭЭС буровой платформы при спуско-подъемных операциях:
а – межкоммутационный интервал 2 мин; б – межкоммутационный интервал 25 мин**

показали, что оптимизация параметров регулятора ГДГА при его одиночной работе позволяет повысить стабильность оборотов газодизеля до стабильности оборотов дизельного двигателя, что открывает возможности обеспечения параллельной работы ГДГА при условии эффективного контроля активной мощности каждого из генераторов.

Для проведения детальных исследований процессов, протекающих при совместной работе нескольких ГДГА, необходима разработка адекватной модели ГДГА и его регулятора с учетом ключевых особенностей газодизельного двигателя.

2. МОДЕЛЬ ГАЗОДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ОБМЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ МЕЖДУ ГДГА

В пакете «Matlab-Simulink» имеются встроенные модели как приводных двигателей, так и синхронных генераторов с достаточно широкой номенклатурной изменяемых параметров. Однако они не позволяют учитывать такие конструктивные особенности, как наличие турбонагнетателя, оказывающего существенное влияние на динамику агрегата, наличие стабилизирующих обратных связей по частоте вращения вала двигателя и др. Поэтому библиотечные модели не подходят для решения поставленных задач. Прежде чем создавать Matlab-модель, соответствующую задачам исследований, необходимо определиться с характером и параметрами собственных колебаний частоты вращения вала ГДГА.

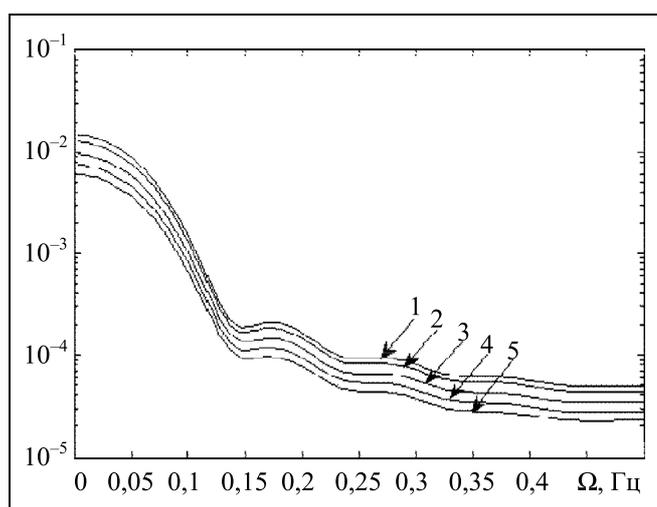


Рис. 2. Кривые спектральной плотности колебаний частоты вращения вала газодизеля для диапазона нагрузок от номинальной (кривая 5) до холодного хода (кривая 1) с шагом 20 % от нагрузки

Исследования колебаний частоты выходного напряжения реальных объектов, выполненные авторами, показали, что в целом они носят случайный характер, причем эти колебания во всем диапазоне нагрузок представляют собой нестационарный случайный процесс с изменяющимся математическим ожиданием и дисперсией. Для постоянной нагрузки этот процесс можно рассматривать как гауссовский. На рис. 2 представлены обобщенные кривые спектральной плотности колебаний частоты вращения вала газодизеля ГДВГ-1А-500 для диапазона нагрузок от номинальной (кривая 5) до холодного хода (кривая 1) с шагом 20 % нагрузки. Из вида этих кривых вытекает, что основная энергия спектра колебаний находится в интервале (0,005—0,1) Гц, что позволяет в дальнейшем внести существенные упрощения в общую структуру динамической модели ГДГА.

Динамическая модель ГДГА (рис. 3) строилась с условием достижения адекватности моделирования динамических режимов сброса/наброса нагрузки модели и реального объекта. Сброс и наброс нагрузки с одновременным контролем частоты выходного напряжения генератора — это фактически единственной эксперимент, который можно провести на реальном объекте, получив в результате достоверные результаты.

Адекватность модели проверялась во всем диапазоне генерируемой мощности с шагом 20 %, учитывая, что газодизель является нелинейным объектом с изменяющимся коэффициентом усиления по управляющему воздействию, а его турбонагнетатель проявляет себя в динамических режимах наброса лишь в диапазоне нагрузок не ниже 0,6—0,7 от номинальной [9—11].

