

EDN: OYUFYE

УДК 621.3.072

Excitation Control System Valve-Inductor Generator as Composition of a Diesel Generator Set with Variable Rotational Frequency

Vasily I. Panteleev,
Roman A. Petukhov and Yevgeniya Yu. Sizganova*
*Siberian Federal University
Krasnoyarsk, Russian Federation*

Received 10.04.2024, received in revised form 10.05.2024, accepted 07.06.2024

Abstract. The paper discusses a new solution for organizing locally isolated energy systems – creating generators that adapt to changing conditions in terms of load and energy source. It is noted that an important link of the system under consideration is a valve-inductor generator, which has the ability to provide stable values of rectified voltage and efficiency, while changing the values of power, torque and speed of the generator in a wide range. Technical solutions of generator excitation unit operation providing power output to the isolated network at variable speed are analyzed. Justification of the choice of the generator excitation unit circuit and development of the circuit diagram for controlling the excitation of a valve-inductor generator are carried out. Different modes of operation of the generator excitation unit are described and modeled from the moment of start-up to the nominal speed of the internal combustion engine. It is concluded that the developed generator excitation unit meets all the necessary requirements and is suitable for use in a variable speed diesel generator set with a valve-inductor generator.

Keywords: valve-inductor generator, diesel-generator set, variable speed, generator excitation unit, PWM-controller.

Citation: Panteleev V. I., Petukhov R. A., Sizganova Y. Yu. Excitation control system valve-inductor generator as composition of a diesel generator set with variable rotational frequency. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2024, 17(4), 505–514. EDN: OYUFYE



Система управления возбуждением вентильно-индукторного генератора в составе дизель-генераторной установки с переменной частотой вращения

В. И. Пантелеев, Р. А. Петухов, Е. Ю. Сизганова
*Сибирский федеральный университет
Российская Федерация, Красноярск*

Аннотация. В статье рассматривается новое решение по организации локально-изолированных энергетических систем – создание генераторов, адаптирующихся к изменяемым условиям по нагрузке и источнику энергии. Отмечается, что важным звеном рассматриваемой системы является вентильно-индукторный генератор, обладающий способностью обеспечить стабильные значения выпрямленного напряжения и КПД при изменении значений мощности, момента и частоты вращения генератора в широком диапазоне. Анализируются технические решения работы блока возбуждения генератора, обеспечивающие выдачу мощности в изолированную сеть при изменяемой частоте вращения. Проводятся обоснование выбора схемы блока возбуждения генератора и разработка принципиальной схемы управления возбуждением вентильно-индукторного генератора. Описываются и моделируются разные режимы работы блока возбуждения генератора от момента запуска до набора номинальных оборотов двигателя внутреннего сгорания. Делается вывод, что разработанный блок возбуждения генератора отвечает всем необходимым требованиям и пригоден для применения в дизель-генераторной установке переменной частоты вращения с вентильно-индукторным генератором.

Ключевые слова: вентильно-индукторный генератор, дизель-генераторная установка, переменная частота вращения, блок возбуждения генератора, ШИМ-контроллер.

Цитирование: Пантелеев В. И. Система управления возбуждением вентильно-индукторного генератора в составе дизель-генераторной установки с переменной частотой вращения / В. И. Пантелеев, Р. А. Петухов, Е. Ю. Сизганова // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2024, 17(4). С. 505–514. EDN: OYUFYE

Введение

Поле внедрения современных и перспективных систем традиционно является малая энергетика как область, где с целью дальнейшего распространения в большую энергетику осуществляется опытная и опытно-промышленная эксплуатация современных генерирующих систем. В локально-изолированных системах, удаленных от централизованного энергоснабжения или имеющих слабую связь с энергосистемой, наличие современных (адаптивных) генерирующих устройств особенно актуально [1]. Важным звеном рассматриваемой системы является вентильно-индукторный генератор (ВИГ), обладающий рядом очень полезных свойств, важнейшим из которых является способность обеспечить стабильные значения выпрямленного напряжения и КПД при изменении значений мощности, момента и частоты вращения генератора в широком диапазоне. Индукторные генераторы в качестве источника питания имеют ряд преимуществ перед классическими синхронными. Однако в большей степени это проявляется при использовании индукторного генератора в составе дизель-генераторной установки (ДГУ) переменной частоты вращения (ПЧВ). Индукторный генератор проще в производстве и значи-

