

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62-833.6

Анатолий Брониславович Виноградов

Научно-технический центр электропривода «Вектор», доктор технических наук, научный руководитель, Россия, Иваново, телефон (4932) 26-97-08, e-mail: vinorg_ab@mail.ru

Роман Олегович Горелкин

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», аспирант, учебный мастер кафедры ЭПиАПУ, Россия, Иваново, e-mail: roman.gorelkin.96@mail.ru

Автономная станция электроснабжения на основе асинхронного генератора с фазным ротором и преобразователя частоты малой мощности

Авторское резюме

Состояние вопроса. В настоящее время основными вариантами построения высокоэффективных источников 3-фазного напряжения с двигателем внутреннего сгорания в качестве первичного двигателя и изменяемой в функции нагрузки частотой вращения являются асинхронные и синхронные генераторы с двухзвенными преобразователями частоты полной мощности. Требуется разработка и исследование эффективности применения автономной станции электроснабжения с переменной частотой вращения на основе преобразователя частоты малой мощности в целях снижения ее стоимости при наличии возможности экономии топлива двигателя внутреннего сгорания за счет регулирования частоты в функции нагрузки.

Материалы и методы. Описание электростанции и ее системы управления выполнено на структурно-функциональном уровне. Исследование ее характеристик реализовано посредством компьютерного моделирования в программном комплексе Delphi. Для оценки потенциальной топливной эффективности электростанции использована многопараметровая характеристика двигателя внутреннего сгорания ЯМЗ-238.

Результаты. Представлены функциональная схема электростанции, структурная схема системы ее управления без использования датчика скорости. Приведены временные диаграммы моделирования ее работы на несимметричную нагрузку, а также ее энергетические характеристики. Произведена оценка энергетических характеристик и потенциальной возможности экономии топлива ДВС при работе электростанции на симметричную активно-индуктивную нагрузку при условии многократного снижения мощности преобразователя частоты относительно номинальной мощности нагрузки. Показано, что, в отличие от известных аналогов, разработанная электростанция позволяет при ограничении номинальной мощности преобразователя на уровне 20 % от номинальной мощности нагрузки обеспечивать эффективный диапазон регулирования скорости двигателя внутреннего сгорания не менее 2, что создает предпосылки значительной экономии топлива.

Выводы. Использование электростанции в предложенном исполнении позволяет снизить ее стоимость за счет снижения мощности преобразователя и повысить ее энергоэффективность за счет регулирования скорости двигателя внутреннего сгорания при удовлетворительной точности поддержания выходного напряжения в условиях существенно несимметричной нагрузки. Достоверность полученных результатов подтверждена компьютерным моделированием.

Ключевые слова: автономная станция электроснабжения, асинхронный генератор, активный выпрямитель, инвертор напряжения, двигатель внутреннего сгорания

Anatoliy Bronislavovich Vinogradov

Electrical Drive Research and Technical Center “Vector”, Doctor of Engineering Sciences (Post-doctoral degree), Research Supervisor, Russia, Ivanovo, telephone (4932) 26-97-08, e-mail: vinorg_ab@mail.ru

Roman Olegovich Gorelkin

Ivanovo State Power Engineering University, Post-graduate Student, Training Master of Electric Drive and Automation of Industrial Plants Department, Russia, Ivanovo, e-mail: roman.gorelkin.96@mail.ru

Autonomous power supply station based on asynchronous generator with phase rotor and low-power frequency converter

Abstract

Background. Currently, asynchronous and synchronous generators with two-link full power frequency converters are the main options to design highly efficient sources of 3-phase voltage with an internal combustion engine (ICE) as a prime mover and a variable speed as a function of the load. It is required to develop and study the effectiveness of the use of an autonomous power supply station with a variable speed based on a low-power frequency converter to reduce its cost with the possibility of saving ICE fuel by controlling the frequency as a function of the load.

Materials and methods. The description of the power plant and its control system is made at the structural and functional level. The study of its characteristics is carried out by means of computer simulation in the Delphi software package. To assess the potential fuel efficiency of the power plant, a multi-parameter characteristic of the YaMZ-238 internal combustion engine is used.

Results. The functional diagram of the power plant, the structural diagram of its control system without the use of a speed sensor are presented. The time diagrams for modeling work on an asymmetric load and its energy characteristics are given. It is shown that the developed power plant allows to provide an effective ICE speed control range of at least 2 with the limitation of the rated power of the converter at the level of 20 % of the rated power of the load. Thus, it creates the preconditions for significant fuel savings.

Conclusions. The use of the power supply station in the proposed design makes it possible to reduce its cost by reducing the power of the converter and increase its energy efficiency by controlling the speed of ICE with a satisfactory accuracy of the output voltage under conditions of a significantly asymmetric load. The reliability of the results obtained in the study is confirmed by computer simulation.

