

# Технические средства АСУТП

**Н.Н. Дураев**

E-mail: [kkol@mail.ru](mailto:kkol@mail.ru)

(Министерство жилищно-коммунального хозяйства и энергетики Республики Саха (Якутия))

**С.Г. Обухов**

канд. техн. наук, доцент

E-mail: [serob99@mail.ru](mailto:serob99@mail.ru)

**И.А. Плотников**

канд. техн. наук, доцент

(ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»)

г. Томск, Российская Федерация

## Лабораторный стенд для исследования режимов дизель-генераторной установки с переменной скоростью вращения

В статье представлены результаты работы по созданию автоматизированного лабораторного стенда для исследования режимов работы дизель-генераторной установки. В целях экономии топлива двигатель работает на переменной скорости вращения в зависимости от нагрузки. Приведена структура стенда, дано его описание и основные технические характеристики.

Лабораторный стенд обеспечивает возможность моделирования статических и динамических режимов работы дизель-генераторной установки с регистрацией всех основных параметров рабочего режима.

**Ключевые слова:** дизельная электростанция; дизель-генераторная установка; переменная частота вращения; информационная управляющая система.

**N.N. Duraev**

E-mail: [kkol@mail.ru](mailto:kkol@mail.ru)

(Ministry of Housing and Public Utilities and Energy of the Republic of Sakha (Yakutia))

**S.G. Obukhov**

Cand. of Techn. Sciences, Associate Professor

E-mail: [serob99@mail.ru](mailto:serob99@mail.ru)

**I.A. Plotnikov**

Cand. of Techn. Sciences, Associate Professor

(National Research Tomsk Polytechnic University)

Tomsk, Russian Federation

## Laboratory Stand for Research Mode Diesel-Generator Set for Variable Speed

The article presents the results of work on creation of the automated laboratory stand for research modes of diesel generator set. In order to save fuel engine operates at variable speed depending on the load. The structure of the stand is show, its description and main characteristics are given.

Laboratory stand provides possibility modeling of static and dynamic modes of diesel generator set with the registration of all the main parameters of the operating mode.

**Keywords:** Diesel-Generator Set; Diesel Engine; Adjustable-peed drive, information management system.

Изолированные энергетические системы играют важную роль в энергетике России, как по площади обслуживаемых территорий, так и по числу подключенных потребителей. Повышение эффективности изолированных энергетических систем является актуальной задачей развития энергетики России, без успешного

решения которой невозможно социально-экономическое развитие многих регионов РФ.

Основным источником питания изолированных энергетических систем в настоящее время служат дизельные электростанции (ДЭС), важнейшим показателем эффективности которых является удельный

расход топлива на выработку 1 кВт·ч электрической энергии. С учетом того, что основную долю затрат (до 80 %) в себестоимости вырабатываемой ДЭС электроэнергии составляют затраты на топливо, именно этот показатель является определяющим.

Значительно повысить энергетическую эффективность ДЭС можно путем изменения режима работы дизельного двигателя с постоянной частоты вращения на переменную и применения для управления станцией специализированных регуляторов [1]. Структурная схема такой дизель-генераторной установки (ДГУ) показана на рисунке 1.

При переводе ДГУ на переменную частоту вращения для обеспечения заданных параметров выходного напряжения требуется введение в систему силовых полупроводниковых преобразователей энергии переменного тока в энергию постоянного тока, и наоборот, что значительно усложняет систему. Несмотря на указанную трудность, во многих научных лабораториях мира проводятся исследования, посвященные разработке ДГУ выпрямительно-инверторного типа, что свидетельствует об их большой перспективе [2...8]. Наличие вставки постоянного тока позволяет достаточно просто вводить в состав системы накопители энергии, обеспечивающие выравнивание графиков генерации и потребления энергии, а также установки возобновляемой энергетики. Это позволяет создавать на базе ДЭС выпрямительно-инверторного типа эффективные энергетические комплексы автономного электроснабжения. Следует отметить, что применению низковольтных сетей постоянного тока в последнее время также уделяется большое внимание [9].

Как видно из рисунка 1, для обеспечения функционирования ДГУ на переменной частоте вращения двигателя, система должна иметь несколько контуров управления. Регулятор скорости по измеренным значениям электрической мощности нагрузки, воздействуя на рабочий орган насоса высокого

давления, устанавливает оптимальную частоту вращения вала дизельного двигателя, исходя из критериев минимума расхода топлива и устойчивой работы дизеля. Регулятор тока возбуждения синхронного генератора устанавливает значение тока исходя из критерия минимизации потерь в электрической машине [10, 11]. Контроллер управления силовыми преобразователями обеспечивает необходимые алгоритмы переключения полупроводниковых вентилях для формирования параметров электрической энергии выдаваемой потребителю в соответствии с установленными стандартами. Таким образом, ДГУ при работе на переменной частоте вращения представляет собой достаточно сложную, многоканальную, нелинейную, нестационарную систему автоматического управления.

Учитывая сложность объекта изучения, большинство научных исследований подобных систем проводится с активным применением методов математического компьютерного моделирования [12, 13]. Для проверки адекватности полученных результатов и разрабатываемых технических решений во многих случаях создаются экспериментальные образцы и полунатурные модели моделируемых объектов. Именно такой подход к изучению и разработке сложных энергетических систем является в настоящее время наиболее эффективным, общепринятым и позволяет добиться хороших результатов.