тельно надежнее в эксплуатации из-за отсутствия обмоток на вращающейся части; индукторный генератор может иметь высокий КПД вследствие меньшей мощности возбуждения.

Существует ряд технических решений, обеспечивающих выдачу мощности в изолированную сеть при изменяемой частоте вращения. Применяемые на сегодняшний день системы, как правило, сводятся к двум основным принципиальным электрическим схемам, использующим силовой преобразователь для питания обмоток ротора электрической машины либо силовой преобразователь в цепи обмоток статора электрической машины. Первая схема подразумевает использование асинхронизированного генератора – машины двойного питания. Машина двойного питания – синхронная машина, имеющая раздельное питание обмоток статора и ротора, при этом сумма (разность) частот тока питания кратна частоте вращения вала. При использовании электрической машины такого типа обмотки ротора запитываются от силового преобразователя током регулируемой частоты и амплитуды, обеспечивая управление активной и реактивной мощностью независимо от скорости вращения машины. Преимущества таких систем в отсутствии необходимости преобразования всей энергии машины при небольшой разности электрической частоты генератора и сети. Однако при разности частоты 30–40 % от номинальной ток ротора, необходимый для регулирования машины, достигает величин токов статора. Применение таких систем при глубоком регулировании частоты становится неэффективным из-за чрезвычайно высокой сложности (и стоимости) такой электрической машины и необходимости применять преобразователь высокой мощности.

Второй способ предусматривает использование электрической машины в качестве источника энергии, формирующего напряжение для силового преобразователя, установленного в цепи статора. В этом случае задача силового преобразователя – формирование потока мощности в соответствии с параметрами сети. Недостатком такой системы можно считать необходимость применения преобразователя, обеспечивающего формирование тока, равного току статора (полному току электрической машины). При использовании такой схемы вся энергия генератора преобразуется силовой системой в форму, подходящую для выдачи в изолированную энергосистему. Преимущество такой схемы в том, что она может быть использована фактически с любой электрической машиной, может обеспечить значительно больший диапазон регулирования по скорости в широком диапазоне частот вращения при применении специальных схем преобразования. При использовании преобразователя появляется возможность значительно упростить конструкцию электрической машины, использовать электрические машины без обмоток на роторе, снижая стоимость и повышая надежность электрической машины. Снятие ограничений на выходной сигнал генератора позволяет перейти к более высоким частотам вращения и частотам на выходе электрических машин.

Перечисленные преимущества при применении в схемах с преобразователем в цепи статора имеют индукторные генераторы с обмоткой возбуждения, установленной на статоре. Вентильные машины такого типа способны формировать постоянный ток с низкими пульсациями для использования силовыми преобразователями за счет многофазности, высокой частоты на выходе. Низкие токи короткого замыкания, в сравнении с классическими синхронными машинами, обеспечивают отсутствие масштабных повреждений оборудования при коротких замыканиях. Регулирование тока возбуждения позволяет обеспечить управляемость и стабилизацию параметров выходного напряжения при изменении скорости вращения.

Возникает необходимость разработки блока возбуждения генератора (БВГ), обеспечивающего регулирование тока в обмотке возбуждения генератора в соответствии с сигналом управления, поступающим от главного блока управления в любых режимах работы генератора, начальное возбуждение генератора до заданной уставки, работу в объединённой и автономной системах с нагрузками от холостого хода до номинальной, с поддержанием заданного уровня напряжения на шине постоянного тока, форсировку возбуждения при снижении напряжения на шинах генератора.

