

УДК 62-843.6

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ НА ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ

**Обухов Сергей Геннадьевич,**

д-р техн. наук, доцент каф. электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: serob99@mail.ru

**Плотников Игорь Александрович,**

канд. техн. наук, доцент каф. электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института Национального исследовательского Томского политехнического университета, Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30. E-mail: igorplt@tpu.ru

Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения эффективности работы дизель-генераторных установок в составе автономных систем электроснабжения с целью снижения себестоимости электроэнергии.

**Цель работы:** экспериментальное доказательство эффективности перевода рабочего режима дизель-генераторной установки с постоянной частоты вращения на переменную и определение областей регулирования рабочими режимами установки.

**Методы исследования:** экспериментальные исследования дизель-генераторной установки на переменной частоте вращения двигателя на базе специально созданного лабораторного стенда.

**Результаты.** Показано, что перевод рабочих режимов дизель-генераторной установки на переменную частоту вращения, оптимизированную по удельному расходу топлива, обеспечивает следующие преимущества: уменьшение механических потерь и повышение коэффициента полезного действия дизельного двигателя и генератора на всех долевых нагрузочных режимах, кроме номинального; снижение удельного расхода топлива; улучшение экологических показателей; улучшение эргономических показателей путем снижения уровня шума и уменьшения вибрации. Теория подобия двигателей внутреннего сгорания и электрических машин, а также аналогичные результаты по удельному расходу топлива, полученные другими исследователями, позволяют распространить полученные выводы и на другие дизель-генераторные установки, того же диапазона мощностей до 60 кВт, с двигателями без наддува. Получена универсальная функциональная зависимость частоты выходного напряжения генератора от величины электрической нагрузки электростанции, которая может быть использована при разработке и создании дизель-генераторных установок инверторного типа. Результаты проведенных экспериментов позволяют сформулировать основные технические требования к подсистемам управления инверторных дизель-генераторных установок, определить необходимые физические переменные, позволяющие осуществлять как контроль над состоянием объекта, так и управление им.

### **Ключевые слова:**

Автономные системы электроснабжения, дизель-генераторные установки, дизельный двигатель, переменная скорость вращения.

Основу локальной энергетики России составляют дизельные электростанции (ДЭС), основным элементом которых являются дизель-генераторные

установки (ДГУ). Как источники электроэнергии автономных систем электроснабжения они обладают очевидными достоинствами и известными недостатками, главные из которых – большой расход органического топлива на выработку одного кВт·ч электроэнергии и загрязнение окружающей среды. К перспективному направлению повышения эффективности локальных систем электроснабжения относится использование возобновляемых источников энергии, однако они в большинстве случаев не обеспечивают требуемой надежности электроснабжения потребителей, то есть полноценной альтернативы ДГУ на сегодняшний день нет. Поэтому в последнее время все большее распространение получают гибридные энергетические системы, построенные на базе ДГУ и установок возобновляемой энергетики [1, 2].

Все общепромышленные ДГУ работают на постоянной частоте вращения при изменении в широком диапазоне их электрической нагрузки. Данный подход проверен многолетней практикой и позволяет использовать достаточно простые и надежные системы регулирования. Однако такая страте-

гия управления ДГУ имеет ряд серьезных недостатков: значительно возрастает удельный расход топлива в режимах частичных нагрузок, снижается эксплуатационный ресурс дизелей, возрастают выбросы вредных веществ [3].

Одним из наиболее перспективных технических решений повышения эффективности автономных систем электроснабжения является перевод рабочего режима ДГУ с постоянной частоты вращения на переменную, оптимизированную по величине электрической нагрузки. Актуальность такого подхода подтверждает и тот факт, что в последнее время в зарубежной [4–10] и отечественной [11] научной периодике появилось много публикаций на эту тему. Кроме того, разработкой станций такого типа занимаются такие известные компании, как Caterpillar, Cummins, Kipor и др.

При переводе ДГУ на переменную частоту вращения параметры выходного напряжения, вырабатываемого генератором, меняются. Для обеспечения заданных параметров выходного напряжения требуется введение в систему силовых преобразователей (управляемых выпрямителей и инверторов), что, с одной стороны, усложняет и удоро-

жает систему, но, с другой – наделяет ее рядом преимуществ: значительно снижается удельный расход топлива, улучшается качество генерируемой электроэнергии, обеспечивается разгрузка генератора от протекания реактивных токов и т. д.

Наличие вставки постоянного тока позволяет создавать универсальные энергетические комплексы с источниками энергии различной физической природы (например, возобновляемыми) и широкими возможностями эффективного управления их рабочими режимами [12–14]. Кроме того, часть потребителей (например, современная осветительная сеть на основе светодиодных источников) может быть запитана непосредственно постоянным током, что обеспечит повышение эффективности всей системы электроснабжения [15]. Такой подход хорош и с технологической точки зрения, так как позволяет использовать при построении ДГУ выпрямительно-инверторного типа модульную архитектуру, с возможностью унификации основных энергетических элементов таких установок на широкий диапазон мощностей.

