

КОМПЛЕКСНАЯ МОДЕЛЬ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ СТАБИЛИЗИРУЮЩИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

Сидоров Кирилл Михайлович,

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, k.sidorov@bk.ru

Оспанбеков Бауржан Кенесович,

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, baurzhanospanbekov@gmail.com

Грищенко Александр Геннадьевич,

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, alex.g182@yandex.ru

Строганов Владимир Иванович,

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, k.sidorov@bk.ru

Ютт Владимир Евсеевич,

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия, ioutt@mail.ru

DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-10-18-26

Manuscript received 26 April 2021;

Accepted 02 June 2021

Ключевые слова: Автономная энергетическая установка, электроснабжение, преобразователь напряжения, накопитель электроэнергии, моделирование.

Улучшение топливно-экономических и экологических показателей процесса производства электрической энергии – актуальная проблема малой энергетики, обусловленная значительной долей традиционных решений на основе дизель-генераторных установок, не отличающихся высокой эффективностью в общей структуре использования первичного топлива (включая стадии добычи, транспортировки и конечного преобразования). В то же время современное развитие технологий в области перспективных источников энергии и силовой электроники способствуют устойчивой диверсификации энергетических ресурсов, укреплению позиций экологически чистой возобновляемой энергетики. Однако использование альтернативных видов топлив для двигатель-генераторов переменной частоты вращения, фото- и ветроэлектрических установок связано с необходимостью применения дополнительных устройств преобразования электрической энергии – стабилизирующих преобразователей напряжения. Настоящая статья посвящена вопросам, связанным с проектированием автономных энергетических систем на базе указанных преобразователей напряжения с использованием средств математического моделирования. В работе описана комплексная математическая модель автономной энергетической установки с двигатель-генератором переменной частоты вращения и накопителем электроэнергии, представлено математическое описание основных компонентов такой системы, а также приведены примеры реализации модели в специализированной программной среде. Отличительной особенностью предложенной модели является подход к моделированию режимов работы двигатель-генераторной установки, представляющий синтез многопараметровых характеристик двигателя внутреннего сгорания, аналитических выражений для систем накопления и преобразования электроэнергии. Представленная комплексная модель позволяет определять электрические, энергетические и экологические показатели автономных энергетических установок при изменении мощности электрической нагрузки. Приведен пример характера получаемых результатов при компьютерном моделировании.

Информация об авторах:

Сидоров Кирилл Михайлович, доцент кафедры "Электротехника и электрооборудование", к.т.н., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Оспанбеков Бауржан Кенесович, доцент кафедры "Электротехника и электрооборудование", к.т.н., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Грищенко Александр Геннадьевич, ст. преподаватель кафедры "Электротехника и электрооборудование", Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Строганов Владимир Иванович, заведующий кафедрой "Электротехника и электрооборудование", доцент, д.т.н., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Ютт Владимир Евсеевич, профессор кафедры "Электротехника и электрооборудование", д.т.н., Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Россия

Для цитирования:

Сидоров К.М., Оспанбеков Б.К., Грищенко А.Г., Строганов В.И., Ютт В.Е. Комплексная модель автономной энергетической установки на основе стабилизирующих преобразователей напряжения // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Том 15. №10. С. 18-26.

For citation:

Sidorov K.M., Ospanbekov B.K., Grishchenko A.G., Stroganov V.I., Yutt V.E. (2021) Algorithm for evaluating the directional characteristics of an antenna array with electric scanning in the observation coordinate system. T-Comm, vol. 15, no.10, pp. 18-26. (in Russian)

Введение

Электроэнергетика Российской Федерации сегодня является развитой отраслью энергетики, однако имеет ряд проблем, которые сохраняют свою актуальность продолжительное время. К таким проблемам следует отнести энергообеспечение объектов, располагающихся в отдалении от существующей системы общего электроснабжения, для которых организация передачи электрической энергии связана с существенными издержками, техническими сложностями или просто невозможна. Традиционное решение указанной проблемы состоит в использовании автономных энергетических систем на базе дизель-генераторных установок, как правило, отличающихся низкими показателями топливной экономичности и экологической безопасности. Особым образом необходимо отметить отсутствие возможности поддержания КПД таких систем на максимально доступном уровне в условиях переменного графика нагрузки. Известными способами, направленными на решение указанных проблем, являются: применение двигатель-генераторных установок переменной частоты вращения [1], использование возобновляемых источников энергии (фото-, ветроэлектрических установок [2]) и энергонакопительных систем [3]. Однако указанные способы требуют использования дополнительных устройств для преобразования постоянного и переменного напряжения. Объединение (комбинирование) источников электрической энергии различных характеристик, кардинально различающихся в принципах функционирования, в единой системе сопряжено с вопросами организации оптимизированной работы каждого из составляющих звеньев. Существующие решения направлены на оптимизацию режимов работы двух компонентов – двигателя внутреннего сгорания и возобновляемого источника энергии. Однако, максимальный эффект, состоящий в совершенных эксплуатационных характеристиках для данной системы, может быть достигнут только при комплексном подходе к оптимизации режимов работы всех составляющих.

1. Принципы создания перспективных автономных комбинированных энергетических установок

Автономные энергетические установки (АЭУ) с использованием электрооборудования для преобразования напряжения являются сложными системами, в которых требуется организация совместной работы различных по типу и характеристикам функциональных блоков, в том числе тепловых (двигатель внутреннего сгорания), электромеханических (электрогенератор, ветроэлектрическая установка), электрохимических (накопитель электроэнергии – аккумуляторная

батарея), электрических и электронных (преобразователи напряжения) агрегатов.

Стратегия управления функциональными блоками такой автономной электроэнергетической системы - сложный процесс, эффективность реализации которого определяется рациональным соотношением характеристик составляющих компонентов и оптимизации их работы [10-17]. Алгоритмы управления отдельными компонентами и перспективной АЭУ направлены на решение следующих основных задач:

- снижение потребления углеводородного топлива;
- повышение эффективности процесса производства и преобразования электрической энергии;
- повышение экологической безопасности процесса производства электрической энергии;
- повышение качества и стабильности выходного напряжения.