Параметры ПИД-регулятора известны в процессе проведения экспериментов. Он (см. рис. 3) представлен в виде трех параллельных звеньев — пропорционального, интегрирующего и дифференцирующего, объединенных по выходам через сумматор. Двигатель постоянного тока мощностью 100 Вт с широтно-импульсным регулятором напряжения представлен инерционным звеном W_y . Наличие зоны нечувствительности при повороте воздушной заслонки учтено введением звена с зоной нечувствительности (нелинейный элемент $НЭ$).

Сам двигатель, как элемент преобразования газозвушной смеси в момент на валу, представлен усилительным звеном $Д_{д.}$. Элемент чистого запаздывания учитывает интервалы времени между вспышками газозвушной смеси в цилиндрах и рассчитывается исходя из числа оборотов дизеля и числа цилиндров.

Поскольку интенсивность выхлопных газов непосредственно связана с моментом на валу, разви-

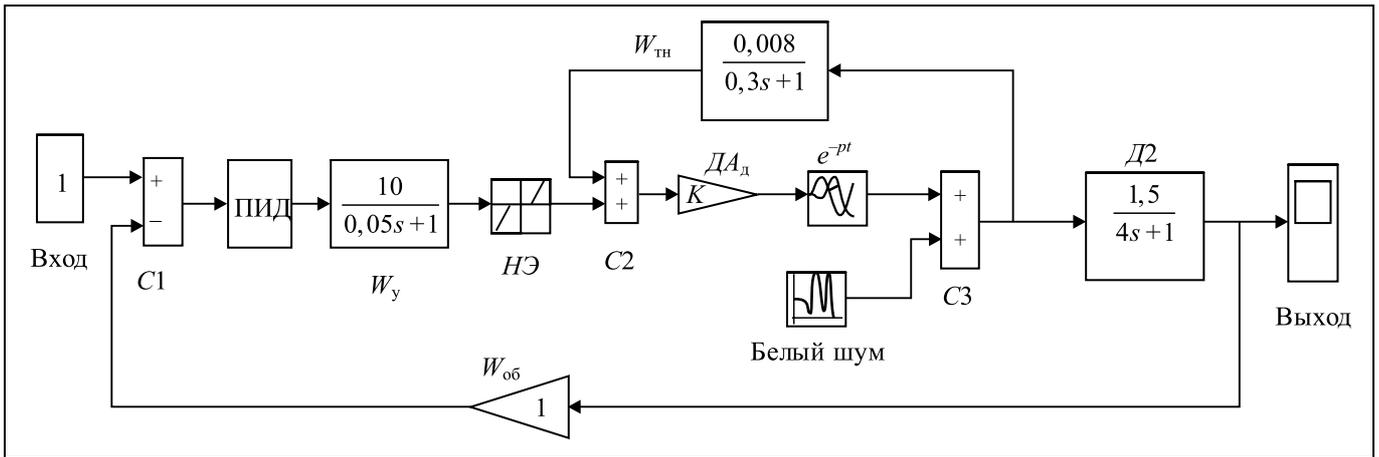


Рис. 3. Схема модели газодизеля

ваемым дизелем, а эффективность турбоагнетателя определяется именно интенсивностью потока выхлопных газов, то указанные два звена охватываются положительной обратной связью с инерционным звеном $W_{тн}$. Постоянная времени звена $W_{тн}$ определяется маховыми массами и оборотами ротора турбины, а коэффициент передачи, зависящий от нагрузки, определяется экспериментально параметром переходного процесса. Для обследованных газодизелей в диапазоне до 60 % нагрузки для режима сброса этот коэффициент можно принять равным нулю.

Звено D_2 осуществляющее преобразование момента на валу в частоту вращения вала двигателя учитывает его инерционные свойства. Постоянная времени T_d определяется моментом инерции маховых масс двигателя и ротора присоединенного генератора, эквивалентная постоянная времени двигателя $T_s = T_d/D$ обратно пропорциональна приемистости D двигателя D . Коэффициент передачи этого звена также определяется как $1/D$. Для генераторной нагрузки он изменяется в пропорции P_n/P (здесь P и P_n — соответственно значения номинальной и текущей мощности, отдаваемые генератором в нагрузку) [12, 13].