Выпрямительно-инверторные ДГУ представляют собой сложную техническую систему, состоя-

щую из большого числа взаимосвязанных энергетических компонентов, многие из которых имеют нелинейные и стохастические характеристики, характеризуются большим разбросом постоянных времени, что значительно усложняет процессы их исследования и проектирования [16, 17].

Распространенным методом их изучения, позволяющим получить достоверные результаты, является прямой эксперимент. Конечная цель данных исследований состоит в разработке технических и технологических решений по созданию модельного ряда ДГУ выпрямительно-инверторного типа на ряд мощностей до 60 кВт. Задачи исследований, представленных в данной статье, заключались в экспериментальном доказательстве эффективности перевода рабочего режима ДГУ с постоянной частоты вращения на переменную и определении областей регулирования рабочими режимами установки.

В качестве объекта исследований выбрана дизельная электростанция KDE12EA3 компании Kipor [18], построенная на основе дизельного четырехтактного двигателя без наддува KM2V80, мощностью 12,0 кВт, и синхронного генератора с электро-

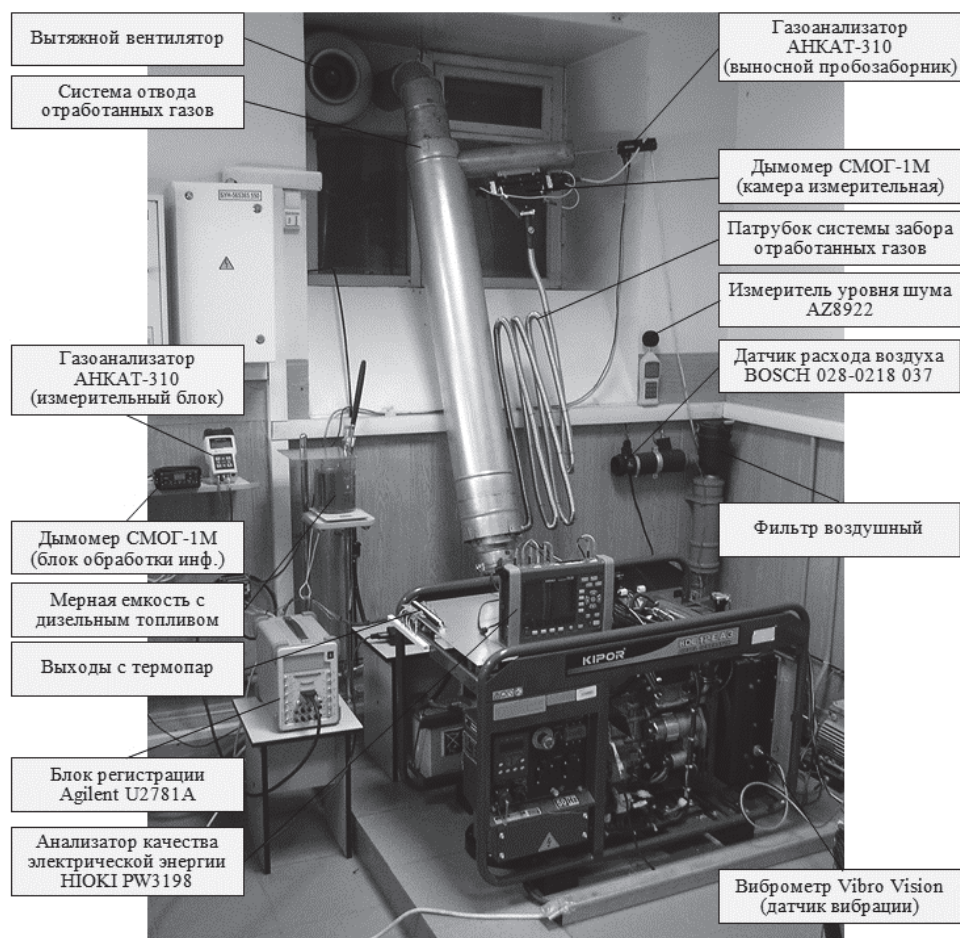


Рис. 1. Внешний вид экспериментальной установки

Fig. 1. Appearance of the experimental unit

магнитным возбуждением KTS12. ДГУ KDE12EA3 предназначена для использования в качестве основного источника электропитания напряжением 230/400 В, частотой 50 Гц. Выбор данной модели электростанции обоснован тем, что она сертифицирована в России и обладает хорошим соотношением цена/качество.

Для проведения экспериментальных исследований в конструкцию ДГУ внесены следующие изменения: переделана система подачи топлива на насос высокого давления дизеля, установлена система позиционирования положения рейки топливного насоса, обеспечена возможность питания обмотки возбуждения генератора от независимого регулируемого источника. Для полного контроля эксплуатационных режимов ДГУ в системы ее жизнеобеспечения – подача топлива, охлаждение и газообмен – установлено необходимое инструментальное оборудование: датчики температуры во впускном коллекторе, охлаждающей жидкости и отработанных газов (ОГ), датчики расхода воздуха и охлаждающей жидкости, индукционный датчик частоты вращения и др.