Решение указанных задач может быть осуществлено за счет:

- использования экологически чистых силовых установок и возобновляемых источников энергии;
 - оптимизации режимов работы двигателей внутреннего сгорания, использующих дизельное топливо или бензин, по критериям минимизации расхода топлива и выбросов токсичных веществ;
 - оптимизации режимов работы электрогенераторов и накопителей электроэнергии по критерию повышения коэффициента полезного действия;
 - оптимизации характеристик и режимов работы преобразователей напряжения по критериям минимизации потерь электроэнергии и повышения качества выходного напряжения.
- Определение рациональных законов управления автономными функциональными блоками АЭУ является многофакторной задачей, решение которой может быть получено при помощи математического моделирования.

2. Описание комплексной математической модели АЭУ

2.1. Структура модели

Для последующей разработки рациональных алгоритмов управления компонентами АЭУ, оценки функциональности и эффективности работы преобразовательного электрооборудования в составе автономной энергетической установки в различных режимах, а также определения эксплуатационных характеристик, необходимо сформировать комплексную математическую модель. Функциональная схема АЭУ, воспроизводимая в качестве математической (компьютерной) модели, представлена на рисунке 1.

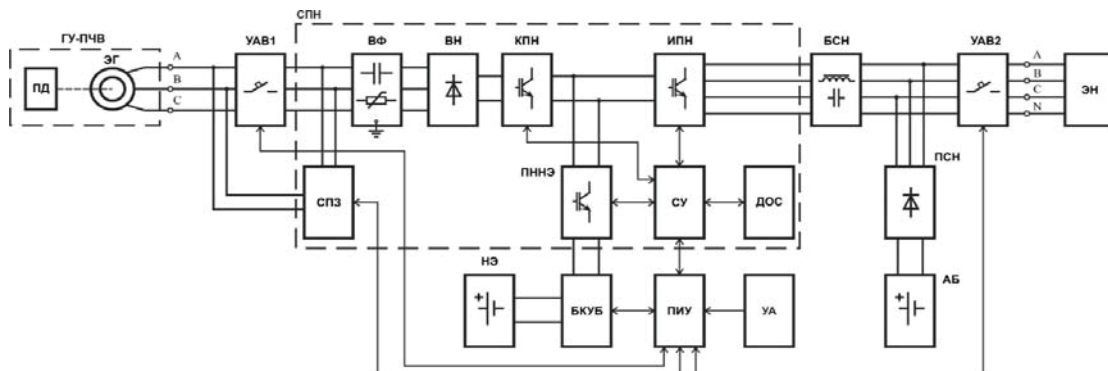


Рис. 1. Функциональная схема АЭУ

В состав АЭУ входят следующие функциональные блоки: АБ – низковольтная аккумуляторная батарея; БКУБ – блок контроля и управления батареями; БСН – блок согласования (трансформации) и фильтрации напряжения; НЭ – накопитель электрической энергии (высоковольтная аккумуляторная батарея); ПИУ – пульт индикации и управления; ПННЭ – преобразователь напряжения НЭ; СПН – стабилизирующий преобразователь напряжения; СУ – система управления СПН; СПЗ – схема предварительного заряда; ВН – выпрямитель напряжения ЭГ; ВФ – входной фильтр; ГУ-ПЧВ – генераторная установка переменного частоты вращения; ДОС – датчики обратных связей; ИПН – инвертор постоянного напряжения; КПН – конвертор постоянного напряжения; ПД – первичный двигатель; ПСН – преобразователь напряжения собственных нужд; УАВ – управляемые автоматические выключатели (ввода и нагрузки); УА – устройства автоматики; ЭГ – электрогенератор; ЭН – электрическая нагрузка.

Ниже представлено описание основных составляющих компонентов указанной функциональной схемы АЭУ, реализованных в виде математических моделей.

2.2. Описание математической модели двигателя внутреннего сгорания

Важной частью комплексной модели АЭУ является модель двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Для оценки эксплуатационных показателей ДВС, определяющих энергоэффективность и экологическую безопасность автономной электростанции, использующей углеводородное топливо, применяются следующие показатели работы:

- удельный расход топлива – отношение расхода бензина или дизельного топлива к полезной мощности в г/(кВт·ч);
- концентрации выбросов вредных веществ в составе отработавших газов в % или ч.н.м.

Мгновенные значения удельного расхода топлива и концентрации выбросов токсичных веществ двигателями внутреннего сгорания можно представить в виде функций двух переменных. Представленный в настоящей статье подход к моделированию работы ДВС в составе автономной электростанции основан на использовании экспериментальных нагрузочных характеристик – зависимости основных показателей работы ДВС (удельного расхода топлива и концентрации выбросов токсичных веществ) от изменения частоты вращения и момента на валу электрогенератора. Совокупность указанных параметров является достаточной для расчета значений расхода топлива и объема выбросов токсичных веществ при работе двигатель-генераторной установки автономной электростанции на различных режимах, в том числе при переменной мощности нагрузки, изменении частоты вращения электрогенератора и момента ДВС.

С целью формирования комплексной математической модели автономной энергетической установки в качестве исходных данных использованы нагрузочные характеристики бензинового двигателя внутреннего сгорания, имеющего широкий диапазон допустимой частоты вращения. Указанные данные позволяют построить многопараметровые характеристики для модели ДВС. Примеры построенных зависимостей удельного расхода топлива g_e и концентрации выбросов одного из компонентов (в данном примере NO_x) от

частоты вращения и крутящего момента изображены на рисунке 2.

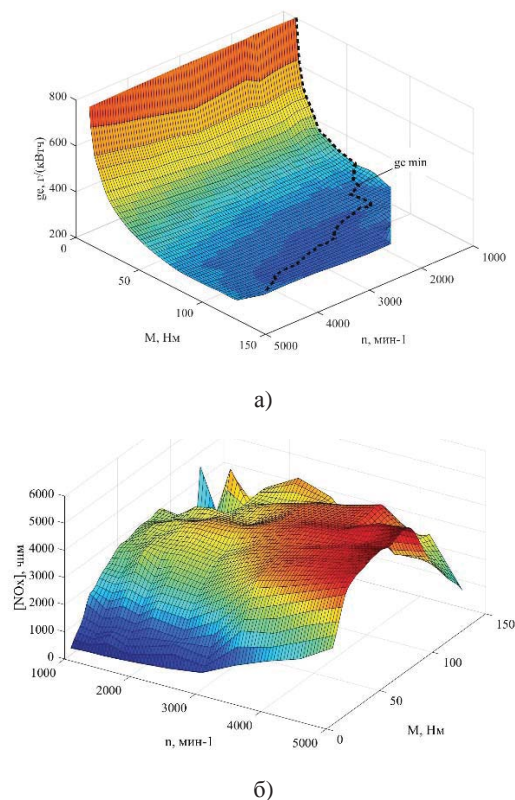


Рис. 2. Многопараметровые характеристики ДВС по величине: а) удельного расхода топлива g_e в г/(кВт·ч); концентрации выбросов б) $[NO_x]$ в ч.н.м.