Обеспечение случайного характера колебаний частоты вращения вала двигателя осуществляется следующим образом. Известно, что спектральная плотность $S_{\text{вых}}(\omega)$ случайного сигнала на выходе линейного инерционного звена с коэффициентом передачи $W_n(j\omega)$ определяется из выражения $S_{\text{вых}}(\omega) = S(\omega)|W_n(j\omega)|^2$, где $S(\omega)$ — спектр входного сигнала. Эта формула обладает характерной особенностью — если в качестве исходного спектра используется белый шум, то спектр $S_{\text{вых}}(\omega)$ одно-

значно определяется квадратом модуля коэффициента передачи линейного звена. Таким образом, изменяя коэффициент передачи, мы изменяем центральную частоту спектра случайных колебаний частоты вращения вала двигателя.

Для получения в выходном параметре двигателя аддитивной помехи, описывающей колебания частоты вращения его вала, предусмотрено добавление шумовой составляющей в выходной момент двигателя через сумматор $C3$. Такое представление аддитивной помехи более точно отражает ее физическую сущность, поскольку генерирование момента с шумовой составляющей вполне объяснимо, например, изменяющимся качеством топлива и др.

В дальнейшем учет наклона статической характеристики $\Omega = f(M)$ можно обеспечить путем подключения к звену $D2$ дополнительного звена, выходной сигнал которого определяется как [5, 7] $\Omega = \Omega_0 - \Delta\Omega$, где M — крутящий момент, развиваемый на валу двигателя, Ω — текущее значение числа оборотов вала дизеля, Ω_0 — число оборотов в режиме холостого хода, $\Delta\Omega$ — отклонение оборотов вала двигателя при нагрузке. Введение данного звена, представляющего собой сумматор, позволяет учесть статический разброс нагрузки параллельно работающим генераторам.

Учитывая низкочастотный характер колебаний, генератор может быть представлен мультипликатором, в котором решается задача получения активной составляющей генерируемой мощности: $P = M\Omega$.

Разработанная модель ГДГА позволяет решать задачи распределения активной мощности между генераторными агрегатами и проверять эффективность систем ее распределения.

3. УПРАВЛЕНИЕ МОДЕЛЬЮ ГДГА

В современных АЭС широко применяются автоматизированные системы управления, в частности, автоматические устройства управления генераторными агрегатами, включающие в себя устройства синхронизации и распределения мощности и др. В современных системах применяется, как правило, микропроцессорное управление. В пакете «Matlab-Simulink» возможности моделирования микропроцессорных устройств управления пока довольно скромны, если не использовать специализированные дорогостоящие пакеты дополнений под строго определенную номенклатуру чипов. Поэтому становится актуальной задача создания модели энергетической системы в «Matlab», которая могла бы управляться микропроцессорной системой, созданной в другой системе моделирования. При этом система управления, собственно, как и энергетическая система, могут быть как виртуальными, так и реальными, а сопряжение с компьютером выполняться по определенному интерфейсу [12–17].

Для моделирования микропроцессорной системы управления авторы воспользовались САПР «Proteus», которая позволяет достаточно точно моделировать и отлаживать сложные устройства, в которых может содержаться несколько микроконтроллеров одновременно, причем разных семейств.

Рассмотрим далее модель системы мониторинга и управления электростанцией, состоящей из одного газодизель-генераторного агрегата, которая позволяет пользователю в оперативном режиме получать информацию о состоянии электрической станции, объеме производимой на ней электроэнергии, максимальной мощности станции. Управление моделью выполняется через COM-порт. В ее состав входят блоки (рис. 4): модель газодизеля, системы возбуждения генератора, коммутаторы, нагрузки различной мощности (100, 140 и 210 кВА), блоки измерения сигналов, блоки для работы с COM-портом (на рисунке не показаны).

Структура блока «Газодизель-возбуждение» показана на рис. 5.

Входными сигналами блока «Газодизель-возбуждение» служат требуемая частота оборотов (w_{ref}) (в относительных единицах) и фактическая частота оборотов (w_m). На выходе формируется сигнал, соответствующий отдаваемой газодизелем мощности (P_m). На систему возбуждения (блок «возбуждение») подаются опорное значение напряжения (V_{tref}) и фактическое значение напря-

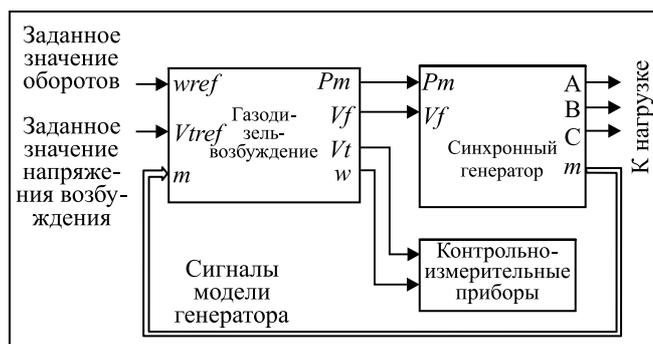


Рис. 4. Структурная схема модели электростанции с газодизель-генераторным агрегатом