Внешний вид экспериментальной установки с размещенными датчиками и контрольно-измерительными приборами представлен на рис. 1. Была разработана программа экспериментальных исследований, которая предусматривала снятие основных эксплуатационных характеристик ДГУ при работе в стандартном режиме ( $n=\text{const}$ ), на переменной частоте вращения ( $n=\text{var}$ ) и их последующий сравнительный анализ.

При проведении экспериментов по определению основных характеристик и параметров ДГУ в стандартном режиме работы регулировочный винт рейки топливного насоса был установлен в исходное положение, соответствующее заводским настройкам номинального режима. При проведении экспериментов по определению характеристик ДГУ, работающей на переменной частоте вращения, цепь возбуждения синхронного генератора питалась от независимого регулируемого источника питания, рейка топливного насоса для каждого опыта выставлялась в новое положение. Значения выходного фазного напряжения генератора в проводимых экспериментах поддерживалось в пределах 220–230 В при условии, что величина тока возбуждения не превышает предельно допустимого значения для данного типа генератора – 3,0 А.

Для характеристики положения регулировочного винта рейки приняты следующие обозначения:  $h_0$  – рейка топливного насоса находится в исходном положении (заводская установка);  $h_4$  – рейка топливного насоса смещена на 4 мм от исходного положения в сторону уменьшения цикловой подачи топлива.

Эксплуатационные показатели ДГУ в стандартном режиме работы оценивались по нагрузочным характеристикам. Проведенные эксперименты показали, что при изменении нагрузки ДГУ в пределах от холостого хода до номинального значения

частота выходного напряжения изменяется от 53,0 до 49,9 Гц. Всережимный регулятор частоты вращения обеспечивает регулирование подачи топлива  $G_m$  в зависимости от величины нагрузки практически по линейному закону. При этом зависимость удельного расхода топлива  $g$  от величины нагрузки имеет нелинейный характер. Во всем диапазоне изменения электрической нагрузки стандартная система регулирования напряжения ДГУ обеспечивает стабилизацию величины выходного напряжения в пределах  $230 \pm 5$  В, ток обмотки возбуждения изменяется от 0,85 до 2,45 А. Температура блока цилиндров двигателя не превышает  $95^\circ\text{C}$ , режим работы дизеля устойчивый, вибрация не превышает допустимых пределов.

Механические потери в дизельном двигателе определены методом холодной прокрутки и составили для номинального режима  $P_m=5,47$  кВт, механический КПД  $\eta_m=68\%$ . Тепловой баланс дизеля в режиме номинальной нагрузки показан на рис. 2. Эффективный КПД преобразования энергии дизельного двигателя при номинальной нагрузке составил  $\eta_e=30,6\%$ .

Показатели качества генерируемой электрической энергии оценивались по ГОСТ Р 54149–2010. Проведенные эксперименты показали, что форма кривой выходного напряжения генератора ДГУ отличается от синусоидальной, коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_U$  составляет 35,4%. Качество электрической энергии по длительности провалов напряжения определялось по переходным процессам запуска от ДГУ асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором типа АИР90L4У3 и АД71В4У3.

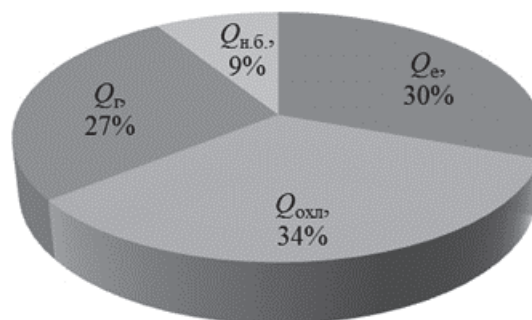


Рис. 2. Тепловой баланс дизельного двигателя KM2V80 в номинальном рабочем режиме:  $Q_e$  – количество теплоты, эквивалентное эффективной работе;  $Q_г$  – количество теплоты, уносимое с отработанными газами;  $Q_{oxl}$  – количество теплоты, отводимое системой охлаждения;  $Q_{н.б.}$  – невязка теплового баланса

Fig. 2. Thermal balance of diesel engine KM2V80 in nominal operating mode:  $Q_e$  is the heat amount, equivalent to the efficient operation;  $Q_г$  is the heat amount, removed with the exhaust gases;  $Q_{oxl}$  is the heat amount, removed by a cooling system;  $Q_{н.б.}$  is the thermal balance error

Абсолютные значения выбросов в атмосферу вредных веществ оценивались по объемным долям в отработанных газах окислов азота  $\phi_{NOx}$  и окиси углерода  $\phi_{CO}$  (млн<sup>-1</sup>), а также концентрации угле-



кислого газа  $C_{CO_2}$  (%). Предельно допустимые нормы выброса вредных веществ и допустимые параметры дымности отработанных газов для исследуемого дизеля определены по ГОСТ Р 51249–99 и ГОСТ Р 51250–99. Результаты проведенных экспериментов свидетельствуют о том, что натуральный показатель ослабления светового потока  $K$ , характеризующий дымность отработанных газов дизеля, соответствует требованиям нормативных документов во всем диапазоне возможных рабочих режимов двигателя. Удельные выбросы окислов азота  $e_{NO_x}$  и окиси углерода  $e_{CO}$  превышают допустимые нормы только в режиме холостого хода и малых нагрузок дизеля, и в целом удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 51249–99.