Key words: autonomous power supply station, asynchronous generator, active rectifier, voltage inverter, internal combustion engine

DOI: 10.17588/2072-2672.2023.3.043-051

Состояние вопроса. Автономные станции электроснабжения (АСЭ) [1–4] широко востребованы как источники электроэнергии на объектах малой и средней мощности, удаленных от централизованных электросетей, в качестве резервных источников электроэнергии на случай временного сбоя в централизованном электроснабжении и в качестве источников энергии мобильной техники. В качестве генераторов, выполняющих электромеханическое преобразование энергии, чаще всего используются электрические машины переменного тока с круговым вращающимся полем: асинхронные либо синхронные. При использовании в качестве первичного источника механической энергии двигателя внутреннего сгорания (ДВС) целесообразным с точки зрения повышения суммарного КПД системы и снижения ее эксплуатационных расходов является применение систем, допускающих работу с переменной частотой вращения ДВС. Это позволяет регулировать скорость генератора в зависимости от мощности нагрузки АСЭ, обеспечивая работу

ДВС на характеристике максимальной топливной эффективности, и за счет этого экономить топливо в условиях сильно изменяющихся нагрузок. Другим важным фактором является стоимость АСЭ. По этому показателю определенное преимущество имеют системы, в которых через полупроводниковый преобразователь передается только часть энергии, циркулирующей между первичным двигателем и нагрузкой. По совокупности обладания двумя вышеуказанными свойствами в качестве одного из наиболее целесообразных вариантов построения АСЭ может быть выбрана электростанция на основе асинхронного генератора с фазным ротором (АГФР).

Построение систем векторного управления асинхронной машиной с фазным ротором (машиной двойного питания, синхронизированной асинхронным генератором) рассмотрено в значительном количестве работ [5–11]. В ряде из них рассматриваются вопросы управления без датчика скорости. При этом чаще всего рассматриваются системы, работающие па-

раллельно с сетью, в частности, применительно к ветрогенераторным установкам, и традиционно мало внимания уделяется рассмотрению работы этих систем на несимметричную нагрузку. По своему исполнению система управления инвертором роторной цепи АСЭ с АГФР существенно отличается от систем управления электростанций, работающих параллельно с сетью, как по набору регулируемых переменных, так и по решаемым задачам. В последних уровень и частота напряжения определяются сетью, а в автономных источниках задача их стабилизации ложится на систему управления инвертором ротора.

Ниже рассматривается один из возможных вариантов построения АСЭ на основе АГФР с управлением от двухзвенного четырехквadrантного преобразователя частоты, построенного на IGBT с ШИМ (рис. 1). Данный вариант построения АСЭ обладает существенными преимуществами относительно других вариантов: с неуправляемым выпрямителем со стороны статорной цепи АГФР; с четырехквadrантными тиристорными преобразователями; с непосредственными или матричными преобразователями частоты. По сравнению с первым из указанных вариантов, рассмотренный ниже имеет более широкий диапазон регулирования частоты вращения генератора как вниз, так и вверх от ее номинального значения и лучший гармонический состав выходного напряжения. По сравнению со вторым вариантом – значительно лучший гармонический состав. По сравнению с третьим – более низкую стоимость, высокую надежность и диапазон воспринимаемых нагрузок, обеспечиваемые за счет меньшего количества силовых ключей и наличия емкости в звене постоянного напряжения преобразователя.

Материалы и методы. Функциональная схема АСЭ (рис. 1) включает: генератор G , приводимый в движение от ДВС; трехфазный мостовой активный выпрямитель (АВ) на IGBT, питаемый с выхода АСЭ; трехфазный мостовой автономный инвертор напряжения (АИН), подключенный к роторной цепи АГФР; звено постоянного напряжения (ЗПТ), содержащее конденсаторы емкостного фильтра и транзисторный ключ управления балластным резистором R_b ; систему управления (СУ) АСЭ; элементы пассивной фильтрации; датчиковую систему, состоящую из трех датчиков выходного напряжения АСЭ (ДН2), датчика напряжения ЗПТ (ДН1), двух датчиков тока на выходе АВ (ДТ1) и либо двух датчиков тока, расположенных на выходе АИН, либо трех датчиков тока, расположенных на выходе статорной цепи генератора (ДТ2); трехфазную четырехпроводную нагрузку. К пассивным фильтрующим элементам схемы относятся: емкость ЗПТ (CDC); емкость C_{f1} , обеспечивающая фильтра-

цию высокочастотных дифференциальных составляющих выходного напряжения АСЭ; емкость C_{f0} , обеспечивающая фильтрацию как дифференциальных, так и нейтральных высокочастотных составляющих выходного напряжения; переменная дифференциально включенная емкость C_{f2} , совместно с C_{f0} и C_{f1} обеспечивающая баланс реактивной мощности системы с учетом индуктивностей АГФР, индуктивности дросселя входной цепи АВ (L_f), реактивных составляющих нагрузки. Заметим, что при ограниченных диапазонах изменения реактивной составляющей нагрузки дополнительно подключаемая к выходу АСЭ емкость C_{f2} может отсутствовать.

На схеме рис. 1 не показаны аккумуляторная батарея 12 (24) В, подключаемая к ЗПТ через отсекающий диод, от которой выполняется запуск АСЭ; обратный диод в схеме чоппера; защитно-коммутационная аппаратура (выходные супрессоры, обеспечивающие аппаратную защиту от кратковременных перенапряжений в дополнение к программной защите, реализуемой в СУ АСЭ); автоматический выключатель, выполняющий функции аппаратной защиты от перегрузок и коротких замыканий в дополнение к соответствующим программным защитами. Также на схеме не показан согласующий трансформатор, который может включаться как в статорную, так и в роторную цепь генератора, в функции которого входит согласование рабочих напряжений статорной и роторной цепей между собой, что обеспечивает минимизацию стоимости силовой части преобразователя пониженной мощности. Функции этого трансформатора может выполнять сам генератор, обмоточные данные которого специальным образом согласованы при проектировании. Балластный резистор и управляющий им ключ могут использоваться в системе опционально и при наличии такой необходимости обеспечивать дополнительную защиту полупроводников инвертора и выпрямителя от перенапряжений, а также создавать минимальную нормированную нагрузку в режиме холостого хода АСЭ.