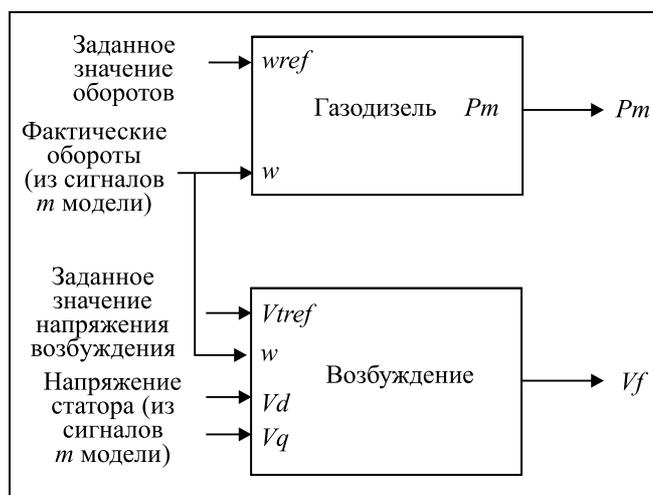


Рис. 5. Структура блока «Газодизель-возбуждение»

жения на статоре (v_{s_dq}). На выходе формируется сигнал V_f , который управляет возбуждением синхронного генератора. Блок «Газодизель» (см. рис. 5) описывается моделью, представленной на рис. 3.

Генератор в схеме (см. рис. 4) представлен моделью синхронной машины с демпферной обмоткой. Параметры машины задаются в системе относительных единиц. Для извлечения переменных машины из выходного вектора измеряемых переменных служит блок «Machines Measurement Demux».

Модель электростанции управляется микропроцессорной системой. На жидкокристаллическом алфавитно-цифровом индикаторе отображаются значения тока статора, оборотов газодизеля и мощности нагрузки.

Структура пакетов данных, принимаемых из «Matlab», значительно облегчает процедуру «распознавания», поскольку для этих целей можно воспользоваться библиотечной функцией `scanf`.

Как видно, пакет «Matlab/Simulink» позволяет создавать различные схемы, позволяющие моделировать практические любые процессы, происходящие при работе оборудования, что дает возможность отладить работу систем управления еще до внедрения их на практике. Перечень практических задач, которые можно решать на созданном программном комплексе, достаточно широк. В частности, имеется возможность моделирования параллельной работы нескольких генераторов, процесса синхронизации генераторов, распределения активной/реактивной мощности, аварийных ситуаций (короткого замыкания, обрыва фаз).

Некоторые результаты исследования переходного процесса активной мощности АЭЭС и частоты тока (в о. е. — относительных единицах) на выходе ГДГА при сбросе/набросе нагрузки на разработанных моделях микропроцессорной системы