По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы. Основные технические характеристики ДГУ Kiror KDE12EA3 в целом удовлетворяют требованиям нормативных

документов к автономным источникам питания, построенных на базе двигателей внутреннего сгорания. Однако параметры качества выходного напряжения ДГУ по ряду показателей не соответствуют требованиям нормативов. Результаты анализа характеристик ДГУ KDE12EA3 при работе в стандартных эксплуатационных режимах приведены в таблице.

На рис. 3 представлено семейство регуляторных характеристик ДГУ KDE12EA3, снятых при различных положениях управляющего органа подачи топлива  $h$ . Здесь также нанесена линия максимальных мощностей частичных скоростных режимов – 1, определяющая предельно допустимые значения коэффициента ослабления светового потока  $K_{доп}$ , полученная по результатам проведенных экспериментов. Для обеспечения наиболее экономичных режимов работы дизеля в процессе эксплуатации полученная линейная зависимость должна быть смеще-

**Таблица.** Результаты анализа эксплуатационных характеристик ДГУ KDE12EA3 при работе в стандартном режиме

**Table.** Results of the analysis of diesel generator set (DGS) KDE12EA3 performance in standard mode

№	Нормируемый показатель Specified parameter	ДГУ KDE12EA3 DGS KDE12EA3	Нормативный документ, требования Regulatory document, requirements	Примечание Note
	Показатели качества электрической энергии Electric energy quality indices		ГОСТ Р 54149–2010	
1	Установившееся отклонение напряжения Steady-state voltage deviation	не более $\pm 2,2$ % от номинального значения not more than $\pm 2,2$ % of nominal value	не более $\pm 5$ % от номинального значения not more than $\pm 5$ % of nominal value	удовлетворяет требованиям meets the requirements
2	Коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения Voltage waveform distortion factor	35,4 %	не более 8,0 % not more than 8,0 %	не удовлетворяет требованиям does not meet the requirements
3	Нормально допустимые значения коэффициента $n$ -й гармонической составляющей Normal permitted values of $n$ harmonic component coefficient Номер гармонической составляющей: Number of a harmonic component: 3 5 7 9 11	35,27 1,01 1,41 2,16 0,9	5,0 6,0 5,0 1,5 3,5	не удовлетворяет требованиям does not meet the requirements
4	Отклонение частоты Frequency deviation	$-0,1 + 3,0$ Гц (Hz)	$\pm 0,2$ Гц (Hz)	не удовлетворяет требованиям does not meet the requirements
5	Предельно допустимое значение длительности провала напряжения Overload capacity of voltage fall duration	0,16 с (s)	30 с (s)	удовлетворяет требованиям meets the requirements
	Выбросы вредных веществ с отработанными газами Emissions release with exhaust gases		ГОСТ Р 51249–99	
1	Удельный выброс окислов азота NOX emission	до 28,5 е/кВт·ч в режиме холостого хода up to 28,5 e/kW·h in idle mode	не более 11,0 е/кВт·ч not more than 11,0 e/kW·h	удовлетворяет требованиям meets the requirements
2	Удельный выброс окиси углерода CO emission	до 48,0 е/кВт·ч в режиме холостого хода up to 48,0 e/kW·h in idle mode	не более 10,0 е/кВт·ч not more than 10,0 e/kW·h	удовлетворяет требованиям meets the requirements
	Дымность отработанных газов Smokiness of the exhaust gases		ГОСТ Р 51250–99	
1	Натуральный показатель ослабления светового потока Natural value of luminous flux declension	не более $1,76 \text{ м}^{-1}$ not more than $1,76 \text{ м}^{-1}$	не более $1,84 \text{ м}^{-1}$ not more than $1,84 \text{ м}^{-1}$	удовлетворяет требованиям meets the requirements

на вниз до заводской установки режима номинальной мощности:  $h_{0-P_n}=9,5$  кВт (линия 2).

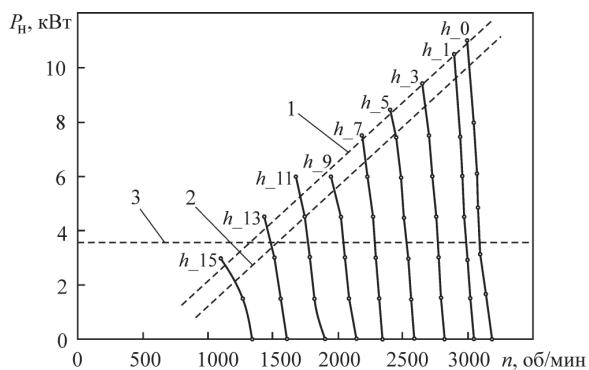


Рис. 3. Регуляторные характеристики ДГУ KDE12EA3

Fig. 3. Regulatory characteristics of DGS KDE12EA3

Для обеспечения устойчивой работы дизеля в области малых нагрузок следует ограничить его минимальную рабочую частоту вращения на уровне 1600 об/мин, что соответствует смещению топливной рейки на 12 мм от заводской установки (линия 3). Дальнейшее снижение частоты вращения нецелесообразно, так как при низких частотах значительно увеличивается неравномерность процессов распыления и сгорания топлива, что приводит к неустойчивым режимам работы двигателя.