Цель настоящей работы состояла в разработке и создании лабораторного стенда, обеспечивающего проведение экспериментальных исследований режимов ДГУ при работе на переменной частоте вращения. Ключевым требованием разработки являлось обеспечение высокой степени автоматизации процессов управления компонентами стенда, контроля и фиксации измеряемых параметров.

Основные задачи, решаемые при выполнении проекта, заключались в выборе, изготовлении, монтаже и запуске в эксплуатацию необходимых компонентов лабораторного стенда и требуемого измерительного оборудования. Разработка структурной и функциональной схем лабораторного стенда проводилась с учетом следующих технических требований:

- возможность моделирования статических и динамических режимов работы ДГУ с регистрацией всех основных параметров рабочего режима;
- применение модульного принципа построения, позволяющего производить простое

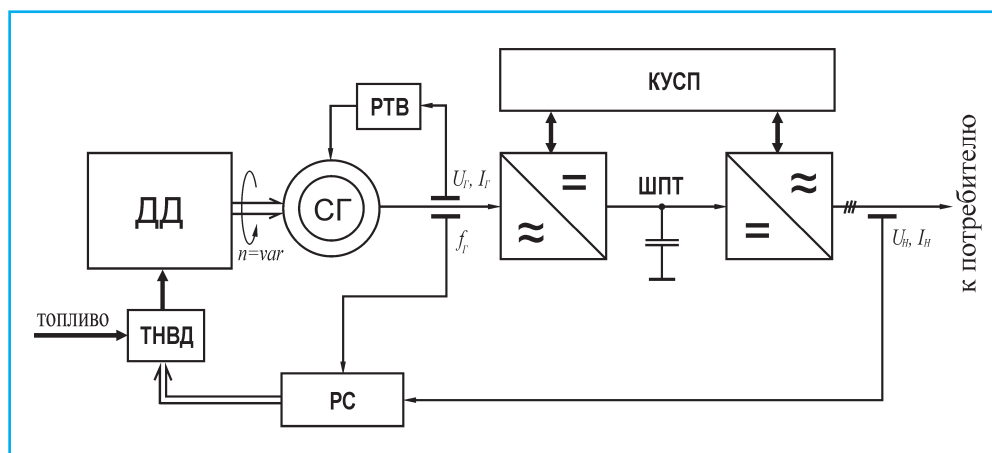


Рис. 1. Структурная схема ДГУ с переменной частотой вращения вала: ДД – дизельный двигатель; КУСП – контроллер управления силовыми преобразователями; РС – регулятор скорости; РТВ – регулятор тока возбуждения; СГ – синхронный генератор; ТНВД – топливный насос высокого давления; ШПТ – шина постоянного тока

подключение/отключение отдельных компонент в состав энергоустановки;

- соблюдение всех необходимых норм пожарной, экологической и электробезопасности;
- удобство в эксплуатации и обслуживании;
- возможной дальнейшей модернизации стенда.

Лабораторный стенд предназначен для следующих работ:

- экспериментального определения рабочих характеристик ДГУ при работе на переменной частоте вращения;
- проверки и отработки алгоритмов управления режимами работы автономной электростанции;
- проверки схемных решений по сопряжению нескольких генерирующих источников, работающих на одну нагрузку – автономный объект электроснабжения;

- исследования динамических параметров и режимов автономной электростанции;
- проведения учебных лабораторных работ с элементами научных исследований при подготовке магистров техники и технологии по программе «Возобновляемые источники энергии».

Структурная схема лабораторного стенда для исследования режимов работы ДГУ на переменной частоте вращения представлена на рисунке 2, внешний вид – на рисунке 3.

Лабораторный стенд построен на основе дизельной электростанции KDE12EA3 компании *Kipor* (КНР) [14]. Выбор данной модели электростанции обоснован тем, что ее дизельный двигатель имеет относительно небольшую мощность (12,0 кВт), что упрощает процесс монтажа в лаборатории учебного корпуса