Трехмерные поверхности значений показателей работы ДВС, согласно рисунку 2, компилируются и представляются в виде блоков с массивами экспериментальных данных. Количество блоков соответствует количеству определяемых параметров ДВС, при этом каждый блок содержит два входа и один выход. Сигналы, направляемые на вход – мгновенные значения частоты вращения $n_{двс}$ и крутящего момента $M_{двс}$ ДВС. Выходное значение – показатель работы ДВС, определяемый с учетом пары входных значений $n_{двс}$ и $M_{двс}$.

Процесс работы модели ДВС в составе комплексной модели автономной электростанции включает следующие этапы:

- определение рабочей частоты вращения и крутящего момента на коленчатом валу ДВС согласно требуемой выходной мощности автономной электростанции по условию обеспечения электроснабжения нагрузки и снижения расхода топлива;

- определение мгновенных значений удельного расхода топлива и объемных концентраций выбросов токсичных веществ в продуктах сгорания, в том числе: оксида углерода, оксидов азота и углеводородов, по многопараметровым характеристикам $g_e=f(n_{двс}, M_{двс})$, $[CO]=f(n_{двс}, M_{двс})$, $[NO_x]=f(n_{двс}, M_{двс})$, $[HC]=f(n_{двс}, M_{двс})$, соответственно;

- расчет массы израсходованного топлива и токсичных выбросов по временным зависимостям удельного расхода топлива и объемных концентраций вредных веществ за время работы двигателя внутреннего сгорания.

Предлагаемая модель ДВС в составе автономной электростанции отличается возможностью работы ДВС как с постоянной (в стационарном режиме), так и с переменной частотой вращения коленчатого вала. Последняя функция реализуется с целью оптимизации расхода топлива и минимизации выбросов токсичных веществ за счет задания таких режимов функционирования ДВС, которые максимально удовлетворяют указанным требованиям. Необходимо учесть, что увеличение удельного расхода топлива связано с работой ДВС в неоптимальном режиме (при низком КПД), поэтому организация работы двигателя внутреннего сгорания в режиме минимального удельного расхода с минимизацией выбросов токсичных веществ является приоритетной задачей при создании алгоритмов управления автономной электростанцией.

Для оценки оптимальных по критерию удельного расхода топлива режимов работы ДВС на представленной на рис. 2 (а) многопараметровой характеристике обозначена линия минимальных значений удельного расхода топлива ($g_e \min$). Мощность ДВС, рассматриваемая на указанной линии, соответствуют таким значениям $M_{двс}$ и $n_{двс}$, при которых достигается минимальное значение удельного расхода топлива. Таким образом, регулирование работы ДВС в составе автономной энергетической установки переменной частоты вращения осуществляется с помощью системы управления генераторной установкой согласно указанной зависимости.

Представленная выше модель формируется для определенного типа двигателя внутреннего сгорания и позволяет рассчитывать значения израсходованного топлива и выбросов загрязняющих веществ во всем диапазоне допустимой работы ДВС. Рассмотренный подход к моделированию справедлив для двигателей различных типов, в том числе бензиновых и дизельных, а предложенная модель является универсальной.

2.3. Описание математической модели электрогенератора и накопителя электроэнергии

В качестве электрической машины в составе комплексной модели автономной электростанции рассматривается трехфазный синхронный генератор как наиболее распространенный тип электрических машин для автономных энергосистем. Моделирование работы ЭГ основано на известной теории Горева-Парка, включающей описание синхронной электрической машины системой дифференциальных уравнений напряжений и потокосцеплений обмоток электрической машины [4-6].

Моделирование работы накопителя электроэнергии (НЭ) – аккумуляторной батареи – осуществляется с использованием метода Шеферда [7]. Согласно указанному методу режим разряда аккумуляторной батареи можно описать уравнением, основанном на аппроксимации семейства разрядных характеристик последней.

2.4. Описание математической модели преобразователей напряжения генератора

Моделирование выпрямителя напряжения генератора

В представленной модели автономной энергетической установки рассматривается вариант использования выпрямителя переменного напряжения генератора на основе неуправляемой полномостовой схемы. Работа синхронного генератора, входящего в состав АЭУ, имеет свои особенно-

сти, обусловленные нелинейным характером фактической нагрузки, представляющей собой выпрямитель.

В настоящей работе подход к моделированию работы выпрямителя переменного напряжения основан на учете влияния выпрямительной нагрузки на напряжения и токи синхронного генератора, а также качество получаемого постоянного напряжения. Следует отметить, что несмотря на синусоидальную э.д.с. синхронного генератора при работе на выпрямитель, кривая фазного напряжения несинусоидальна и с ростом нагрузки претерпевает деформацию – относительное значение основной гармоники уменьшается на фоне возрастания высших гармонических составляющих. Последнее обстоятельство может быть учтено посредством специфических зависимостей [8], реализованных в математической модели помимо известных соотношений между входными и выходными характеристиками, а также типовой схемы замещения неуправляемого выпрямителя.

Моделирование конвертора постоянного напряжения (КПН)

Изменение величины и частоты выходного напряжения синхронного генератора в режиме переменной частоты вращения влечет за собой непостоянство величины выпрямленного напряжения на стороне постоянного тока. Регулировка и стабилизация постоянного напряжения на входе инвертора СПН осуществляется посредством повышающего преобразователя постоянного напряжения (конвертора).

Математическая модель конвертора формируется на основе схемы замещения последнего и выражается следующей системой дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} \frac{di_L}{dt} = \frac{-R \cdot i_L - f_D \cdot u_{\text{ВЫХ}} + U_{\text{ВХ}}}{L}; \\ \frac{du_{\text{ВЫХ}}}{dt} = \frac{i_L \cdot f_D}{C} - \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{R_H C}, \end{cases} \quad (1)$$

где i_L – ток дросселя; $u_{\text{вых}}$ – выходное напряжение конвертора; L – индуктивность дросселя, C – емкость выходного фильтра; f_D – коммутационная функция диода конвертора; $U_{\text{ВХ}}$ – входное напряжение конвертора; R – сопротивление, отражающее потери в дросселе и преобразователе; R_H – сопротивление нагрузки.