Система выдачи мощности в изолированную систему (рис. 1) состоит из [2]

- 1) диодного выпрямителя;
- 2) системы возбуждения;
- 3) силового преобразователя (инвертора с фильтром гармоник электрического сигнала).

В рассматриваемой схеме (рис. 1) ДГУ ПЧВ используется ВИГ марки ГВИТ210–2100, разработанный ОАО «ЭКБ». Ток возбуждения ГВИТ210–2100 может изменяться в диапазоне от 2 до 20 А. Параметры обмотки возбуждения (ОВ): индуктивность – 6,6 Гн, активное сопротивление – 4,8 Ом.

Напряжение питания на БВГ поступает с выхода выпрямителя, величина которого может изменяться при изменении нагрузки и числа оборотов дизельного двигателя. Номинальное значение этого напряжения должно составлять 0,9–0,95 от амплитудного значения выходного напряжения инвертора $U_{\text{овн}} = 0,95 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{\text{вых}} = 1,34 \cdot 380 = 511 \text{ В}$.

Необходимо также учитывать, что в переходных режимах напряжение на выходе выпрямителя (ПЧ) может превышать это значение и достигать амплитудного значения $U_{\text{овн}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{вых}} = 537 \text{ В}$. При выборе силовых транзисторов учитываем данное напряжение.

Второй фактор, который следует учесть, это режим запуска ДГУ ПЧВ. При пуске напряжение на выходе выпрямителя отсутствует, и питание БВГ должно осуществляться от автономного источника питания. В качестве такого источника целесообразно использовать аккумулятор, от которого производится пуск дизельного двигателя. При появлении напряжения достаточной величины на выходе выпрямителя преобразователя частоты (ПЧ) питание БВГ должно переключаться на него. Для пуска дизельных двигателей обычно используются аккумуляторы напряжением 24 В. Таким образом, БВГ должен работать от двух, существенно отличающихся по величине напряжений питания 24 В и 511 В. Длительность работы от аккумулятора должна

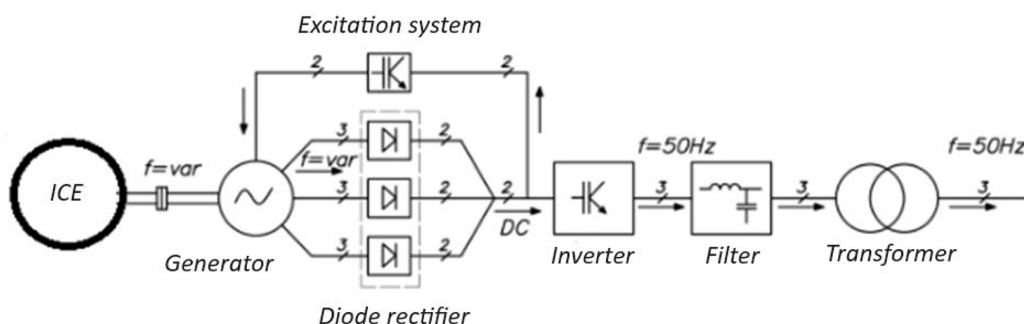


Рис. 1. Схема дизель-генераторной установки с переменной частотой вращения

Fig. 1. Scheme diesel-generator set with variable rotational frequency

быть ограничена. Если в течение стартового периода напряжение на выходе выпрямителя ПЧ не достигает минимально допустимого значения, БВГ должен отключиться и войти в состояние блокировки. Для снятия блокировки необходимо кратковременно отключить напряжение аккумулятора.

Выбор схемы блока возбуждения генератора

На основании вышеизложенного сформулируем основные параметры и требования к БВГ:

- основное напряжение питания – 300 В – 511 В;
- стартовое напряжение питания – 24 В;
- максимальный ток обмотки возбуждения (ОВ) – 20 А;
- максимальная длительность работы от стартового напряжения – 5 с;
- сигнал управления током ОВ аналоговый, напряжением в пределах 0–5 В;
- гальваническая изоляция БВГ от силовой части ПЧ, его системы управления и ОВ.