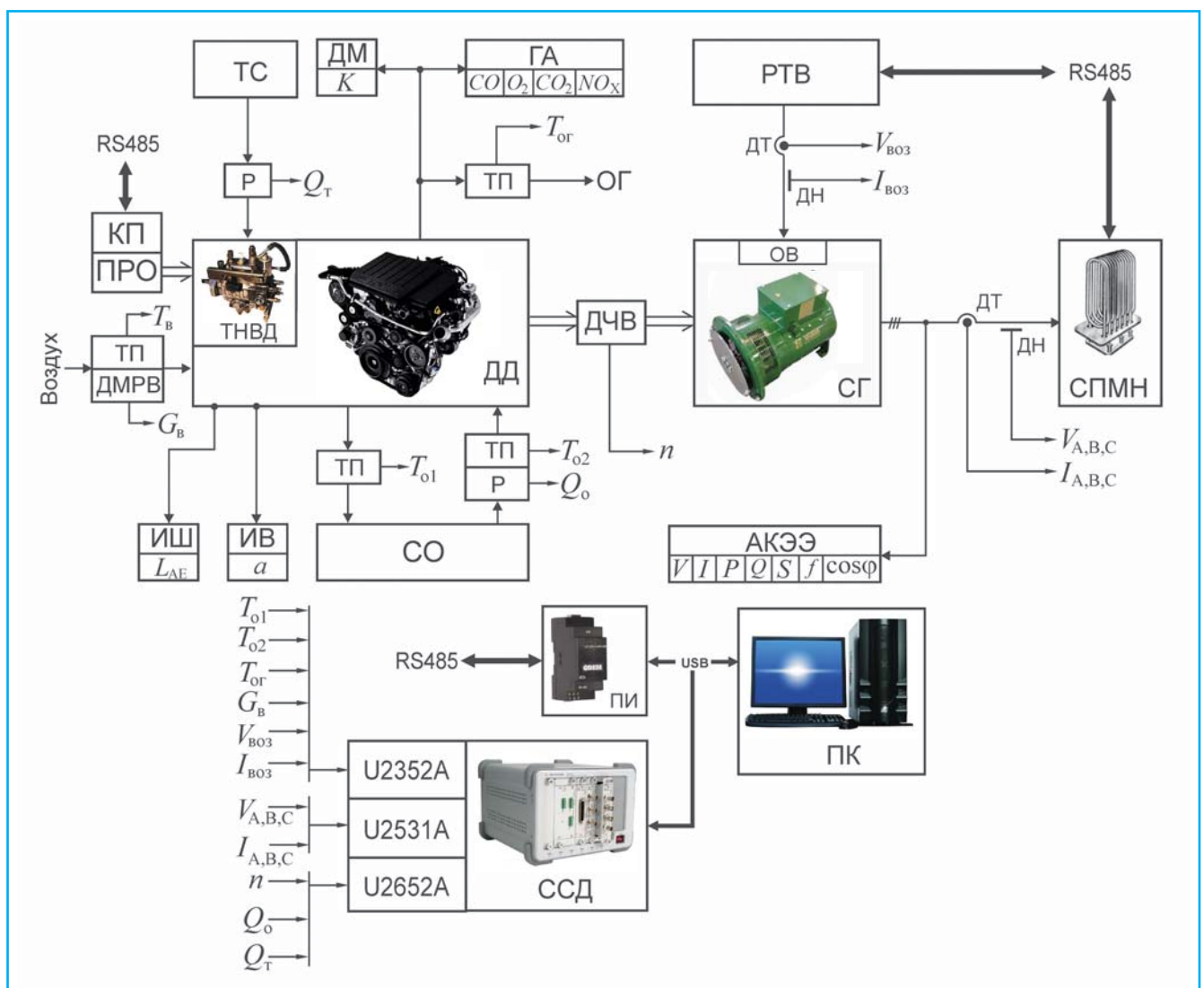


Рис. 2. Структурная схема лабораторного стенда: АКЭЭ – измеритель качества электрической энергии; ГА – газоанализатор; ДД – дизельный двигатель; ДМ – дымомер; ДМРВ – датчик массового расхода воздуха; ДЧВ – датчик частоты вращения; КП – контроллер привода; ОВ – обмотка возбуждения; ОГ – отработавшие газы; ПИ – преобразователь интерфейсов; ПК – персональный компьютер; ПРО – привод рабочего органа топливного насоса; Р – расходомер; РТВ – регулятор тока возбуждения генератора; СГ – синхронный генератор; СО – система охлаждения; СПМН – стенд полунатурного моделирования нагрузок автономного потребителя; ССД – система сбора данных; ТНВД – топливный насос высокого давления; ТП – термопара (датчик температуры); ТС – топливная система

университета, но полноценную жидкостную систему охлаждения. Электростанция Kipor KDE12EA3 состоит из дизельного четырехтактного двигателя KM2V80 и синхронного генератора KTS12 с электромагнитным возбуждением.

Для проведения экспериментальных исследований в конструкцию дизельной электростанции KDE12EA3 внесены следующие изменения:

- переделана система подачи топлива на насос высокого давления дизельного двигателя и воздухозаборная система;
- разработан привод исполнительного органа топливного насоса;
- установлена новая система возбуждения синхронного генератора;
- смонтирована система отвода отработавших газов за пределы лабораторного помещения.

Для получения информационного сигнала по расходу топлива  $Q_T$  ДГУ в топливную магистраль вмонтирован датчик объемного расходомера, в качестве которого выбран прецизионный микрорасходомер вытеснительного типа с овальными роторами ДАРКОНТ ОМ 004А (Россия). В качестве расходомера забираемого воздуха  $G_v$  используется датчик массового расхода воздуха калориметрического пленочного

типа BOSCH 028-0218 037 (Германия). Для измерения объемного расхода  $Q_o$  охлаждающей жидкости используется роторный расходомер  $G \frac{3}{4}$  Water Flow Sensor TEM01071В (КНР). Для контроля температуры воздуха во впускном коллекторе  $T_v$ , охлаждающей жидкости  $T_{o1}$ ,  $T_{o2}$  и отработавших газов  $T_o$  дизельного двигателя в зависимости от диапазона измеряемых температур применены полупроводниковые термодатчики и термопары различных типов. Для измерения частоты вращения вала дизельного двигателя используется индукционный датчик частоты вращения BOSCH 0261210113 (Германия), установленный на кожухе маховика двигателя.

Разработанная в рамках выполнения настоящего проекта система возбуждения синхронного генератора обеспечивает диапазон регулирования тока возбуждения 0...5 А, при напряжении возбуждения до 150 В. Она построена на основе последовательно соединенных устройств: неуправляемого трехфазного диодного выпрямителя; полумостового инвертора напряжения; высокочастотного силового трансформатора; однофазного двухполупериодного неуправляемого диодного выпрямителя. Регулирование выходного напряжения ДГУ посредством изменения тока возбудителя осуществляется с помощью специализированной схемы

управления, обеспечивающей режимы коммутации ключей инвертора. Для задания параметров возбуждения в состав схемы управления входит микроконтроллер и приемопередатчик интерфейса RS-485 для связи с персональным компьютером.