В представленной системе уравнений коммутационная функция диода принимает значение $f_D = 0$ или $f_D = 1$ и является функцией режима работы транзисторного ключа конвертора. Управление выходным значением напряжения конвертора осуществляется путем реализации широтно-импульсного регулирования указанным коммутационным элементом, при этом относительная длительность нахождения транзистора во включенном состоянии определяется ошибкой регулирования по выходному напряжению и потребляемому току. Коммутационная функция f_D , учитывающая формирование управляющего сигнала конвертора, может быть представлена в следующем виде:

– при использовании обратных связей по входному току и выходному напряжению

$$f_D = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \text{sign} \left[k_I (k_U (U_3 - u'_{\text{ВЫХ}}) - i'_L) - u'_I \right] \right\}, \quad (2)$$

– при использовании обратной связи по выходному напряжению

$$f_D = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \text{sign} \left[k_U (U_3 - u'_{\text{ВЫЛХ}}) - u_{\Gamma} \right] \right\}, \quad (3)$$

где k_U, k_I – соответственно коэффициенты усиления ошибки по выходному напряжению и потребляемому току; U_3 – заданное выходное напряжение конвертора; $u'_{\text{ВЫЛХ}}$ – приведенное значение фактического выходного напряжения конвертора; u_{Γ} – приведенное значение входного тока конвертора; u_{Γ} – выходное напряжение модулирующего генератора.

Структурная схема силовой части и системы управления конвертора постоянного напряжения, реализованная с использованием специализированного программного обеспечения, представлена на рисунке 3.

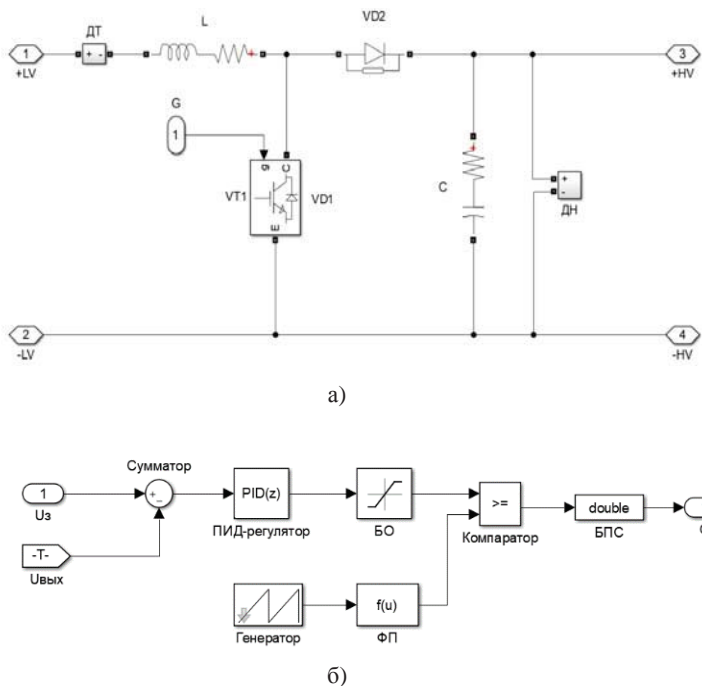


Рис. 3. Структурная схема модели:
а) силовой части; б) системы управления КПН

Силовая часть модели КПН включает: индуктивный накопитель энергии (L); управляемый транзисторный ключ (VT1) с обратным диодом (VD1); полупроводниковый диод (VD2); выходной емкостной фильтр (C); датчики обратной связи по току (ДТ) и напряжению (ДН).

Модель системы управления КПН включает: блоки входных данных, в том числе заданного напряжения U_3 и фактического $U_{\text{ВЫЛХ}}$ выходного напряжения конвертора; сумматор; ПИД-регулятор; блок ограничения ошибки регулирования (БО); генератор пилообразного напряжения; функциональный преобразователь напряжения генератора (ФП); компаратор; блок преобразования выходного сигнала (БПС); блок выходного сигнала (Г).

2.5. Описание математической модели инвертора постоянного напряжения

Преобразование постоянного напряжения на выходе КПН в переменное напряжение заданной величины и частоты

осуществляется с помощью инвертора постоянного напряжения (ИПН). Силовая часть ИПН выполнена по трехфазной полномостовой топологии. Управление величиной и частотой переменного напряжения на выходе преобразователя осуществляется системой управления инвертора, в которой сигнал задания частоты преобразуется в длительность сигналов управления, подаваемых на транзисторы инвертора в соответствии с установленным алгоритмом. Значение амплитуды напряжения переменного тока на выходе инвертора определяется значением выпрямленного входного напряжения, которое поддерживается на постоянном уровне при помощи КПН.

Структурная схема силовой части и системы управления инвертором напряжения, реализованная с использованием специализированного программного обеспечения, представлена на рисунке 4.