Структурная схема системы управления АСЭ (рис. 2) включает в себя системы управления АВ и АИН, а также наблюдатель состояния (НС) АСЭ, вычисляющий все необходимые для ее работы переменные по информации с датчиков токов и напряжений. В качестве дополнительной может использоваться информация о скорости ДВС. Двухканальная система векторного управления АВ [12] выполнена на основе принципов подчиненного регулирования и включает в себя регуляторы активной (R_{ix}) и реактивной (R_{iy}) составляющих входного тока АВ в ортогональной системе координат, ориентированной по вектору выходного напряжения АСЭ.

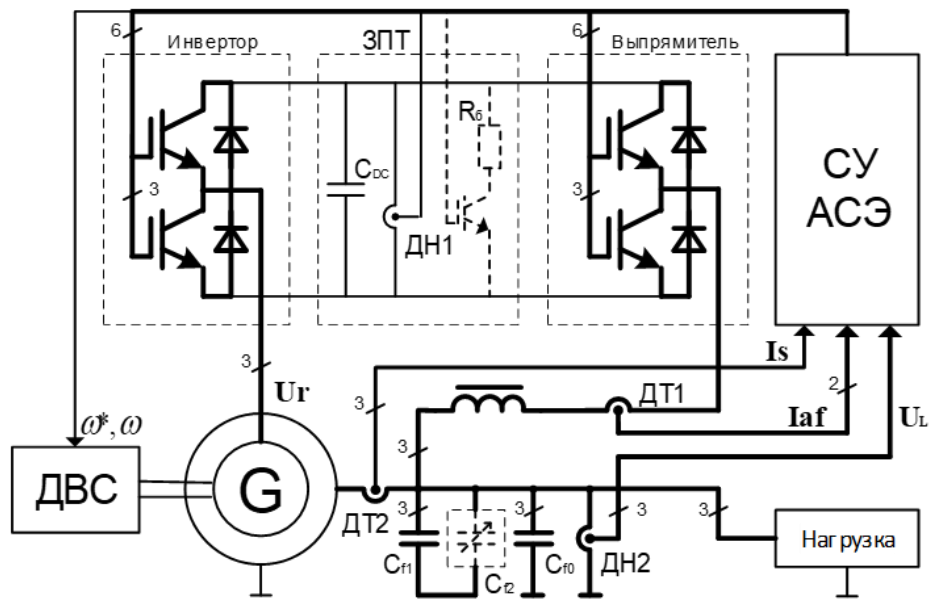


Рис. 1. Функциональная схема АСЭ

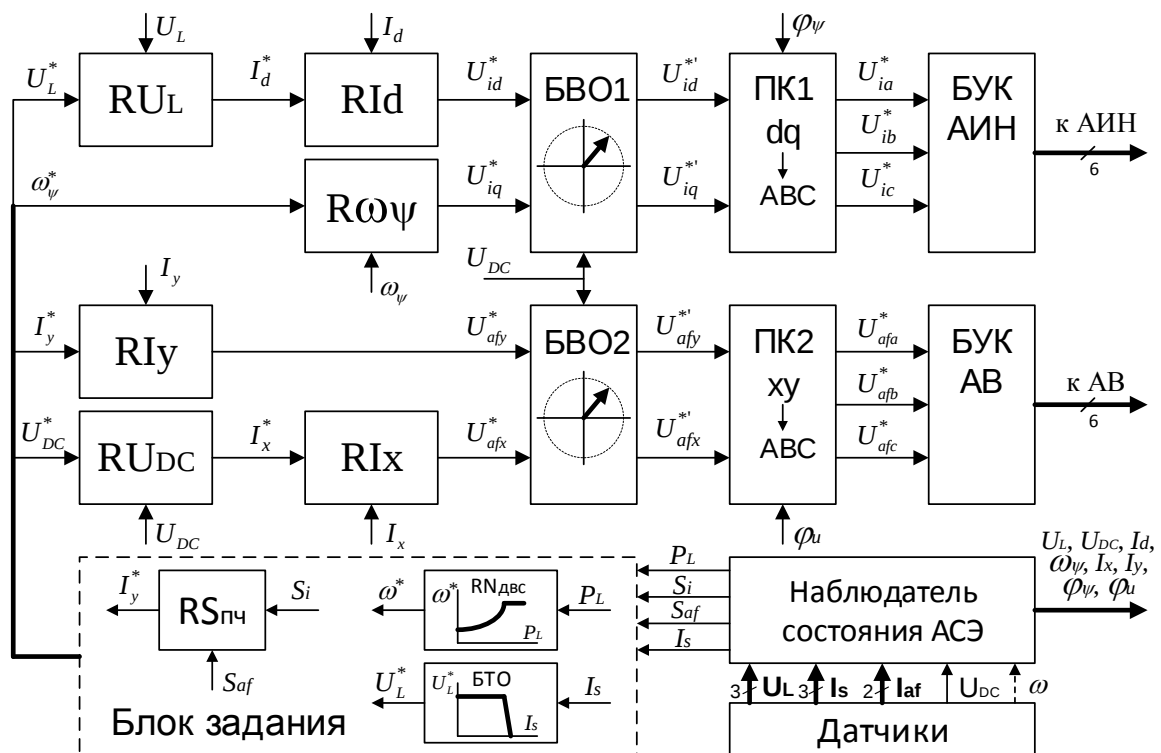


Рис. 2. Структурная схема системы управления АСЭ

Внешним по отношению к контуру регулирования активной составляющей тока АВ является контур регулирования напряжения ЗПТ с регулятором RU_{DC} . Двухканальная система векторного управления АИН роторной цепи включает в себя канал регулирования выходного напряжения АСЭ (напряжения на нагрузке) с регулятором напряжения RU_L и регулятором реактивной составляющей тока ротора RId , а

также канал регулирования частоты выходного напряжения с регулятором частоты $R\omega_\psi$.