Результаты проведенных экспериментов определяют диапазон перемещения рейки топливного насоса ДГУ KDE12EA3, необходимый для реализации режима управления электростанцией по критерию минимума расхода топлива, который составляет 12 мм от  $h_0$  в режиме номинальной мощности до  $h_{12}$  в режиме малых нагрузок, при рабочем диапазоне частот вращения от 3000 до 1600 об/мин (рис. 3). В результате получена функциональная зависимость, связывающая положение рейки топливного насоса с мощностью электрической нагрузки ДГУ, при которой удельный расход топлива будет минимальным, рис. 4.

На рис. 4 также показана зависимость частоты выходного напряжения  $f$  от величины электрической нагрузки ДГУ, рабочие режимы которой оптимизированы по удельному расходу топлива. Зависимость также является линейной, что позволяет использовать текущие значения частоты вращения в качестве сигнала обратной связи в системе автоматического регулирования управляющим органом подачи топлива в ДГУ инверторного типа.

Экспериментальные зависимости удельного расхода топлива исследуемой ДГУ, работающей в стандартном режиме ( $n=const$ ), и оптимизированной по расходу ( $n=var$ ), представлены на рис. 5. Из него видно, что перевод ДГУ на переменную частоту вращения обеспечивает экономию топлива во всем диапазоне рабочих режимов, при этом максимальная экономия достигается в режимах малых нагрузок.

Уменьшение удельного расхода топлива в ДГУ с переменной частотой вращения обеспечивается

за счет снижения механических потерь в дизельном двигателе, повышения КПД генератора  $\eta_r$  и эффективного КПД дизеля  $\eta_e$ .

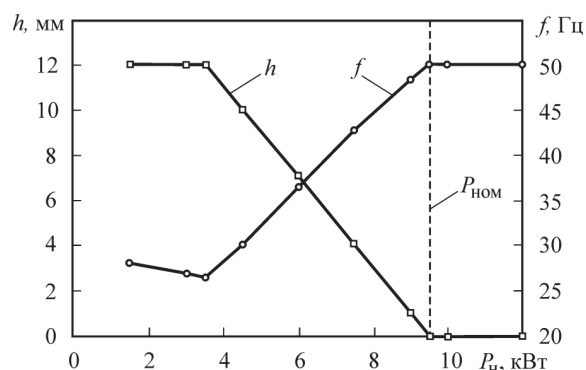


Рис. 4. Функциональная зависимость положения рейки топливного насоса от электрической нагрузки ДГУ KDE12EA3, обеспечивающая минимальный расход топлива

Fig. 4. Functional dependence of control rack position on electric load of DGS KDE12EA3 providing minimum fuel

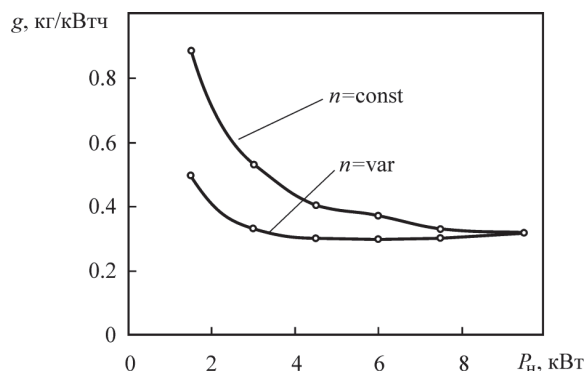


Рис. 5. Зависимость удельного расхода топлива от величины электрической нагрузки в ДГУ на постоянной и переменной частотах вращения

Fig. 5. Dependence of specific fuel consumption on electric load value in DGS on constant and variable speed

На рис. 6 представлены сравнительные энергетические характеристики ДГУ, построенные по результатам проведенных экспериментов. Повышение эффективного КПД дизеля  $\eta_e$  в ДГУ с переменной частотой вращения обеспечивается лучшим качеством горючей смеси на долевых нагрузочных режимах. Качество смесеобразования во многом определяет коэффициент избытка воздуха  $\alpha$ , величина которого в современных дизелях колеблется в пределах от 1,2 до 1,8 (зависит от типа камеры сгорания и наддува). Как правило, производители обеспечивают оптимальные значения  $\alpha$  на долевых режимах, составляющих около 80 % от номинальной мощности дизеля. В большинстве ДГУ мощностью до 60 кВт используется дизельный двигатель без системы наддува. Соответственно, в ДГУ с постоянной частотой вращения расход воздуха остается практически неизменным на всех долевых режимах нагрузки, а стабилизация рабочего режима дизеля обеспечивается изменением

только цикловой подачи топлива, обратно пропорционально которой изменяется величина  $\alpha$ . В ДГУ с переменной частотой вращения при уменьшении величины нагрузки вместе с изменением цикловой подачи уменьшается и частота вращения, а соответственно и расход воздуха, благодаря чему значения  $\alpha$  на долевых режимах будут несколько меньшими. В исследуемом дизеле применена разделенная камера сгорания с вихревой камерой, и наилучшие условия смесеобразования обеспечиваются при значениях  $\alpha \approx 1,4$ . При работе ДГУ с переменной частотой вращения значения  $\alpha$  для большинства частичных режимов нагрузки будут ближе к оптимальным, в сравнении с общепромышленной установкой.