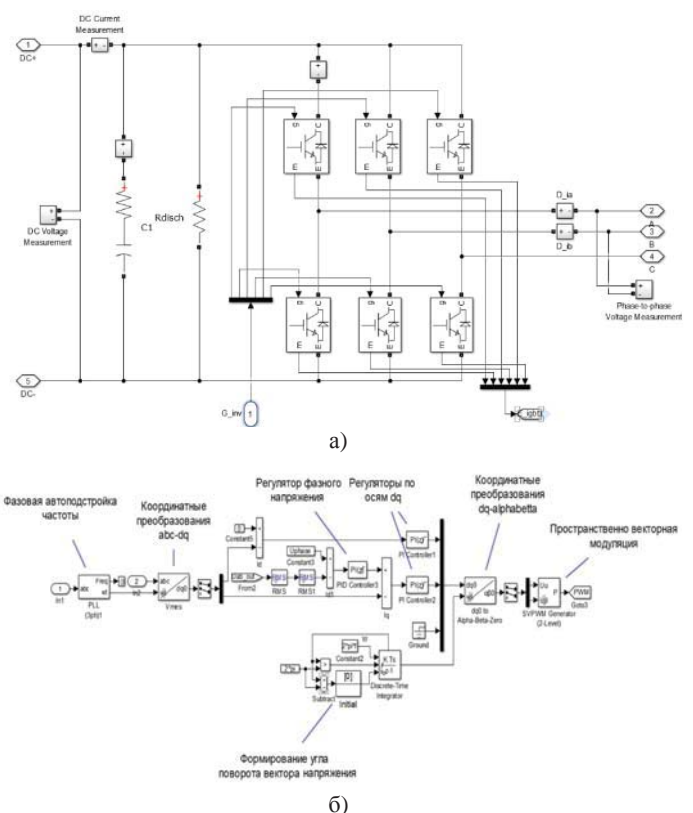


Рис. 4. Структурная схема модели:
а) силовой части; б) системы управления ИПН

Силовая часть модели ИПН включает: входной емкостной фильтр, управляемые транзисторные ключи с обратными диодами, датчики обратной связи по току и напряжению. Модель системы управления ИПН включает: блоки входных данных, в том числе фактических значений выходных токов (i_{abc}) и напряжений (u_{abc}), заданного выходного (U_{phase}) и фактического напряжений ($U_{\text{ab_out}}$); сумматор (I_q); блок фазовой автоподстройки частоты (PLL); генератор частоты выходного напряжения; ПИ-регуляторы; преобразователи системы координат «abc-dq» и «dq-αβ»; пространственно-векторный ШИМ-генератор выходного сигнала (SVPWM).

В структурной схеме реализованы три регулятора: один регулятор фазного напряжения (блок «PID controller 3»), и два токовых (ПИ-регуляторы «PI controller 1» и «PI

controller 2»). ПИ-регулятор фазного напряжения считывает ошибку между заданной амплитудой напряжения нагрузки и фактической, затем увеличивает входной сигнал на значение, необходимое для достижения требуемой амплитуды напряжения вплоть до нулевого значения ошибки регулирования.

Структурная схема блока указанного регулятора показана на рисунке 5, где переменная «Р» является настраиваемой переменной пропорционального коэффициента, «I» – интегрального коэффициента.

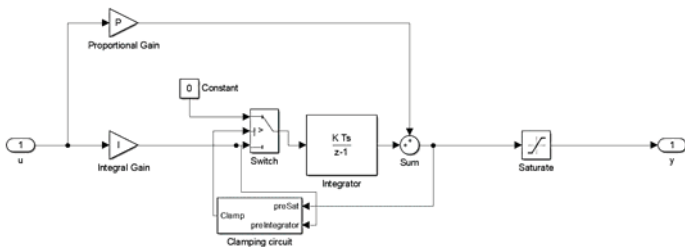


Рис. 5. Структурная схема регулятора фазного напряжения

Далее сигнал с выхода регулятора фазного напряжения поступает на вход регулятора тока по оси q. Ошибка регулирования в этом случае определяет вектор напряжения по ортогональной оси q при условии поддержания нулевого значения тока Id в номинальных режимах.

В конечном итоге результатом работы системы управления инвертора является формирование шести независимых сигналов, формируемых согласно алгоритму пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции. Структурная схема реализации векторного управления в программной среде показана на рисунке 6.

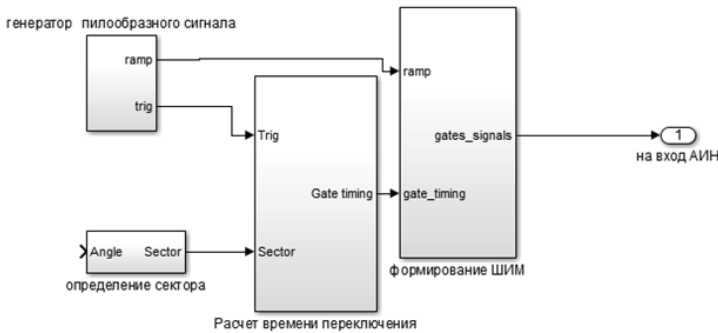


Рис. 6. Структурная схема реализации векторного управления ИПИ

2.6. Описание математической модели блока трансформации и согласования переменного напряжения

Работа инвертора постоянного напряжения связана с высокочастотной коммутацией транзисторных ключей. Этот процесс обуславливает значительный уровень электромагнитных помех, транслируемых как в выходную цепь переменного тока, так и входную цепь постоянного тока.

Кроме того, форма напряжения на выходе инвертора представляет собой последовательность импульсов переменной скважности. В связи с этим, в отличие от синусоидального напряжения сети или синхронного электрогенератора,

выходное напряжение инвертора в большей степени требует коррекции по форме и качеству при электроснабжении потребителей переменного тока. Для решения указанной проблемы неотъемлемым звеном системы преобразования электроэнергии является блок трансформации и согласования переменного напряжения (БСН).

В качестве основных функций БСН следует выделить следующие:

- обеспечение требуемых характеристик выходного переменного напряжения автономной электростанции для электроснабжения потребителей переменного тока по величине, качеству и электромагнитной совместимости;
- согласование выходного переменного напряжения стабилизирующего преобразователя напряжения с напряжением системы электроснабжения общего назначения;
- гальваническая развязка выходной цепи СПН и электрической нагрузки.

В состав оборудования БСН в общем случае входят:

- синусоидальный фильтр;
- фильтр электромагнитной совместимости;
- разделительный трансформатор (дополнительный функционал).

Состав и требуемые функции блока трансформации и согласования переменного напряжения, а также принятые для дальнейшего рассмотрения способы повышения качества выходного напряжения, определяют базовую схему замещения БСН в составе комплексной модели АЭУ. Эквивалентная схема безтрансформаторного БСН представлена на рисунке 7.

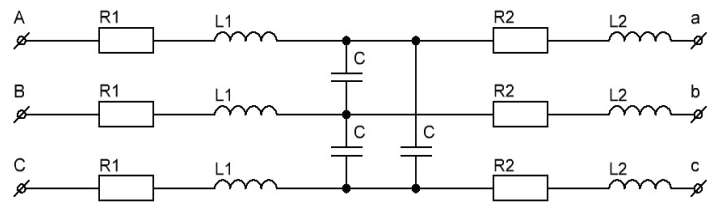


Рис. 7. Базовая схема замещения безтрансформаторного БСН в составе комплексной модели АЭУ

Предлагаемая схема БСН реализуется в составе комплексной математической модели посредством общей системы уравнений [9]:

$$\begin{cases} \frac{du_C}{dt} = \frac{i_{ex}}{3 \cdot C} - \frac{i_{вых}}{3 \cdot C} \\ \frac{di_{ex}}{dt} = \frac{1}{L_1} (u_{ex} - u_C - R_C (i_{ex} - i_{вых})) - R_1 \cdot i_{ex} \\ \frac{di_{вых}}{dt} = \frac{1}{L_2} (u_C - u_{вых} + R_C (i_{ex} - i_{вых})) - R_2 \cdot i_{вых} \end{cases} \quad (4)$$

где u_{ex} , u_C , $u_{вых}$ – соответственно трехфазная система (матрица) линейных напряжений на входе БСН, емкостной цепи и выходе БСН; i_{ex} , $i_{вых}$ – трехфазная система (матрица) линейных токов на входе и выходе БСН; L_1 , L_2 , R_1 , R_2 – индуктивности и активные сопротивления фильтрующих дросселей; C , R_C – емкость и внутреннее активное сопротивление конденсаторов в составе БСН.