Ориентация всех векторных переменных системы управления АИН роторной цепи производится в ортогональной системе координат, жестко связанной с вектором потокосцепления статора АГФР. Компоненты векторов заданных напряжений АИН и АВ в ортогональных вращающихся системах координат ограничиваются в блоках векторного ограничения БВО1 и БВО2 с

учетом напряжения ЗПТ, преобразуются в координатных преобразователях ПК1 и ПК2 в естественную 3-фазную неподвижную относительно статора АГФР систему координат ABC. Далее в блоках управления ключами БУК АИН и БУК АВ происходит формирование импульсов управления всеми 12 транзисторами преобразователя согласно синусоидальному закону формирования 3-фазной ШИМ.

Математическое описание вышеуказанных блоков системы управления АСЭ и методы синтеза регуляторов представлены в [12]. Синтез регуляторов системы управления АИН и АВ выполнен в рамках теории систем подчиненного регулирования путем настройки контуров регулирования переменных на оптимальные процессы соответствующего порядка с учетом схемной линеаризации этих контуров и их упрощенного описания в виде инерционных звеньев первого порядка. С точки зрения повышения помехоустойчивости датчиковой системы и учитывая, что ориентация векторных переменных АГФР выполняется по потокосцеплению статора, целесообразно контролировать токи генератора посредством установки датчиков в его статорную цепь, а токи ротора рассчитывать в наблюдателе состояния по параметрам системы. Это дополнительно обеспечивает возможность вычисления и контроля тока нейтрального провода АСЭ. Заданные значения переменных на входах регуляторов формируются в блоке задания с учетом реализации функций токоограничения, минимизации потерь в системе ДВС–АСЭ и равномерного распределения мощности между инвертором и выпрямителем.

Наблюдатель состояния АСЭ построен на основе хорошо известного математического описания асинхронной машины в виде системы дифференциальных уравнений Парка-Горева, представленной, например, в [13, 14], дополнительно учитывающей нелинейность цепи намагничивания и при необходимости исследования энергетических характеристик системы процессы в стали магнитопровода [12]. Оценка потокосцепления статора выполняется на основе векторного уравнения статорной цепи генератора в неподвижной относительно статора ортогональной системе координат по напряжениям и токам, полученным из их фазных значений в преобразователе координат $ПК\ ABC \rightarrow \alpha\beta$. Частота выходного напряжения определяется по частоте вращения поля генератора, вычисляемой как отношение модулей векторов ЭДС статора и потокосцепления статора. Известная проблема введения начальных условий и стабилизации выходов интеграторов, вычисляющих компоненты вектора потокосцепления, решается с помощью корректирующей обратной связи, компенсирующей влияние сигнальных и пара-

метрических возмущений на точность вычисления потока и частоты. Средствами математического моделирования была проанализирована эффективность различных методов формирования корректирующих сигналов и по критерию минимизации отклонений оценок потокосцепления и частоты от введения тестового возмущения в ЭДС статора в качестве базовой принята коррекция выходов интеграторов на основе введения отрицательной обратной связи по оценкам средних за период основной гармоники компонент вектора потокосцепления. Коэффициент данной связи устанавливается экспериментально по результатам математического моделирования либо в процессе настройки системы управления по вышеуказанному критерию.

Результаты. Моделирование АСЭ выполнено в среде Delphi. При моделировании процессов в статических и динамических режимах работы АСЭ учитывались алгоритмы переключения ключей инвертора и выпрямителя, эффект насыщения магнитной системы генератора. Учет динамики ДВС выполнялся с помощью инерционного звена 1-го порядка на основе данных натурного эксперимента. В качестве генератора использовалась асинхронная машина с фазным ротором 5АНК250МВ4 со следующими параметрами: $U_{\text{ном}} = 380/220\text{ В}$; $I_{\text{ном}} = 205\text{ А}$; $f_{\text{ном}} = 50\text{ Гц}$; КПД = 94 %; $\cos(\varphi) = 0,87$; $L_{\text{с}} = 0,0002\text{ Гн}$; $L_{\text{р}} = 0,00023\text{ Гн}$; $L_{\text{м0}} = 0,0145\text{ Гн}$; $L_{\text{mn}} = 0,0076\text{ Гн}$; $R_{\text{с20}} = 0,0132\text{ Ом}$; $R_{\text{р20}} = 0,026\text{ Ом}$; $Z_p = 2$; $J = 2\text{ кгм}^2$, где $L_{\text{с}}$, $L_{\text{р}}$, $L_{\text{м0}}$, L_{mn} – индуктивности рассеяния статора, ротора, взаимная в режиме XX и номинальном. При оценке энергетических характеристик АСЭ учитывались также потери в стали, механические и добавочные потери асинхронной машины, КПД инвертора и выпрямителя, полученные в ходе обработки данных автономных стендовых испытаний элементов АСЭ.