БВГ может быть построен по различным топологиям, однако на основании сведений, приведенных выше, наиболее целесообразным представляется выбор однотактового прямоходового (*forward*) импульсного регулятора тока [3]. Известно несколько вариантов таких регуляторов [4, 5]. Наиболее простые однотранзисторные схемы не могут быть использованы в данном БВГ поскольку у них на этапе перемагничивания магнитопровода трансформатора напряжение на запертом ключе может достигать удвоенного напряжения питания (в нашем случае более 1000 В), а с учетом высокочастотных выбросов, обусловленных индуктивностью рассеяния трансформатора, еще выше. Это затрудняет выбор силового транзистора, поскольку наиболее распространенные мощные MOSFET транзисторы имеют предельно допустимое напряжение сток-исток 600–900В.

Поэтому для БВГ выбираем двухтранзисторный «*forward*» регулятор, известный под названием «*косой мост*», силовая часть которого представлена на рис. 2.

В нашем случае под индуктивностью L_f следует понимать индуктивность ОВ, а под R_{load} – ее активное сопротивление. Конденсатор фильтра C_{out} отсутствует. Достоинством этой схемы

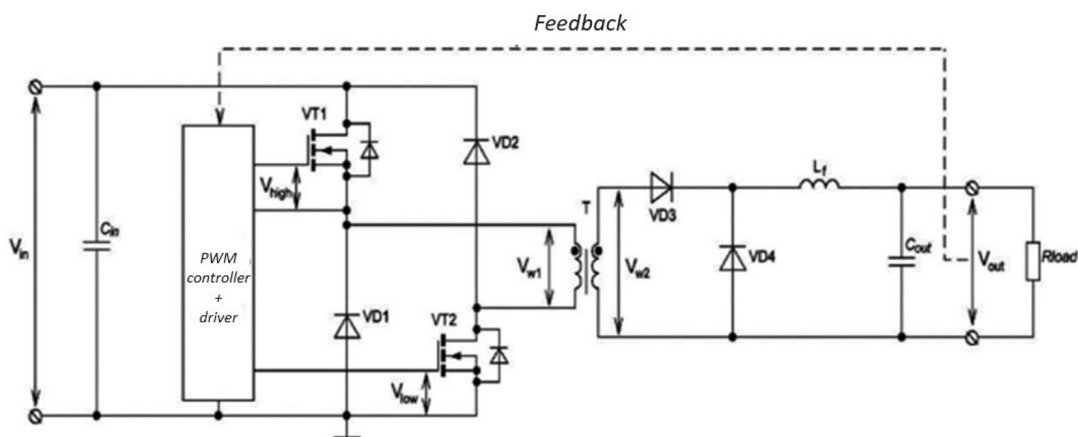


Рис. 2. Двухтранзисторный прямоходовой регулятор

Fig. 2. Two-transistor straight-through regulator

является то, что напряжение на запертых транзисторах, в отличие от однотранзисторного преобразователя, не превышает напряжения питания.

На основании анализа требований к БВГ выбран двухтранзисторный прямоходовой регулятор и разработана его принципиальная схема (рис. 3, 4).

Выбор элементов силовой части БВГ не представляет проблемы – имеется обширный набор транзисторов и диодов целого ряда производителей. Основной задачей является выбор ШИМ-контроллера для управления силовыми транзисторами.