2.7. Описание комплексной модели автономной электростанции на базе двигатель-генераторной установки и преобразователя напряжения

Описанные выше составные части взаимосвязаны и составляют комплексную математическую модель автономной энергетической установки на базе двигатель-генератора переменной частоты вращения, преобразователя напряжения и накопителя электроэнергии. Модель предназначена для исследования эксплуатационных показателей и режимов работы преобразователей электроэнергии в составе автономных электростанций, а также выходных характеристик последних.

Обобщенная структурная схема указанной модели представлена на рисунке 8.

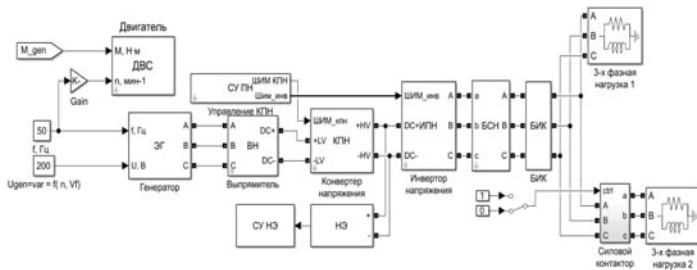


Рис. 8. Структурная схема комплексной модели автономной электростанции на базе двигатель-генераторной установки и преобразователя напряжения

Порядок работы с моделью включает следующие процедуры:

1. Ввод исходных данных в диалоговые окна структурных элементов модели.
2. Задание режимов работы источника электроэнергии и нагрузки.
3. Запуск модели.
4. Работа модели в автоматическом режиме.
5. Вывод результатов в файл и на экран.

Наряду с энергетической эффективностью и экологичностью АЭУ на основе генераторов переменной частоты вращения важными показателями являются стабильность и качество выходного напряжения. Для оценки электрических характеристик, получаемых с использованием комплексной модели АЭУ, на рисунке 9 и 10 соответственно приведены осциллограммы величины и частоты выходного напряжения электрогенератора при изменении мощности нагрузки и режима работы. В показанном режиме выходная частота двигатель-генераторной установки изменяется в диапазоне от 10 до 80 Гц, а значение действующего линейного напряжения от 125 до 400 В. Выходные электрические характеристики СПН, демонстрирующие работу АЭУ, отражены на рисунках 11-13.

Стабилизированный характер частоты и величины выходного напряжения АЭУ (см. рис. 12) вне зависимости от отклонений аналогичных параметров на выходе двигатель-генераторной установки, при этом максимальное отклонение действующего выходного напряжения от номинального значения не превысило 1,5 В, коэффициент нелинейных искажений составил не более 1%.

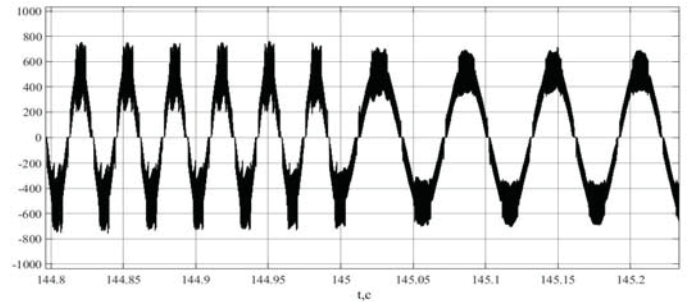


Рис. 9. Осциллограмма мгновенного значения напряжения генератора в режиме переменной частоты вращения

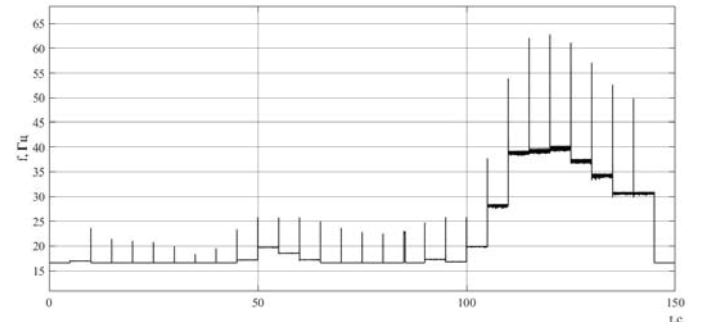


Рис. 10. Изменение выходной частоты генератора в режиме переменной частоты вращения

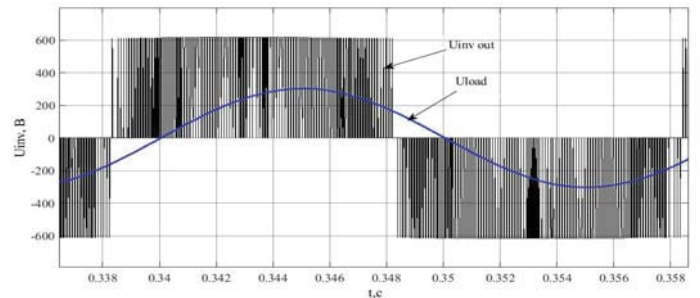


Рис. 11. Осциллограмма мгновенного напряжения на выходе ИПН

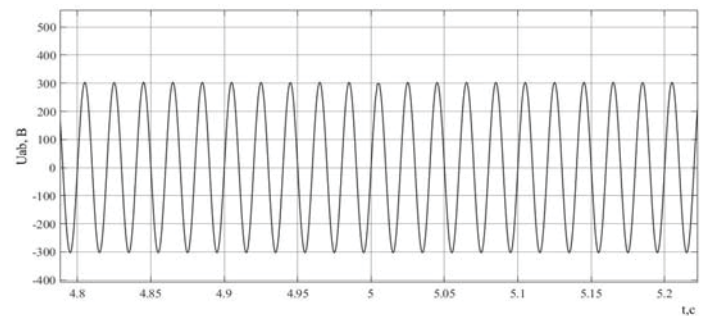


Рис. 12. Осциллограмма мгновенного значения выходного фазного напряжения СПН в режиме переменной частоты вращения ДВС