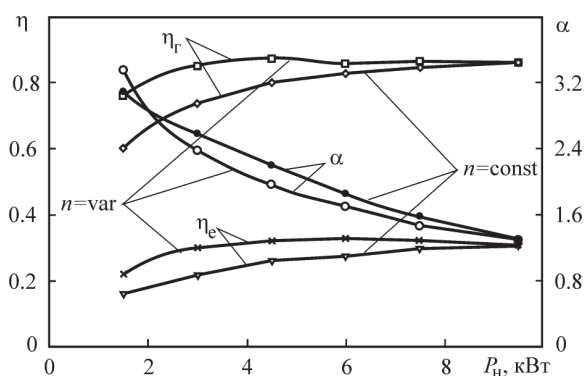


Рис. 6. Сравнительные энергетические характеристики ДГУ с постоянной и переменной частотой вращения

Fig. 6. Comparative energy characteristics of DGS with constant and variable speed

Повышение КПД преобразования энергии в электрической машине при эксплуатации на пониженных частотах вращения объясняется кардинальным изменением структуры потерь: уменьшаются потери в стали и механические потери, но при этом увеличиваются потери в обмотке возбуждения и цепи якоря (влияние дополнительных потерь на общий баланс незначительно). Анализ потерь в синхронном генераторе, работающем на переменной частоте вращения, рассмотрен ранее в [19, 20].

Эргономические показатели ДГУ оценивались по ГОСТ Р ИСО 8528–10–1993 и ГОСТ Р ИСО 8528–9–1993.

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что перевод рабочих режимов ДГУ на переменную частоту вращения, оптимизированную по удельному расходу топлива,

обеспечивает следующие конкурентные преимущества:

- уменьшение механических потерь и повышение КПД дизельного двигателя и генератора на всех долевых режимах нагрузки, кроме номинальной;
- снижение удельного расхода топлива на всех долевых режимах с экономией в режимах малых нагрузок до 40 % от базового варианта;
- улучшение экологических показателей: уменьшение удельных выбросов окислов азота до 20 %, окиси углерода – до 25 %, концентрации углекислого газа – до 10 %;
- улучшение эргономических показателей: снижение уровня шума на 10 дБ, уменьшение вибрации до 40 %.

Исследования проводились на базе одной конкретной модели дизель-генераторной установки, однако теория подобия двигателей внутреннего сгорания и электрических машин, а также аналогичные результаты по удельному расходу топлива, полученные другими исследователями [6], позволяют распространить полученные выводы и на другие ДГУ, того же диапазона мощностей до 60 кВт, с двигателями без наддува. При этом для регулирования цикловой подачи топлива ДГУ можно использовать универсальную функциональную зависимость частоты выходного напряжения  $f$  от величины электрической нагрузки электростанции  $P_n$ , представленную в относительных единицах (рис. 4).

Для практической реализации решений по созданию ДГУ инверторного типа необходима разработка специализированной системы управления, включающей подсистемы управления топливоподачей, регулирования тока возбуждения генератора и преобразования параметров выходного напряжения. Результаты проведенных экспериментов позволяют сформулировать основные технические требования к подсистемам управления инверторных ДГУ, определить необходимые физические переменные, позволяющие осуществлять как контроль над состоянием объекта, так и управление им.

Выполненный анализ проектов перевода действующих дизельных электростанций Республики Саха (Якутия) с постоянной на переменную частоту вращения показал, что они являются рентабельными, при сроке окупаемости от 3 до 5 лет.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rezkallah M., Chandra A., Singh B. Three-Leg Four-Wire Voltage Source Inverters for Hybrid Standalone System feeding Unbalanced Load // Industrial Electronics Society, IECON 2013: 39<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE. – Vienna, Austria, 2013. – P. 1916–1921.
2. Goyal M., Gupta R. Operation and Control of a Distributed Microgrid with Hybrid System // Power Electronics (ICPE): 2012 IEEE 5<sup>th</sup> India International Conference. – Delhi, India, 2012. – P. 1–6.
3. Формирование энергоэффективных режимов дизельной электростанции инверторного типа / С.Г. Обухов, Б.В. Лукутин, Г.Н. Климова, Е.А. Шутов, Н.М. Парников // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 6. – С.80–82.
4. Wang D.H., Nayar C.V., Wang C. Modeling of Stand-alone Variable Speed Diesel Generator using Doubly-Fed Induction Generator // 2<sup>nd</sup> IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems. – HeFei, China, 2010. – P. 1–6.
5. Leuchter J., Bauer P. Efficiency Investigation of Electrical Gen-