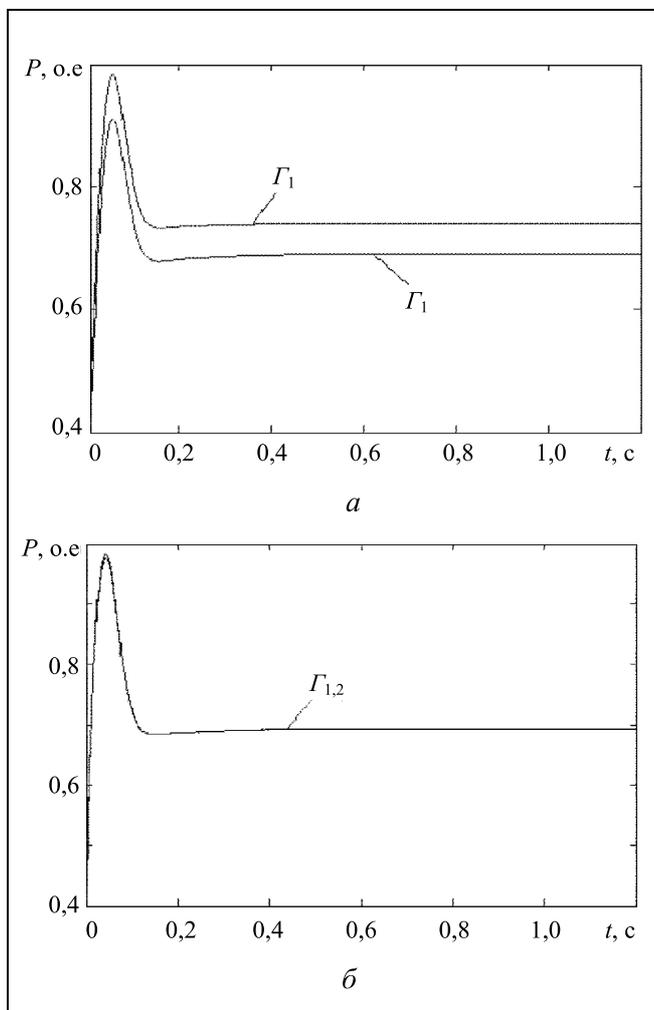


Рис. 6. Результаты моделирования распределения мощности ГДГА при набросе нагрузки: *a* — без коррекции, *б* — с коррекцией

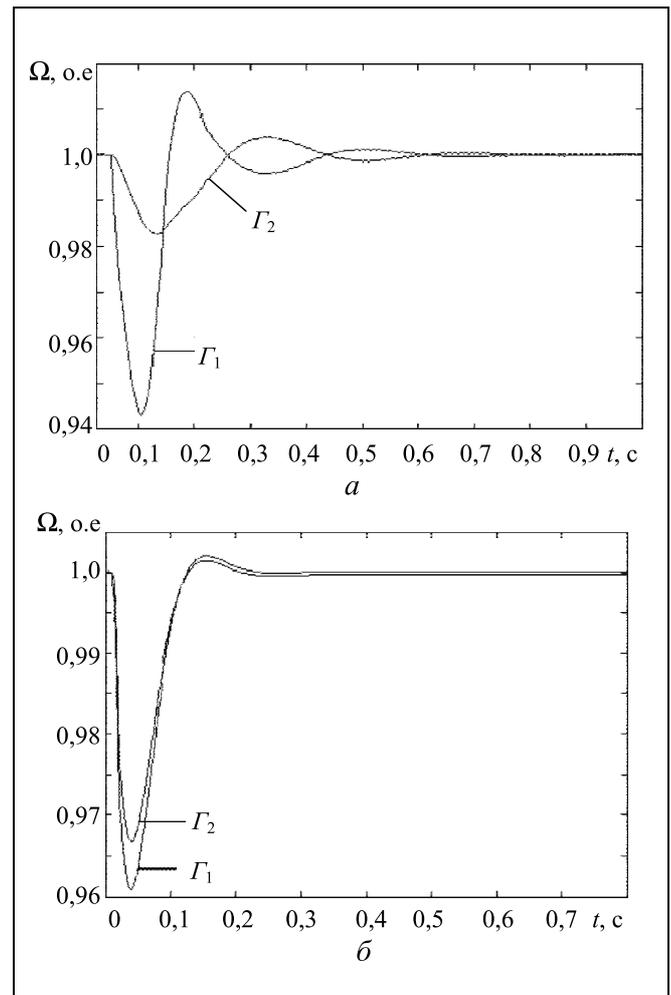


Рис. 7. Результаты моделирования при возмущающем воздействии по нагрузке ГДГА: *a* — с коррекцией только по угловому положению роторов; *б* — с коррекцией по моменту на валу и по угловому положению роторов

управления и АЭЭС с ГДГА приведены на рис. 6 и 7. На рис. 6, *a* показан переходный процесс активной мощности АЭЭС без коррекции со стороны модели микроконтроллерной системы управления, а на рис. 6, *б* — с коррекцией. Как видно, микроконтроллерная система позволяет качественно улучшить точность распределения активной мощности между параллельно работающими генераторными агрегатами G_1 и G_2 .

На рис. 7 приведены графики изменения скорости двух газодизелей, при наличии обратных связей по контролю углового положения роторов генераторов и моментов. Кривые, показанные на рис. 7, *a* получены при отсутствии контроля углового положения роторов, а показанные на рис. 7, *б* — при отсутствии обратных связей по моментам ГДГА.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработанные модели позволяют решать широкую гамму задач, касающихся как управления в автономной электроэнергетике, так и обеспечения необходимых показателей качества электроэнергии в автономных электроэнергетических системах — АЭЭС, где основными источниками электроэнергии служат работающие параллельно газодизель-генераторные агрегаты — ГДГА.