Для измерения мгновенных значений электрических параметров: токов и напряжений в стенде установлены соответствующие датчики. Датчики тока построены на базе датчика CSNB-131 компании Honeywell (США). Данный датчик использует компенсационный метод измерения тока, что обеспечивает высокую точность измерения, а также гальваническую развязку силовых и измерительных цепей. Датчик напряжения представляет собой резистивный делитель. Для обеспечения гальванической развязки

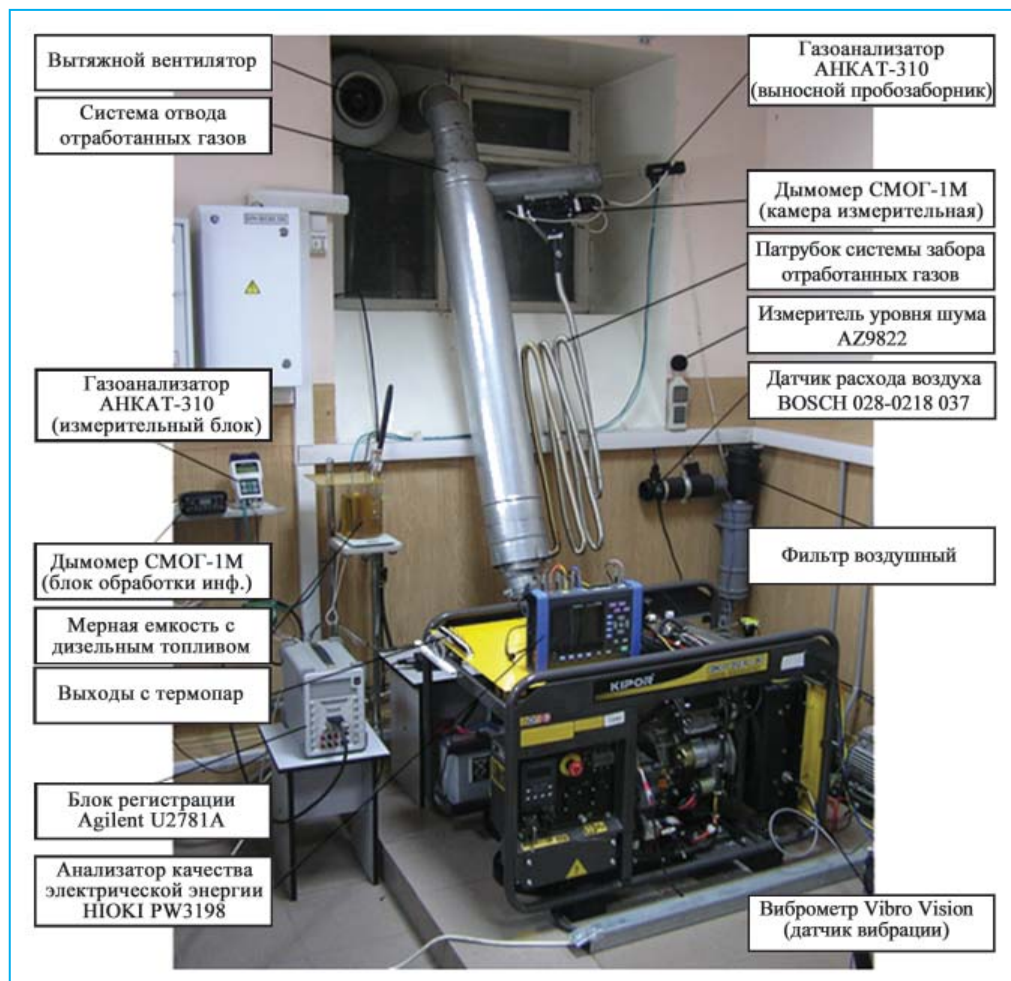


Рис. 3. Внешний вид лабораторного стенда

высоковольтной силовой цепи и для уменьшения влияния на измерительную цепь внешней нагрузки, подключаемой к измерительному каналу, используется изолирующий усилитель. Он построен на основе полупроводникового модуля (микросборки) типа AD210BN компании Analog Devices (США). Микросборка представляет собой усилитель постоянного тока, построенный по типу «модулятор – демодулятор» и трансформаторной развязкой между ними.

Для управления частотой вращения дизельного двигателя разработан электромеханический привод рабочего органа топливного насоса и контроллер управления приводом, обеспечивающие регулирование цикловой подачи топлива. Их структурная схема приведена на рисунке 4.

Привод рабочего органа предназначен для механического поступательного перемещения топливной рейки насоса высокого давления. Поступательный тип движения выбран потому, что он наиболее часто встречается в практике применения ДГУ различных типоразмеров. Учитывая невысокие требования к быстродействию системы, в качестве исполнительного электродвигателя выбран униполярный двухфазный шаговый двигатель типа FL42STH47-0406A (КНР). Это позволило реализовать достаточно простую цифровую систему позиционирования разомкнутого типа с минимумом необходимых элементов и высокой степенью надежности. В качестве механизма, преобразующего вращательное движение в поступательное, использована винтовая передача, что позволило значительно упростить механическую часть привода и обеспечить высокую точность позиционирования. Шаговый электродвигатель приводит во вращение ходовой винт передачи (ВП), которая в свою очередь перемещает шток, связанный с топливной рейкой насоса через наконечник. Конечное положение штока определяется количеством импульсов управления поданных на шаговый двигатель. Для контроля положения штока установлен потенциметрический датчик перемещения (ДП). Датчик не используется, как полноценный датчик