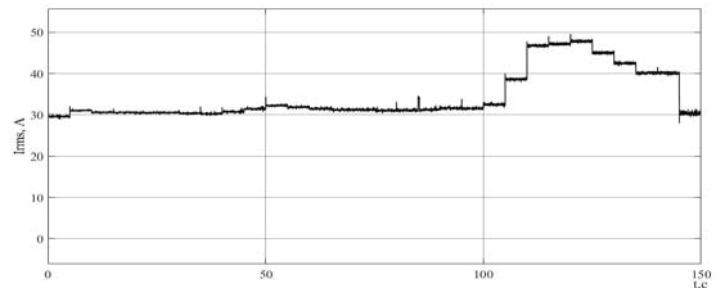


Рис. 13. Осциллограмма действующего значения выходного фазного тока СПН

Заключение

Использование наиболее распространенных дизель-генераторов или бензоагрегатов в качестве автономных источников электроснабжения сопровождается неэффективным использованием ресурса агрегатов, работой в режимах с низким КПД и высокими показателями удельного расхода топлива, что способствует обострению сопутствующих энергетических и экологических проблем. Особенно указанные негативные факторы проявляются в условиях работы с переменным графиком нагрузки на электросеть. Одним из способов решения указанных проблем может являться использование в составе атомных электростанций двигатель-генераторных установок переменной частоты вращения и накопителей электроэнергии.

В рамках настоящей работы сформирована комплексная математическая модель указанной системы, состоящая из следующих основных узлов (подмоделей): двигателя внутреннего сгорания, электрогенератора, выпрямителя напряжения генератора, конвертора постоянного напряжения, инвертора постоянного напряжения, системы автоматического управления стабилизирующим преобразователем напряжения, накопителя электрической энергии, блока трансформации и согласования переменного напряжения, электрической нагрузки. Автономные функциональные блоки комплексной модели, реализованы на основе аналитических зависимостей, массивов экспериментальных данных и схем замещения. Основу математического описания двигателя внутреннего сгорания и накопителя электроэнергии составляют многопараметровые экспериментальные нагрузочные характеристики.

Моделирование работы электрических машин, в том числе электрогенератора и двигательной нагрузки основано на теории обобщенной электрической машины и результирующего вектора. В основе моделирования преобразовательного электрооборудования лежат схемы замещения и аналитические зависимости, связывающие входные и выходные характеристики. Представленная математическая (компьютерная) модель АЭУ позволяет определять выходные электрические и энергетические показатели работы преобразовательного электрооборудования и системы накопления электроэнергии, дать количественную оценку расхода топлива и массы выбросов загрязняющих веществ. Особенностью модели является функционирование двигатель-генератора в режиме переменной частоты вращения с реализацией работы ДВС в режиме минимального удельного расхода топлива в допустимом диапазоне.

Представленная в настоящей работе модель АЭУ может быть использована для разработки рациональных алгоритмов управления компонентами автономных комбинированных энергетических установок, оценки функциональности и эффективности работы ДВС и преобразовательного электрооборудования в составе автономной электростанции в различных режимах, а также определения эксплуатационных характеристик последней. Отличительной особенностью рассмотренной модели АЭУ является возможность комплексной оценки энергетической эффективности и экологической безопасности энергетической установки.

Литература

1. *Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Самоячев И.С., Соколов В.В.* Электростанции автономных объектов на базе дизель-генераторных установок переменной частоты вращения // Труды Нижегородского государственного технического университета им. П.Е. Алексеева. 2015. № 2 (109). С. 217-225.
2. *Tun, K.M., Swe W.* Frequency control of stand alone wind-diesel hybrid system // International Journal for Innovative Research in Multi-disciplinary Field. 2017. Vol. 3. № 4. P.131-135.
3. *Denholm P., Ela E., Kirby B., Milligan M.* Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation // Technical Report NREL/TP-6A2-47187. Colorado: NREL, 2010. 54 p.
4. Горев А.А. Переходные процессы синхронной машины. Л.: Наука, 1985. 502 с.
5. *Brezovac M., Kuzle I., Krpan M.* Detailed mathematical and simulation model of a synchronous generator // Journal of Energy. 2015. Vol. 64. P. 102-129.
6. *Вагин Г.Я., Солнцев Е.Б., Мамонов А.М., Петров А.А.* Математическая модель явнополюсного синхронного генератора мини-ТЭЦ // Инженерный вестник Дона. 2015. №2-2 (36). С. 33.
7. *Shephard C.M.* Design of primary and secondary cells: An equation describing battery discharge // J. Electrochem. Soc. 1965. Vol. 112, Iss. 3. P. 252-257.
8. *Синайлов Г.А., Зорин В.А., Кузнецова Т.В., Цукублин А.Б.* Некоторые вопросы работы маломощного синхронного генератора на выпрямительную нагрузку // Известия томского ордена трудового красного знамени политехнического института имени С. М. Кирова. Т.145, №23. 1966. С. 140-150.
9. *Reznik A., Godoy Simões M., Al-Durra Ahmed, Mueeen S. M.* LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid Interconnected Systems // IEEE Transactions on Industry Applications. 2014. Vol. 50, Iss. 2. P. 1225-1232.
10. *Гулямов К.Х., Гуломзода А.Х.* Разработка и исследование повышающего преобразователя постоянного напряжения // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2017. № 4 (51). С. 55-61.
11. *Карелина М.Ю., Арифиллин И.В., Терентьев А.В.* Аналитическое определение весовых коэффициентов при многокритериальной оценке эффективности автотранспортных средств // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2018. № 1 (52). С. 3-9.
12. *Долина О.Н., Жидкова М.А., Шпилькина Т.А., Ахметжанова Э.У.* Реализация политики импортозамещения в автомобильной промышленности // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2017. № 2 (49). С. 22-28.
13. *Пузаков А.В., Осаулко Я.Ю.* Исследование влияния эксплуатационных факторов на тепловое состояние автомобильного генератора // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2018. № 1 (52). С. 16-23.
14. *Надарава Ц.Г., Селиванов А.И., Шестаков И.Я., Фадеев А.А., Бабкина Л.А.* Химико-кинетический накопитель энергии и мотор-редуктор для электромобиля // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2017. № 1 (48). С. 12-17.
15. *Козлов А.Н.* Организация безопасной эксплуатации тяговой литий-ионной аккумуляторной батареи на транспортном средстве // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2016. № 1 (44). С. 14-19.
16. *Мельникова Т.Е., Мельников С.Е., Завязкина В.В.* Электромобиля: перспективы и пути развития // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2019. № 3 (58). С. 22-26.
17. *Блудян Н.О.* Перспективы развития электрических автобусов // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2020. № 3 (62). С. 19-24.