На рис. 3 изображены временные диаграммы выходных напряжений (а), токов нагрузки (б), напряжения ЗПТ (в), токов статора АГФР для фаз А и В (г) в режиме ступенчатого подключения и отключения нагрузки фазы А в диапазоне (0,1...1) от ее номинального значения.

Интегральная оценка величины искажений, вызываемых несимметричной нагрузкой в выходных напряжениях АСЭ, может быть выполнена по относительному значению максимального отклонения модуля выходного напряжения от его номинального значения. В частности, в установившемся режиме работы АСЭ, когда одна из ее фаз нагружена номинальной мощностью, а две остальные – 10 %-й нагрузкой, этот показатель составил 4,8 %, что соответствует колебаниям модуля выходного напряжения АСЭ в пределах $\pm 15\text{ В}$ от его номинального значения.

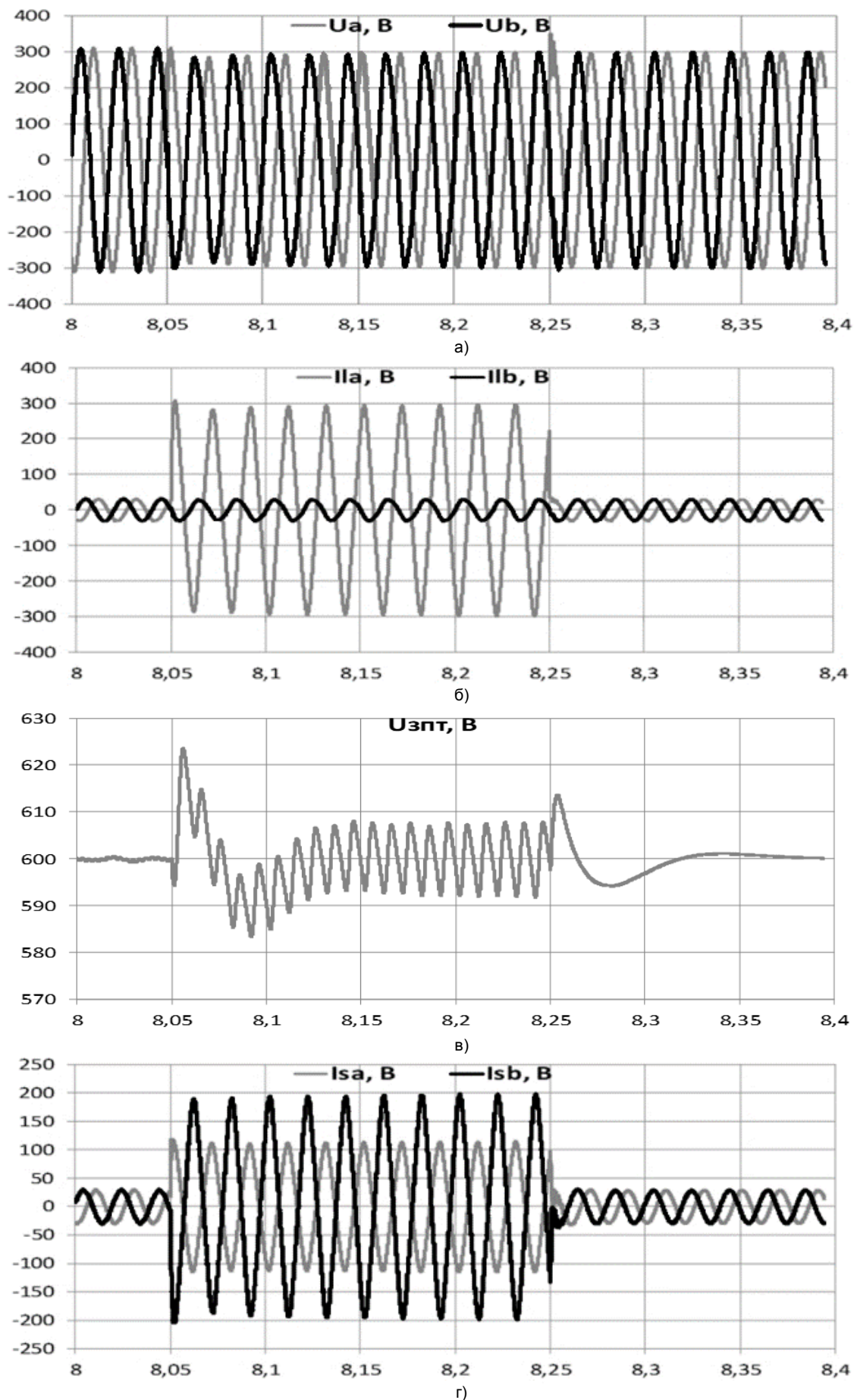


Рис. 3. Временные диаграммы включения несимметричной линейной нагрузки

На рис. 4,а представлены зависимости полных мощностей преобразователя частоты $S_{пч}$ и нагрузки $S_{нагр}$, тока статора генератора и КПД АСЭ от частоты вращения генератора (в относительных единицах). На рис. 4,б – зависимости полных мощностей нагрузки при различных коэффициентах мощности: $K_m = 1,0; 0,9; 0,8$. Зависимости получены для предельных длительных режимов работы АСЭ при ограничении по номинальному току статора генератора и номинальной мощности преобразователей (активного выпрямителя и инвертора), ограниченных на уровне 20 % от номинальной мощности нагрузки. В качестве базового принят номинальный режим работы АСЭ, характеризуемый номинальными значениями мощности преобразователя и тока генератора при симметричной RL-нагрузке с коэффициентом мощности $K_m = 0,9$. Абсолютные значения параметров номинального режима работы АСЭ при указанных ограничениях следующие: $N = 1855$ об/мин; $S_{нагр} = 181$ кВА; $S_{пч} = 35$ кВА; $I_s = 205$ А; $\text{КПД}_{асэ} = 94,3$ %; $R_{нагр} = 0,7227$ Ом; $L_{нагр} = 1,114$ мГн.