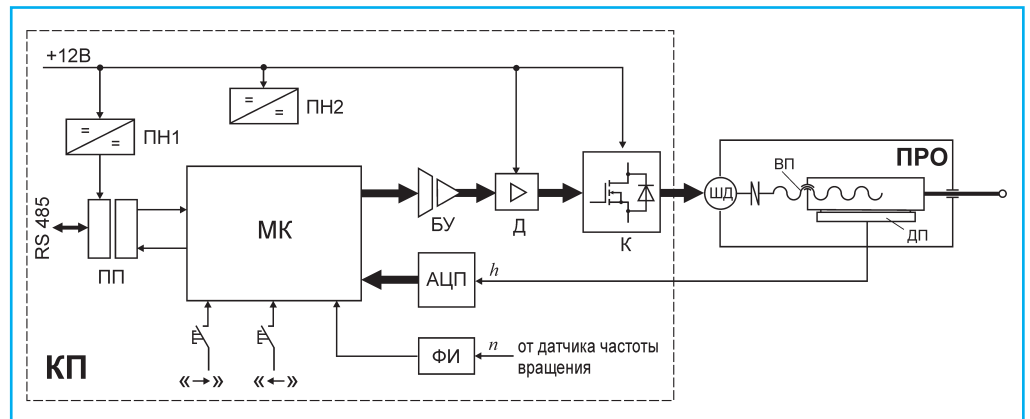


Рис. 4. Структурная схема контроллера привода (КП) совместно с приводом рабочего органа (ПРО) топливного насоса: ПН – преобразователь напряжения; ПП – приемопередатчик интерфейса RS-485; МК – микроконтроллер; БУ – буферные усилители; Д – драйвер; К – силовые ключи; АЦП – аналого-цифровой преобразователь; ФИ – формирователь импульсов; ШД – шаговый двигатель; ВП – винтовая передача; ДП – датчик перемещения

обратной связи системы позиционирования, а служит главным образом для определения положения штока в момент включения ДГУ и для предотвращения аварийного режима работы привода. Диапазон возможных перемещений штока привода 0...35 мм, точность позиционирования, не хуже, 0,1 мм. Внешний вид привода рабочего органа показан на рисунке 5.

Контроллер привода (КП) предназначен для выработки управляющих воздействий на привод рабочего органа (ПРО) топливного насоса двигателя. В качестве микроконтроллера (МК) здесь используется 8-ми разрядный микроконтроллер ATmega32-16 семейства AVR компании Atmel, предназначенный для использования во встраиваемых приложениях. Применение микроконтроллера позволило упростить схемотехнику данного устройства, а также легко менять алгоритмы его работы.

*Основные функции микроконтроллера:*

- организация интерфейса обмена данными типа RS-485 с внешним устройством;
- сбор информации о положении рабочего органа топливного насоса, частоте вращения вала двигателя и электрических параметрах нагрузки ДГУ;
- формирование кусочно-линейного закона управления частотой вращения вала дизельного двигателя;
- формирование алгоритмов коммутации фаз шагового двигателя.

Контроллер может работать как в ручном режиме управления, посредством нажатия и удержания кнопок «=>» и «<=<», а также в автономном режиме. Для обмена информацией с центральным управляющим персональным компьютером используется интерфейс RS-485 с гальванической развязкой устройств.

Стенд полунатурного моделирования нагрузки (СПНМ) автономного объекта электроснабжения позволяет воспроизводить трехфазные симметричные и несимметричные нагрузки объекта в диапазоне 0...15 кВт с дискретностью 0,25 кВт, как в ручном режиме управления, так и обеспечивать изменение



Рис. 5. Внешний вид привода рабочего органа топливного насоса

нагрузки по заданному закону. Его описание приведено в работе [15]. Для исследования динамических свойств ДГУ в переходных режимах работы в качестве дополнительной нагрузки использовались два асинхронных двигателя с короткозамкнутым ротором АД71В4У3 и АИР90Л4У3 мощностью 1,5 и 2,2 кВт, соответственно.

Для контроля основных эксплуатационных показателей ДГУ в рабочих режимах лабораторный стенд оснащен необходимым метрологическим оборудованием. Для измерения выходных электрических параметров ДГУ используется анализатор качества электрической энергии НЮКИ РW3198 (Япония), обеспечивающий измерение мгновенных и действующих значений тока, напряжения, мощности, гармонического состава и т. д. Для измерения параметров отработавших газов используются газоанализатор АНКAT-310 (Россия) и микропроцессорный дымомер СМОГ-1М (Россия), позволяющие проводить измерения в соответствии с принятыми государственными стандартами. Для их подключения был разработан специальный пробозаборник, который встроен в систему отвода отработавших газов. Для контроля эргономических параметров ДГУ в состав стенда входят шумомер AZ8922 (Taiwan), обеспечивающий измерение уровня шума, и виброметр VibroVision (Россия), который используется для измерения вибрации.

Важное место в составе лабораторного стенда занимает информационно-измерительная система, включающая в себя систему сбора данных (ССД) и персональный компьютер (ПК) с необходимым программным обеспечением. Система сбора данных построена на основе модульных приборов с интерфейсом USB компании Agilent Technology (США) и включает в себя следующие компоненты:

- U2781A – станцию для установки USB-модулей;
- U2351A – восьмиканальную систему сбора и оцифровки аналоговых сигналов, на которую подаются медленно меняющиеся во времени сигналы, идущие от датчиков стенда (рис. 2);
- U2531A – четырехканальную быстродействующую систему сбора и оцифровки аналоговых сигналов с одновременной дискретизацией по всем каналам, на которую подаются сигналы, пропорциональные мгновенным значениям фазных токов и напряжений;
- U2651A – систему сбора цифровых данных,

на которую подаются импульсные сигналы от датчика частоты вращения и расходомеров топлива и охлаждающей жидкости.