SIMULATION MODEL OF AUTONOMOUS POWER PLANT BASED ON STABILIZING VOLTAGE CONVERTERS

Kirill M. Sidorov, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, k.sidorov@bk.ru

Baurzhan K. Ospanbekov, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia,
baurzhanospanbekov@gmail.com

Aleksandr G. Grishchenko, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, alex.g182@yandex.ru

Vladimir I. Stroganov, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia,
v.stroganov-madi@mail.ru

Vladimir E. Yutt, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (MADI), Moscow, Russia, iouutt@mail.ru

Abstract

Improving the fuel, economic and environmental indicators of the process of generating electrical energy is an urgent problem of small-scale power generation, due to a significant share of traditional solutions based on diesel generator sets, which are not highly efficient in the overall structure of primary fuel use (including the stages of production, transportation and final transformation). At the same time, the modern development of technologies in the field of promising energy sources and power electronics contributes to the sustainable diversification of energy resources, strengthening the position of environmentally friendly renewable energy. However, the use of alternative types of fuels for variable speed engine generators, photovoltaic and wind power plants is associated with the need to use additional devices for converting electrical energy – stabilizing voltage converters. This article is devoted to issues related to the design of autonomous power systems based on these voltage converters using mathematical modeling tools. The paper describes a complex mathematical model of an autonomous power plant with a variable speed motor-generator and an electric energy storage device, presents a mathematical description of the main components of such a system, and also provides examples of the model implementation in a specialized software environment. A distinctive feature of the proposed model is an approach to modeling the operating modes of an engine-generator set, which is a synthesis of multi-parameter characteristics of an internal combustion engine, analytical expressions for energy storage and conversion systems. The presented complex model makes it possible to determine the electrical, energy and environmental indicators of autonomous power plants when the power of the electrical load changes. The article provides an example of the nature of the results obtained in computer modeling.

Keywords: Autonomous power plant, power supply, voltage converter, energy storage, simulation.

References

1. O.S. Khvatov, A.B. Daryenkov, I.S. Samoyavchev and V.V. Sokolov (2015), "Electric power stations of autonomous objects based on a variable speed diesel generator sets", *Transactions of NNSTU n.a. R.E. Alekseyev*, Vol. 109, No. 2, pp. 217-225. (in Russian)
2. K.M. Tun and W. Swe (2017), "Frequency control of stand alone wind-diesel hybrid system", *International Journal for Innovative Research in Multidisciplinary Field*, Vol. 3, No. 4, pp. 131-135.
3. P. Denholm, E. Ela, B. Kirby, and M. Milligan (2010), Role of Energy Storage with Renewable Electricity Generation, NREL, Colorado.
4. A.A. Gorev (1985), *Perekhodnye Protsestry Sinhronnoy Mashiny*, Nauka, Leningrad. (in Russian)
5. M. Brezovac, I. Kuzle and M. Krpan (2015), "Detailed mathematical and simulation model of a synchronous generator", *Journal of Energy*, Vol. 64, Special Issue, pp. 102-129.
6. G.Ya. Vagin, E.B. Solntsev, A.M. Mamonov and A.A. Petrov (2015), "Mathematical model of salient pole synchronous generator of Mini-CHP", *Inzhenernyy vestnik Dona*, No. 2-2 (36), 33 p. (in Russian)
7. C.M. Shephard (1965), "Design of primary and secondary cells: An equation describing battery discharge", *J. Electrochem. Soc.*, Vol. 112, Issue 3, pp. 252-257.
8. G.A. Sipailov, V.A. Zorin, T.V. Kuznetsova and A.B. Tsukublin (1966), "Some problems of the operation of a low-power synchronous generator with a rectifying load", *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, Vol. 145, No. 23, pp. 140-150. (in Russian)
9. A. Reznik, M. Godoy Simes, Ahmed Al-Durra and S.M. Muyeen (2014), "LCL Filter Design and Performance Analysis for Grid Interconnected Systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 50, Issue 2, pp. 1225-1232.
10. K.H. Gulyamov, A.H. Gulomzoda. Development and investigation of increasing converter of constant voltage. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta)*. 2017. No. 4 (51). P. 55-61.
11. M.Yu. Karelina, I.V. Arifullin, Ph.D., A.V. Terentiev. Analytical determination of weight factors for a multicrystalline estimation of efficiency of automobile vehicles. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta)*. 2018. No. 1 (52). P. 3-9.
12. O.N. Dolina, M.A. Zhidkova, T.A. Shpilkina, E.U. Ahmetzhanova. Implementation of the import substitution policy in the automotive industry. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta)*. 2017. No. 2 (49). P. 22-28.
13. A.V. Puzakov, Ya.Yu. Osaulko. Research of influence of operational factors on the thermal condition of the automotive alternator. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta)*. 2018. No. 1 (52). P. 16-23.
14. C.G. Nadaraia, A.I. Selivanov, I.J. Shestakov, A.A. Fadeev, L.A. Chemical-kinetic energy storage and a gear motor for electric vehicle. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta)*. 2017. No. 1 (48). P. 12-17.
15. A.N. Kozlov. Organization of safe operation of traction lithium-ion battery on the vehicle. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta)*. 2016. No. 1 (44). P. 14-19.
16. T.E. Mel'nikova, S.E. Mel'nikov, V.V. Zavyazkina. Electric vehicles: prospects and ways of development. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta)*. 2019. No. 3 (58). P. 22-26.
17. N.O. Bludyan. Prospects for the development of electric buses. *Vestnik Moskovskogo avtomobil'no-dorozhnogo instituta (gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta)*. 2020. No. 3 (62). P. 19-24.

Information about authors:

Kirill M. Sidorov, associate professor, MADI, Moscow, Russia

Baurzhan K. Ospanbekov, associate professor, MADI, Moscow, Russia

Aleksandr G. Grishchenko, senior lecturer, MADI, Moscow, Russia

Vladimir I. Stroganov, chief of the Department of Electrical Engineering and Electric Equipment, MADI, Moscow, Russia

Vladimir E. Yutt, professor, MADI, Moscow, Russia