Предложенная динамическая модель ГДГА позволяет учитывать нелинейные свойства дизеля и особенности работы турбонагнетателя. Кроме того, модель позволяет перестраивать параметры регуляторов в зависимости от нагрузки на валу.

Созданная мультимодель АЭЭС позволяет объединить в себе как силовую электроэнергетику, так и микропроцессорные системы управления, что наряду с моделированием энергетических процессов позволяет моделировать и управление ими посредством цифровых систем. Такая методология позволяет создавать не только системы мониторинга, но и удаленного управления оборудованием.

Разработанная детальная модель АЭЭС с ГДГА позволяет определить наилучшие условия обеспечения параллельной работы агрегатов с распределением активной мощности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Chernyi S., Zhilenkov A. Analysis of complex structures of marine systems with attraction methods of neural systems // Metallurgical and Mining Industry. — 2015. — N 1. — P. 37–44.
2. Моцохейн Б.И. Электропривод зарубежных установок для морского бурения. Обзор зарубежной литературы. — М.: ВНИИОЭНГ, 1977. — 76 с.
3. Моцохейн Б.И. Электротехнические комплексы буровых установок. — М.: Недра, 1991. — 253 с.
4. Полонский В.И., Хайкин А.Б. Автоматизированные гребные электрические установки. — М.: Транспорт, 1976. — 432 с.
5. National Oilwell Varco [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <https://www.nov.com/ProductIndex.aspx> (дата обращения 31.05.2016).
6. Черный С.Г., Жиленков А.А. Оценка надежности функционирования морских буровых платформ // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2015. — № 1. — С. 30–36.
7. Черный С.Г. Применение технологии экспертного оценивания в задачах развития сценариев на примере транспортно-энергетической отрасли // Вестник Государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. — 2014. — № 4 (26). — С. 139–150.
8. Моцохейн Б.И., Парфенов Б.М., Шпилевой В.М. Электропривод, электрооборудование и электроснабжение буровых установок. — Тюмень, 1999. — 263 с.
9. Пути повышения экономической эффективности операций на старых нефтяных месторождениях / М. Рейнике и др. // Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. — 1989. — № 7.
10. Жиленков А.А., Черный С.Г. Повышение эффективности систем автоматического управления автономными буровыми установками за счет разработки методов обеспечения их совместимости и интеграции // Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. — 2015. — № 4. — С. 9–18.
11. Микаэлян Э.А., Микаэлян Р.Э., Дорохин В.П. Перспектива применения газотурбинных агрегатов в нефтегазовой промышленности // Нефтяное хозяйство. — 1998. — № 6. — С. 49–52.
12. Zhilenkov A., Chernyi S. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology // Energy Procedia. — 2015. — Vol. 100. — P. 1247–1252.
13. Can You Afford the Risk? The Case for Collaboration on Risk Mitigation for High-Specification Offshore Assets. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.osp.ru/os/2010/08/13005222/> (дата обращения 31.05.2016).
14. Черный С.Г. Анализ надежности энергетических систем морских буровых платформ в акватории черного моря // Нефтяное хозяйство. — 2016. — № 2. — С. 106–110.
15. Chernyi S., Dorovskoy V. Methodological foundation of effective deep-water mining in the Crimea // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. — 2014. — № 3. — С. 114–118.
16. CNW Research. Data showing the increasing consumer consideration of diesel and hybrid vehicles provided by CNW Research. — [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.cnwmarketingresearch.com/> (дата обращения 31.05.2016).
17. Greene D.L. How Consumers Value Fuel Economy: A Literature Review Assessment and Standards Division. / Office of Transportation and Air Quality, United States Environmental Protection Agency, Washington, D.C. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.epa.gov/oms/climate/regulations/420r10008.pdf> (дата обращения 31.05.2016).

Статья представлена к публикации членом редколлегии С.А. Красновой.

Ныркв Анатолий Павлович — д-р техн. наук, зав. кафедрой, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, ✉ arnpukow@mail.ru,

Жиленков Антон Александрович — канд. техн. наук, доцент, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, ✉ zhilenkovanton@gmail.com,

Черный Сергей Григорьевич — канд. техн. наук, зав. кафедрой, Керченский государственный морской технологический университет; доцент, Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова, г. Санкт-Петербург, ✉ sergiiblack@gmail.com.