- erator-Converter Set // IEEEJ Transaction on Industry Applications. – 2007, November. – V. 127. – № 10. – P. 1064–1069.
6. Dynamic Behavior of Mobile Generator Set with Variable Speed and Diesel Engine / J. Leuchter, V. Rerucha, Z. Krupka, P. Bauer // The 38<sup>th</sup> Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC 2007). – Orlando: PESC Press, 2007. – P. 2287–2293.
  7. Leuchter J., Bauer P., Kurka O. Configuration for Mobile Electrical Power Source // The International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality (PCIM EUROPE 2004). – Nuremberg: PCIM Press, 2004. – V. 1. – P. 916–919.
  8. A Bi-Directional DC-DC Converter with Minimum Energy Storage Elements / L.M. Tolbert, W.A. Peterson, C.P. White, T.J. Theiss, M.B. Scudiere // 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) (дата обращения: 01.12.2014).
  9. 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. – V. 45. – № 6. – P. 2130–2135.
  10. 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://www.researchgate.net/publication/228899464\\_Variable-Adjustable\\_Speed\\_Electricity\\_Generation\\_as\\_Emerging\\_Technology\\_of\\_Power\\_Systems\\_and\\_Application\\_to\\_RES](http://www.researchgate.net/publication/228899464_Variable-Adjustable_Speed_Electricity_Generation_as_Emerging_Technology_of_Power_Systems_and_Application_to_RES) (дата обращения: 01.12.2014).
  11. 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.
  12. Chlodnicki Z., Koczara W., Al-Khayat N. Hibrid UPS Based on Supercapacitor Energy Storage and Adjustable Speed Generator // Journal Electrical Power Quality and Utilisation. – 2008. – V. XIV. – № 1. – P. 13–24.
  13. A Fuzzy Self-tuning PID Control System of Adjustable Speed Diesel Generator / Y. Zhang, S. Li, G. Lu, Y. Zhou // International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2012). – Yantai, China, 2012. – P. 619–622.
  14. Optimal Control of Uninterruptible Power System with Diesel Generator / E. Pichkalov, A. Kiselova, O. Kiselova, G. Kiselov // IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – Kiev, Ukraine, 2013. – P. 378–380.
  15. Zahedi B., Norum L.E. Modeling and Simulation of All-Electric Ships with Low-Voltage DC Hybrid Power Systems // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2013. – V. 28. – № 10. – P. 4525–4537.
  16. Имитационная модель дизель-генераторной электростанции переменной скорости вращения с интеллектуальной системой управления топливopодачей / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.А. Тарпанов, В.В. Пшеничников // Труды НГТУ им. П.Е. Алексеева. – 2011. – № 1 (86). – С. 185–192.
  17. 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.
  18. Сайт компании Kipor. URL: <http://www.kipor.com/> (дата обращения: 01.12.2014).
  19. Математическая модель синхронного генератора инверторной дизельной электростанции / С.Г. Обухов, Н.Ю. Сипайлова, И.А. Плотников, А.Г. Сипайлов // Известия вузов: Проблемы энергетики. – 2012. – № 9–10. – С. 112–120.
  20. Характеристики синхронного генератора, работающего в составе инверторной дизельной электростанции / С.Г. Обухов, Н.Ю. Сипайлова, И.А. Плотников, А.Г. Сипайлов // Известия вузов. Электромеханика. – 2012. – № 5. – С. 41–45.

UDC 62–843.6

Поступила 05.02.2015 г.

## THE EXPERIMENTAL RESEARCHES OF DIESEL GENERATOR SET ON VARIABLE SPEED

**Sergey G. Obukhov,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: serob99@mail.ru

**Igor A. Plotnikov,**

National Research Tomsk Polytechnic University, 30, Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia. E-mail: igorplt@tpu.ru

*Relevance of the research is determined by the need to improve the efficiency of diesel generator sets in the autonomous power supply systems to reduce the cost of electricity.*

**The aim** of the research is to prove experimentally the effectiveness of changing the operating modes of a diesel generator set from constant speed to variable speed and identify the mode panel.

**Research methods:** experimental studies of a variable speed diesel generator set on the basis of a specially designed laboratory bench.

**Results.** The authors proved that the change of operating modes of the diesel generator set to the variable mode with a fuel consumption, optimized by fuel rate, provides the following advantages: reduces mechanical losses and increases the efficiency of a diesel engine and generator for all load conditions, other than nominal; reduces fuel consumption; improves environmental measures and ergonomic characteristics by reducing noise and vibration. The similarity theory of internal combustion engines and electric drives, and similar results for specific fuel consumption obtained by other researchers, allow us to extend our conclusions to other diesel generator sets, naturally aspirated engines with the same range of capacities up to 60 kW. The authors obtained the universal functional dependence of the output voltage frequency of the generator set on the magnitude of power plant electrical load, which can be used in the design and creation of inverter type diesel generator sets. The experimental results allow stating the basic technical requirements for inverter control subsystem of diesel generator sets, determining the required physical variables which allow controlling the state of the object.