Для управления лабораторным стендом, а также для регистрации, обработки и отображения получаемых экспериментальных данных, посредством среды LabView 2010 компании *National Instruments* (США), была разработана управляющая программа. Она имеет удобный пользовательский интерфейс и может быть использована в качестве основы при создании автоматизированной системы управления автономной ДЭС.

Таким образом, лабораторный стенд позволяет регистрировать следующие параметры рабочего режима ДГУ:

1. Параметры генерируемой электроэнергии: действующие и мгновенные значения фазных токов  $I_{A,B,C}$  и напряжений  $V_{A,B,C}$  синхронного генератора; действующие и мгновенные значения фазных и полных активной  $P$ , реактивной  $Q$ , полной  $S$  мощности и коэффициента мощности  $\cos\phi$  гармонический состав выходного напряжения синхронного генератора.
2. Параметры возбуждения синхронного генератора: напряжение  $V_b$  и ток  $I_b$ .
3. Частоту вращения вала дизеля  $n$ , об/мин.
4. Температуры воздуха во впускном коллекторе  $T_b$ , охлаждающей жидкости на входе и выходе системы охлаждения  $T_{o1}$ ,  $T_{o2}$  и отработавших газов  $T_{o3}$  дизельного двигателя.
5. Расходы воздуха  $G_b$  (кг/ч), топлива  $Q_r$  (м<sup>3</sup>) и охлаждающей жидкости  $Q_o$  (м<sup>3</sup>).
6. Параметры отработавших газов: объемная доля окиси углерода  $j_{CO}$ , млн<sup>-1</sup>; концентрация кислорода  $C_{O_2}$ , %; концентрация оксида углерода  $C_{CO_2}$ , %;

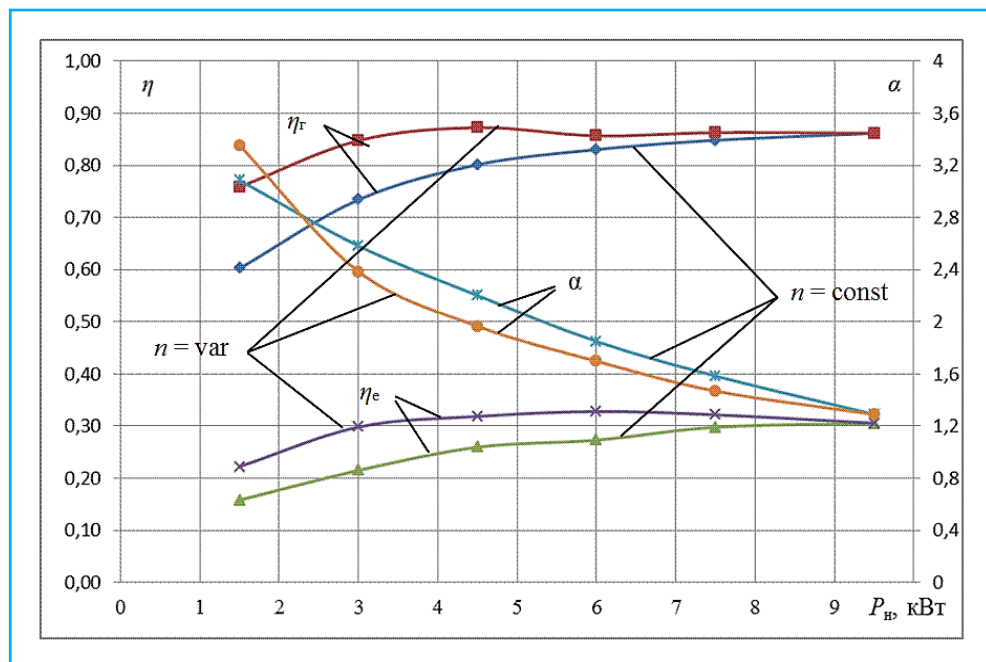


Рис. 6. Сравнительные энергетические характеристики ДГУ с постоянной и переменной частотой вращения

объемная доля окислов азота  $j_{NO_x}$ , млн<sup>-1</sup>; натуральный показатель ослабления светового потока  $K$ , м<sup>-1</sup>.

7. Эргономические показатели дизель-генератора: уровень шума  $L_{AE}$ , дБ; виброускорение  $a$ , м/с<sup>2</sup>.

Разработанный лабораторный стенд позволил провести весь необходимый объем экспериментальных исследований по доказательству эффективности перевода рабочего режима ДГУ с постоянной частоты вращения на переменную и определении областей регулирования рабочими режимами энергетической установки. В качестве примера на рисунке 6 представлены сравнительные энергетические характеристики ДГУ, работающей на постоянной частоте вращения ( $n = \text{const}$ ), и переменной частоте ( $n = \text{var}$ ), оптимизированной по критерию минимума удельного расхода топлива, полученные в результате проведенных экспериментов.

В настоящее время стенд для исследования режимов работы ДГУ изготовлен, успешно выдержал эксплуатационные испытания и используется в лаборатории «Возобновляемых источников энергии» Национального исследовательского Томского политехнического университета при проведении научных исследований. В данный момент ведется разработка силового выпрямительно-инверторного каскада, который в дальнейшем будет включен в состав лабораторного стенда. Проведенные эксперименты с использованием описанного лабораторного стенда показали, что перевод ДГУ на переменную частоту вращения обеспечивает увеличение КПД преобразования энергии в электрическом генераторе  $\eta_e$  [12, 13] и эффективный КПД дизельного двигателя  $\eta_{дв}$ , а также снижается коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , что способствует созданию лучших условий для сгорания топлива. Экономия топлива может достигать 25...35 % в зависимости от графика нагрузки потребителя.