Суммарная дифференциальная емкость на выходе АСЭ $C_f = C_{f1} + C_{f2} + C_{f0}$ принята постоянной. Ее значение установлено таким образом, что в режиме холостого хода (ХХ) АСЭ она полностью обеспечивает генератор реактивной мощностью, необходимой для его возбуждения. Эта емкость может быть рассчитана по формуле

$$C_f = I_{mnom} / (2pf_{snom}U_{snom}), \quad (1)$$

где I_{mnom} – номинальный ток цепи намагничивания АГФР.

В этом случае в режиме ХХ и при чисто активной нагрузке реактивная мощность, циркулирующая в преобразователях, близка к нулю, а их полные мощности в основном определяются активными составляющими, которые с точностью до малых значений собственных потерь в преобразователях близки друг к другу. В случае присутствия в нагрузке АСЭ реактивной составляющей индуктивного характера баланс реактивной мощности уже не может быть обеспечен только за счет емкости C_f и дополнительная реактивная мощность начинает циркулировать че-

рез преобразователи и емкость ЗПТ. В этом случае минимизация мощности преобразователя частоты обеспечивается выравниванием полных мощностей АВ и АИН посредством регулятора мощности ПЧ ($RS_{пч}$) (рис. 2), формирующего задание по реактивному току АВ.

Оптимизация энергетических показателей системы ДВС–АСЭ с учетом потерь в ДВС выполняется за счет регулирования его частоты вращения в функции мощности нагрузки регулятором скорости дизеля ($RN_{двс}$) (рис. 2). Определяемая регулятором зависимость заданной скорости ДВС от текущего значения мощности нагрузки формируется по характеристике максимальной топливной эффективности (минимальных потерь) ДВС с учетом предельных зависимостей АСЭ (рис. 4) и того факта, что собственное КПД АСЭ относительно высоко и слабо изменяется в зависимости от скорости. При этом важное значение имеет согласование параметров (скорости и мощности) номинального режима АСЭ с характеристикой ДВС. Значение скорости, при которой АСЭ способно передавать в нагрузку максимальную мощность в длительном режиме, зависит не только от номинальной частоты вращения АГФР, но и от ограничения, накладываемого на мощность ПЧ. Она выбирается на стадии проектирования АСЭ и согласуется с характеристикой ДВС.

Оценку эффективности регулирования скорости дизель-генераторной установки в зависимости от нагрузки АСЭ можно выполнить по многопараметровой характеристике ДВС (рис. 5). В частности, для дизеля из серии ЯМЗ-238 при средней мощности нагрузки 75 кВт относительный перерасход топлива при работе на постоянной скорости 1850 об/мин относительно работы на характеристике с максимальной топливной интенсивностью со скоростью 1000 об/мин составляет

$$\delta g = \frac{g_{enom75} - g_{eopt75}}{g_{eopt75}} = \frac{258 - 214}{214} = 0,206,$$

где g_{enom75} , g_{eopt75} – удельный расход топлива при работе ДВС с мощностью 75 кВт на номинальной и оптимальной по топливной эффективности скоростях.

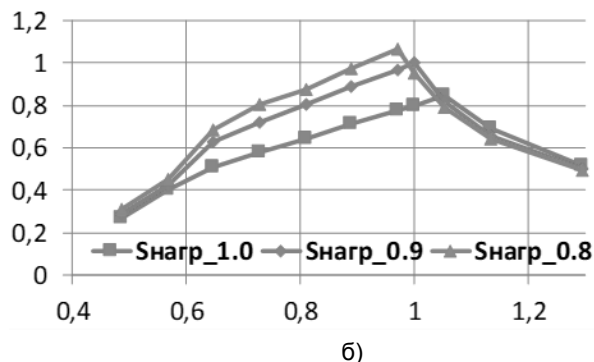
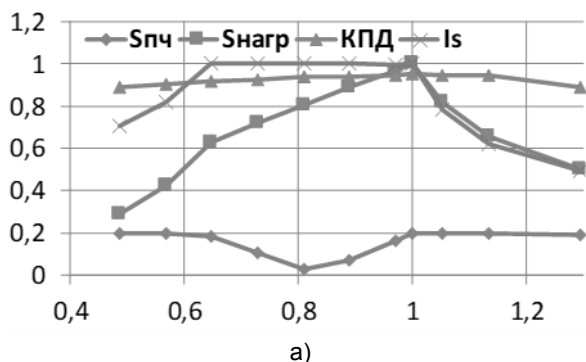


Рис. 4. Энергетические характеристики АСЭ при линейной симметричной активно-индуктивной нагрузке