**Key words:**

Stand-alone power supply system, diesel generator set, diesel engine, adjustable speed drive.



## REFERENCES

1. Rezkallah M., Chandra A., Singh B. Three-Leg Four-Wire Voltage Source Inverters for Hybrid Standalone System feeding Unbalanced Load. *Industrial Electronics Society, IECON 2013: 39<sup>th</sup> Annual Conference of the IEEE*. Vienna, Austria, 2013. pp. 1916–1921.
2. Goyal M., Gupta R. Operation and Control of a Distributed Microgrid with Hybrid System. *Power Electronics (IICPE): 2012 IEEE 5<sup>th</sup> India International Conference*. Delhi, India, 2012. pp. 1–6.
3. Obukhov S.G., Lukutin B.V., Klimova G.N., Shutov E.A., Parnikov N.M. Formirovanie energoeffektivnykh rezhimov dizelnoy elektrostantsii invertornogo tipa [The formation of energy-efficient modes of diesel power inverter]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika*, 2009, no. 6, pp. 80–82.
4. Wang D.H., Nayar C.V., Wang C. Modeling of Stand-alone Variable Speed Diesel Generator using Doubly-Fed Induction Generator. *2<sup>nd</sup> IEEE International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems*. HeFei, China, 2010. pp. 1–6.
5. Leuchter J., Bauer P. Efficiency Investigation of Electrical Generator-Converter Set. *IEEJ Transaction on Industry Applications*, 2007, November, vol. 127, no. 10, pp. 1064–1069.
6. Leuchter J., Rerucha V., Krupka Z., Bauer P. Dynamic Behavior of Mobile Generator Set with Variable Speed and Diesel Engine. *The 38<sup>th</sup> Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference (PESC 2007)*. Orlando, PESC Press, 2007. pp. 2287–2293.
7. Leuchter J., Bauer P., Kurka O. Configuration for Mobile Electrical Power Source. *The International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality (PCIM EUROPE 2004)*. Nuremberg, PCIM Press, 2004. Vol. 1, pp. 916–919.
8. 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. Available at: [http://power.eecs.utk.edu/pubs/ias2002\\_bidi.pdf](http://power.eecs.utk.edu/pubs/ias2002_bidi.pdf) (accessed 1 December 2014).
9. 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.
10. 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. Available at: [http://www.researchgate.net/publication/228899464\\_Variable-Adjustable\\_Speed\\_Electricity\\_Generation\\_as\\_Emerging\\_Technology\\_of\\_Power\\_Systems\\_and\\_Application\\_to\\_RES](http://www.researchgate.net/publication/228899464_Variable-Adjustable_Speed_Electricity_Generation_as_Emerging_Technology_of_Power_Systems_and_Application_to_RES) (accessed 1 December 2014).
11. Darenkov A.B., Khvatov O.S. Sistema upravleniya avtonomnym dizel-generatorom peremennoy chastoty vrashcheniya [Autonomous control system of diesel generator to variable speed]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2013, no. 5 (102), pp. 303–308.
12. Chlodnicki Z., Koczara W., Al-Khayat N. Hibrid UPS Based on Supercapacitor Energy Storage and Adjustable Speed Generator. *Journal Electrical Power Quality and Utilisation*, 2008, vol. XIV, no. 1, pp. 13–24.
13. Zhang Y., Li S., Lu G., Zhou Y. A Fuzzy Self-tuning PID Control System of Adjustable Speed Diesel Generator. *International Conference on Systems and Informatics (ICSAI 2012)*. Yantai, China, 2012. pp. 619–622.
14. Pichkalov E., Kiselova A., Kiselova O., Kiselov G. Optimal Control of Uninterruptible Power System with Diesel Generator. *IEEE XXXIII International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. Kiev, Ukraine, 2013. pp. 378–380.
15. Zahedi B., Norum L.E. Modeling and Simulation of All-Electric Ships With Low-Voltage DC Hybrid Power Systems. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2013, vol. 28, no. 10, pp. 4525–4537.
16. 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 diesel generator of power plant with variable speed with intelligent throttle control]. *Trudy NGTU im. R.E. Alekseeva*, 2011, no. 1 (86), pp. 185–192.
17. 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 investigate its performance on variable speed]. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2013, vol. 322, no. 4, pp. 48–52.
18. Kipor company. Available at: <http://www.kipor.com/> (accessed 1 December 2014).
19. Obukhov S.G., Sipaylova N.Yu., Plotnikov I.A., Sipaylov A.G. Matematicheskaya model sinkhronnogo generatora invertornoy dizelnoy elektrostantsii [Mathematical model of synchronous generator for diesel power inverter]. *Proceedings of the universities. Challenges of Energy*, 2012, no. 9–10, pp. 112–120.
20. Obukhov S.G., Sipaylova N.Yu., Plotnikov I.A., Sipaylov A.G. Kharakteristiki sinkhronnogo generatora, rabotayushchego v sostave invertornoy dizelnoy elektrostantsii [Characteristics of synchronous generator running in the diesel power inverter]. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Elektromekhanika*, 2012, no. 5, pp. 41–45.

Received: 05 February 2015.