**Работы проводились в рамках реализации федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2013 годы» по направлению «Проведение проблемно-ориентированных поисковых исследований в области создания эффективных накопителей электрической энергии для нужд централизованной и автономной энергетики» при финансовой поддержке ОАО «Сахаэнерго».**

#### Список литературы

1. Обухов С.Г., Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Шутов Е.А., Парников Н.М. Формирование энергоэффективных режимов дизельной электростанции инверторного типа // *Известия вузов. Электромеханика*. 2009, № 6. С. 80–82.
2. Leuchter J., Bauer P. Efficiency Investigation of Electrical Generator-Converter Set // *IEEE Transaction on Industry Applications*. 2007, vol. 127, no. 10, pp. 1064–1069.
3. Leuchter J., Rerucha V., Krupka Z., Bauer P. Dynamic Behavior of Mobile Generator Set with Variable Speed and Diesel Engine // *The 38th Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC 2007)*. Orlando: PESC Press. 2007, pp. 2287 – 2293.

*Specialist Conference (PESC 2007)*. Orlando: PESC Press. 2007, pp. 2287 – 2293.

4. Tolbert L.M., Peterson W.A., White C.P., Theiss T.J., Scudiere M.B. A Bi-Directional DC-DC Converter with Minimum Energy Storage Elements // *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*. Pittsburgh, 13–17 October. 2002. URL: [http://power.eecs.utk.edu/pubs/ias2002\\_bidi.pdf](http://power.eecs.utk.edu/pubs/ias2002_bidi.pdf).
5. Lee J.-H., Lee S.-H., Sul S.-K. Variable-Speed Engine Generator With Supercapacitor: Isolated Power Generation System and Fuel Efficiency // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2009, vol. 45, no. 6, pp. 2130–2135.
6. Leuchter J., Rerucha V., Krupka Z., Bauer P. Dynamic Behavior of Mobile Generator Set with Variable Speed and Diesel Engine // *The 38th Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC 2007)*. Orlando: PESC Press. 2007, pp. 2287 – 2293.
7. Koczara W. Variable-Adjustable Speed Electricity Generation as Emerging Technology of Power Systems and Application to RES // *Ecologic Vehicles and Renewable Energies International Conference (EVER)*. Monaco, 26–29 March. 2009. URL: <http://cmrt.centrale-marseille.fr/cpi/ever09/documents/papers/ps/EVER09-paper-plenary1.pdf>
8. Дарьенков А.Б., Хватов О.С. Система управления автономным дизель-генератором переменной частоты вращения // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2013, № 5(102). С. 303–308.
9. Wu T.F. Guest Editorial Special Issue on Power Electronics in DC Distribution Systems // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2013, vol. 28, no. 4, pp. 1507–1508.
10. Обухов С.Г., Сипайлова Н.Ю., Плотников И.А., Сипайлов А.Г. Математическая модель синхронного генератора инверторной дизельной электростанции // *Известия вузов. Проблемы энергетики*. 2012, № 9–10. С. 112–120.
11. Обухов С.Г., Сипайлова Н.Ю., Плотников И.А., Сипайлов А.Г. Характеристики синхронного генератора, работающего в составе инверторной дизельной электростанции // *Известия вузов. Электромеханика*. 2012, № 5. С. 41–45.
12. Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Тарпанов И.А., Пшеничников В.В. Имитационная модель дизель-генераторной электростанции переменной скорости вращения с интеллектуальной системой управления топливоподачей // *Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева*. 2011. № 1(86). С. 185–192.
13. Дураев Н.Н., Обухов С.Г., Плотников И.А. Имитационная модель дизельного двигателя для исследования его рабочих характеристик на переменной частоте вращения // *Известия ТПУ*. 2013. Т. 322. № 4. С. 48–52.
14. Сайт компании Кіпор. *Электронный ресурс*: <http://www.kipor.com>.
15. Обухов С.Г., Плотников И.А., Маров Д.Ю. Физическая модель электрических нагрузок автономных энергетических систем // *Промышленные АСУ и контроллеры*. 2011. № 11. С. 37–40.

#### References

1. Obukhov S.G., Lukutin B.V., Klimova G.N., Shutov Ye.A., Parnikov N.M. Formirovanie energoeffektivnykh rezhimov dizelnoy elektrostantsii invertornogo tipa [Formation of energy-efficient modes of diesel power inverter]. *Izvestiya*