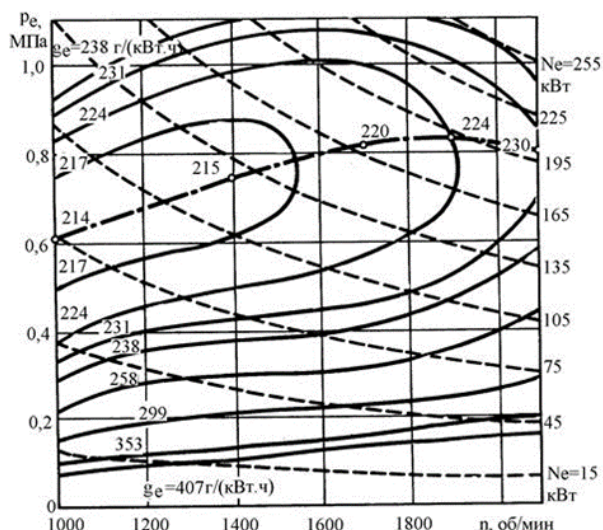


Рис. 5. Многопараметровая характеристика дизеля ЯМЗ-238: N_e – мощность дизеля, кВт; n – скорость дизеля, об/мин; g_e – удельный расход топлива, г/кВт·ч; p_e – среднее эффективное давление на поршень, МПа

Таким образом, если средняя мощность нагрузки не превышает 50 % от номинальной мощности ДВС, то экономия топлива за счет регулирования скорости в зависимости от нагрузки в соответствии с характеристикой максимальной топливной эффективности может составлять до 20 %, по сравнению с работой на постоянной скорости, соответствующей номинальному режиму электростанции. При длительной работе АСЭ в режимах малых нагрузок экономия топлива за счет регулирования скорости может быть существенно выше.

Защита АСЭ от токовых перегрузок осуществляется путем снижения выходного напряжения АИН в блоке токоограничения (БТО) (рис. 2). Защита от коротких замыканий – временной блокировкой силовых ключей преобразователя с автоматическим возвратом в рабочий режим при пропадании замыкания.

В ходе моделирования были определены рациональные значения всех пассивных фильтрующих элементов, входящих в состав АСЭ. Емкость ЗПТ выбирается по условию ограничения на желаемом уровне величины пульсаций в предельных динамических и несимметричных режимах работы АСЭ, индуктивность входного дросселя АВ – по заданной величине высокочастотных (на частоте ШИМ) пульсаций его входных токов. Нейтральная, она же минимальная дифференциальная выходная емкость АСЭ (C_{f0}) выбирается по желаемой величине высокочастотных пульсаций выходного напряжения, суммарная дифференциальная выходная емкость (C_f) – исходя из реактивной мощности, необходимой для возбуждения генератора. Следует заметить, что при чисто активной нагрузке и близких к единице коэффициентах мощности нагрузки

АСЭ удовлетворительно работает при условии $C_f = C_{f0}$. При выше-указанных параметрах АГФР и частоте ШИМ 5...10 кГц значение этой емкости может быть относительно небольшим: 20...50 мкФ. В этом случае реактивная мощность, необходимая для возбуждения АДФР, в основном обеспечивается емкостью ЗПТ. Однако при снижении коэффициента мощности нагрузки в АСЭ возбуждаются автоколебания, в дальнейшем приводящие к неработоспособности и являющиеся следствием отсутствия установившегося баланса реактивной мощности системы. Для устранения данного эффекта емкость C_f увеличивается до значения, определяемого (1).

Выводы. Анализ данных, полученных в результате проведенных исследований, позволяет сделать следующие выводы, подтверждающие достижение поставленной цели:

- разработанная АСЭ на основе АГФР с преобразователем частоты пониженной мощности обеспечивает возможность построения высокоэффективного и относительно недорогого источника 3-фазного переменного напряжения, способного работать в широком диапазоне нагрузок, в том числе с низким коэффициентом мощности и в условиях максимальной асимметрии по фазам, мощность которых во много раз превышает установленную мощность преобразователя частоты;

- при ограничении номинальной мощности преобразователя до 20 % от номинальной мощности нагрузки эффективный диапазон регулирования скорости ДВС, обеспечивающий повышение энергоэффективности АСЭ и, как следствие, значительную экономию топлива, составляет не менее 2. При необходимости он может быть расширен за счет увеличения мощности, т.е. стоимости преобразовательной части АСЭ.

Список литературы

1. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н. Системы автономного электроснабжения / под ред. Н.И. Богатырева. – Краснодар, 2001. – 333 с.
2. Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев, И.С. Поляков. – Н. Новгород: Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева, 2016. – 172 с.
3. Управление станцией автономного электроснабжения в составе транспортного средства / А.Б. Виноградов, Д.Б. Изосимов, С.Н. Флоренцев, А.А. Коротков // Электричество. – 2009. – № 9. – С. 49–55.
4. Виноградов А.Б. Автономная станция электроснабжения на основе асинхронного генератора с КЗ ротором и преобразователя частоты пониженной мощности // Труды XI Междунар. (XXII Всерос.) конф. по автоматизированному электроприводу (АЭП-2020), Санкт-Петербург, 4–7 октября 2020 г. – СПб., 2020. – С. 80–86.

5. Гуляев И.В., Тутаев Г.М. Системы векторного управления электроприводом на основе асинхронизированного вентильного двигателя. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2010. – 200 с.

6. Мещеряков В.Н., Муравьев А.А. Асинхронный генератор на базе машины двойного питания // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2016. – № 4. – С. 45–49.

7. Мещеряков В.Н., Безденежных Д.В. Наблюдатель потокоцепления для машины двойного питания, управляемой по статорной и роторной цепям // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – № 11. – С. 170–173.

8. Datta R., Ranganathan V.T. Direct Power Control of Grid-connected Wound Rotor Induction Machine Without Rotor Position Sensors // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2001. – Vol. 16, issue 3. – P. 390–399.

9. Drid S., Tadjine M., Nait-Said M-S. Nonlinear Feedback Control and Torque Optimization of a Doubly Fed Induction Motor // Journal of ELECTRICAL ENGINEERING. – 2005. – No. 3–4, vol. 56. – P. 57–63.

10. Peresada S., Tilli A., Tonielli A. Power Control of a Doubly Fed Induction Machine via Output Feedback // Control Engineering Practice. – 2004. – No. 12. – P. 41–57.

11. Poddar G., Ranganathan V.T. Direct Torque and Frequency Control of Double-Inverter-Fed Slip-Ring Induction Motor Drive // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2004. – No. 6, vol. 51. – P. 1329–1337.

12. Виноградов А.Б. Векторное управление электроприводами переменного тока. – Иваново, 2008. – 318 с.

13. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – М.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

14. Шрейнер Р.Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. – Екатеринбург: УРО РАН, 2000. – 654 с.

References

1. Grigorash, O.V., Bogatyrev, N.I., Kurzin, N.N. *Sistemy avtonomnogo elektrosnabzheniya* [Autonomous power supply systems]. Krasnodar, 2001. 333 p.

2. Khvatov, O.S., Dar'nikov, A.B., Samoyavchev, I.S., Polyakov, I.S. *Avtonomnye generatorye ustanovki na osnove dvigateley vnutrennego sgoraniya peremennoy chastoty vrashcheniya* [Autonomous generator sets based on variable speed internal combustion engines]. Nizhniy Novgorod: Nizhegorodskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiiy universitet im. R.E. Alekseeva, 2016. 172 p.

3. Vinogradov, A.B., Izosimov, D.B., Florentsev, S.N., Korotkov, A.A. *Upravlenie stantsiey avtonomnogo elektrosnabzheniya v sostave transportnogo sredstva* [Control of an autonomous power supply station as part of a vehicle].

Elektrichestvo, 2009, no. 9, pp. 49–55.

4. Vinogradov, A.B. *Avtonomnaya stantsiya elektrosnabzheniya na osnove asinkhronnogo generatorya s KZ rotorom i preobrazovatelya chastoty ponizhennoy moshchnosti* [Autonomous power supply station based on an asynchronous generator with a short-circuit rotor and a low power frequency converter]. *Trudy XI Mezhdunarodnoy (XXII Vserossiyskoy) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP-2020)*, Sankt-Peterburg, 4–7 oktyabrya 2020 g. [XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), Sankt-Peterburg, 2020, 04–07 Oct.]. Saint-Petersburg, 2020, pp. 80–86.

5. Gulyaev, I.V., Tutaev, G.M. *Sistemy vektornogo upravleniya elektroprivodom na osnove asinkhronizirovannogo ventily'nogo dvigatelya* [Electric drive vector control systems based on asynchronized brushless motor]. Saransk: Izdatel'stvo Mordovskogo universiteta, 2010. 200 p.

6. Meshcheryakov, V.N., Murav'ev, A.A. *Asinkhronnyy generator na baze mashiny dvoynogo pitaniya* [Asynchronous generator based on dual-feed machine]. *Izvestiya SPbGETU «LETI»*, 2016, no. 4, pp. 45–49.

7. Meshcheryakov, V.N., Bezdenzhnykh, D.V. *Nablyudatel' potokostsepleniya dlya mashiny dvoynogo pitaniya, upravlyаемой по статорной и роторной тсепям* [Flux linkage observer for a dual-feed machine controlled by stator and rotor circuits]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2010, no. 11, pp. 170–173.

8. Datta, R., Ranganathan, V.T. Direct Power Control of Grid-connected Wound Rotor Induction Machine Without Rotor Position Sensors. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2001, vol. 16, issue 3, pp. 390–399.

9. Drid, S., Tadjine, M., Nait-Said, M-S. Nonlinear Feedback Control and Torque Optimization of a Doubly Fed Induction Motor. *Journal of ELECTRICAL ENGINEERING*, 2005, no. 3–4, vol. 56, pp. 57–63.

10. Peresada, S., Tilli, A., Tonielli, A. Power Control of a Doubly Fed Induction Machine via Output Feedback. *Control Engineering Practice*, 2004, no. 12, pp. 41–57.

11. Poddar, G., Ranganathan, V.T. Direct Torque and Frequency Control of Double-Inverter-Fed Slip-Ring Induction Motor Drive. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2004, no. 6, vol. 51, pp. 1329–1337.

12. Vinogradov, A.B. *Vektornoe upravlenie elektroprivodami peremennogo toka* [Vector Control of AC Electrical Drives]. Ivanovo, 2008. 320 p.

13. Kovach, K.P., Rats, I. *Perekhodnye protsessy v mashinakh peremennogo toka* [Transient processes in AC machines]. Moscow: Gosenergoizdat, 1963. 744 p.

14. Shreyner, R.T. *Matematicheskoe modelirovaniye elektroprivodov peremennogo toka s poluprovodnikovymi preobrazovatelyami chastoty* [Mathematical modeling of AC electric drives with semiconductor frequency converters]. Ekaterinburg: URO RAN, 2000. 654 p.