- vuzov. *Elektromekhanika* [Proceedings of the universities. Electromechanics]. 2009, no. 6, pp. 80–82.
2. Leuchter J., Bauer P. Efficiency Investigation of Electrical Generator-Converter Set // *IEEE Transaction on Industry Applications*. 2007, vol. 127, no. 10, pp. 1064–1069.
  3. Leuchter J., Rerucha V., Krupka Z., Bauer P. Dynamic Behavior of Mobile Generator Set with Variable Speed and Diesel Engine // *The 38th Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC 2007)*. Orlando: PESC Press. 2007, pp. 2287–2293.
  4. Tolbert L.M., Peterson W.A., White C.P., Theiss T.J., Scudiere M.B. A Bi-Directional DC-DC Converter with Minimum Energy Storage Elements // *IEEE Industry Applications Society Annual Meeting. Pittsburgh, 13–17 October*. 2002. URL: [http://power.eecs.utk.edu/pubs/ias2002\\_bidi.pdf](http://power.eecs.utk.edu/pubs/ias2002_bidi.pdf).
  5. Lee J.-H., Lee S.-H., Sul S.-K. Variable-Speed Engine Generator With Supercapacitor: Isolated Power Generation System and Fuel Efficiency // *IEEE Transactions on Industry Applications*. 2009, vol. 45, no. 6, pp. 2130–2135.
  6. Leuchter J., Rerucha V., Krupka Z., Bauer P. Dynamic Behavior of Mobile Generator Set with Variable Speed and Diesel Engine // *The 38th Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC 2007)*. Orlando: PESC Press. 2007, pp. 2287–2293.
  7. Koczara W. Variable-Adjustable Speed Electricity Generation as Emerging Technology of Power Systems and Application to RES // *Ecologic Vehicles and Renewable Energies International Conference (EVER)*. Monaco, 26–29 March. 2009. URL: <http://cmrt.centrale-marseille.fr/cpi/ever09/documents/papers/ps/EVER09-paper-plenary1.pdf>
  8. Darenkov A.B., Khvatov O.S. Sistema upravleniya avtonomnym dizel-generatorom peremennoy chastity vrashcheniya [Autonomous control system of variable speed diesel generator]. *Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after RE Alekseeva]. 2013, no. 5(102), pp. 303–308.
  9. Wu T.F. Guest Editorial Special Issue on Power Electronics in DC Distribution Systems // *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2013, vol. 28, no. 4, pp. 1507–1508.
  10. Obukhov S.G., Sipaylova N.Yu., Plotnikov I.A., Sipaylov A.G. Matematicheskaya model sinkhronnogo generatora invertornoy dizelnoy elektrostantsii [The mathematical model of synchronous generator for diesel power inverter]. *Izvestiya vuzov. Problemy energetiki* [Proceedings of the universities. Energy problems]. 2012, no. 9–10, pp. 112–120.
  11. Obukhov S.G., Sipaylova N.Yu., Plotnikov I.A., Sipaylov A.G. Kharakteristiki sinkhronnogo generatora, rabotayushchego v sostave invertornoy dizelnoy elektrostantsii [Characteristics of the synchronous generator operating in the composition of diesel power inverter]. *Izvestiya vuzov. Elektromekhanika* [Proceedings of the universities. Electromechanics]. 2012, no. 5, pp. 41–45.
  12. Khvatov O.S., Darenkov A.B., Tarpanov I.A., Pshenichnikov V.V. Imitatsionnaya model dizel-generatornoy elektrostantsii peremennoy skorosti vrashcheniya s intellektualnoy sistemoy upravleniya toplivopodachey [Simulation model of a diesel generator power variable speed motor with intelligent throttle control]. *Trudy NGTU im. R.Ye. Alekseeva* [Proceedings of the Nizhny Novgorod State Technical University named after RE Alekseeva]. 2011, no. 1(86), pp. 185–192.
  13. Duraev N.N., Obukhov S.G., Plotnikov I.A. Imitatsionnaya model dizelnogo dvigatelya dlya issledovaniya ego rabochikh kharakteristik na peremennoy chastote vrashcheniya [Simulation model of the diesel engine to explore its performance on variable speed]. *Izvestiya TPU* [Proceedings of the Tomsk Polytechnic University]. 2013, vol. 322, no. 4, pp. 48–52.
  14. Available at: <http://www.kipor.com>
  15. Obukhov S.G., Plotnikov I.A., Marov D.Yu. Fizicheskaya model elektricheskikh nagruzok avtonomnykh energeticheskikh sistem [Physical model of electrical loads autonomous energy systems]. *Promyshlennyye ASU i kontrolyery* [Industrial process control and controllers]. 2011, no. 11, pp. 37–40.

Информация об авторах

**Дураев Николай Никифорович**, заместитель министра жилищно-коммунального хозяйства и энергетики Республики Саха (Якутия)  
E-mail: [kkol@mail.ru](mailto:kkol@mail.ru)  
Министерство жилищно-коммунального хозяйства и энергетики Республики Саха (Якутия)  
677027, г. Якутск, Российская Федерация, ул. Кирова, д. 13  
**Обухов Сергей Геннадьевич**, канд. техн. наук, доцент  
E-mail: [serob99@mail.ru](mailto:serob99@mail.ru)  
**Плотников Игорь Александрович**, канд. техн. наук, доцент  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет»  
634050, г. Томск, Российская Федерация, пр-т. Ленина, 30.

Information about the authors

**Duraev Nikolay Nikiforovich**, Deputy Minister of Housing and Public Utilities and Energy of the Republic of Sakha (Yakutia)  
E-mail: [kkol@mail.ru](mailto:kkol@mail.ru)  
Ministry of Housing and Public Utilities and Energy of the Republic of Sakha (Yakutia)  
677027, Yakutsk, Russian Federation, str. Kirov, 13  
**Obukhov Sergey Gennadevich**, Cand. of Techn. Sciences, Associate Professor  
E-mail: [serob99@mail.ru](mailto:serob99@mail.ru)  
**Plotnikov Igor Aleksandrovich**, Cand. of Techn. Sciences, Associate Professor  
Federal State Educational Institution of Higher Professional Education «National Research Tomsk Polytechnic University»  
634050, Tomsk, Russian Federation, Lenin avenue, 30.