Несмотря на наличие большого количества ШИМ-контроллеров для прямоходовых преобразователей, далеко не все из них могут быть применены в БВГ. Большинство ШИМ-контроллеров предназначено для работы в низковольтных регуляторах. В данном регуляторе напряжение питания составляет 511 В. При этом возникает проблема запуска

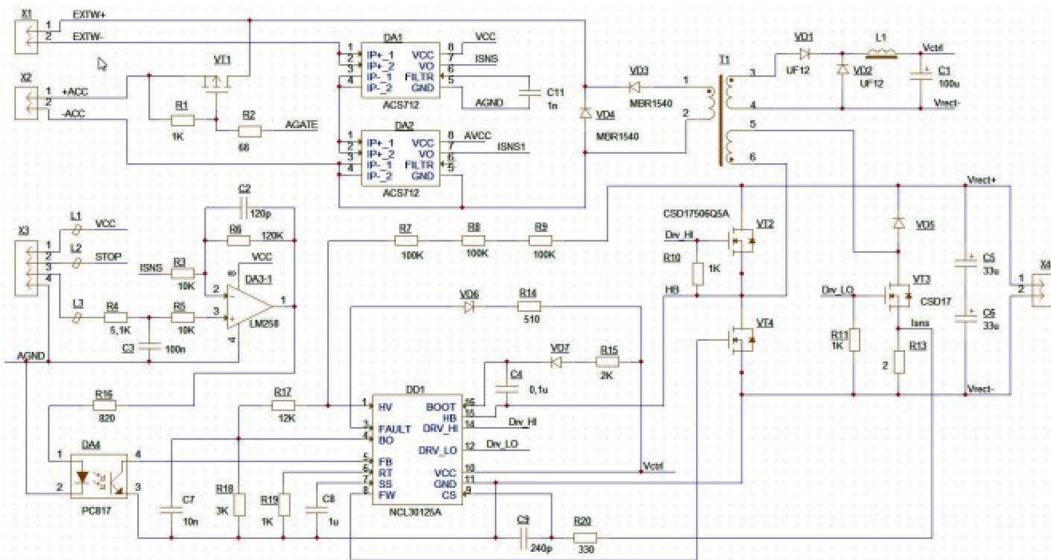


Рис. 3. Блок возбуждения генератора ДГУ ПЧВ с ВИГ

Fig. 3. The excitation unit of the DGU PCHV generator with VIG

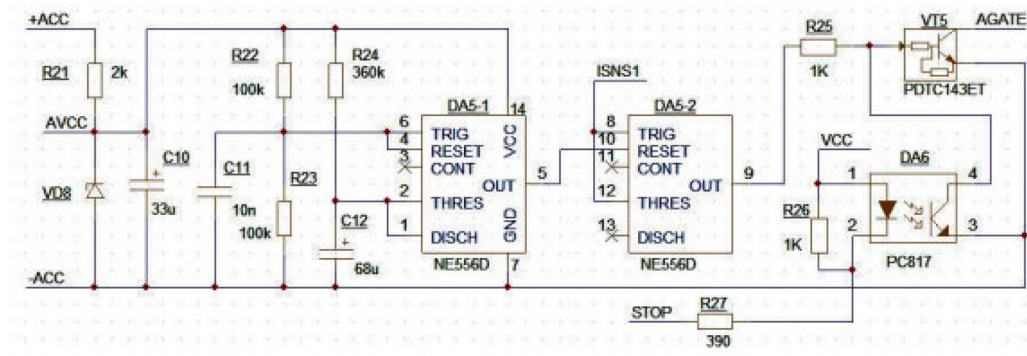


Рис. 4. Блок возбуждения генератора ДГУ ПЧВ с ВИГ (к блоку соединения X2)

Fig. 4. Excitation unit of the DGUPCHV generator with VIG (to the connection block X2)

ШИМ-контроллера от этого достаточно высокого напряжения. Это исключает из выбора большинство ШИМ-контроллеров, поскольку для них потребовалось бы создание схемы запуска, выполненной на дискретных компонентах.

Транзисторы $VT2$ и $VT3$ (рис. 3) не имеют общего вывода, и для управления необходимо иметь драйверы затворов с гальванически развязанными источниками питания. В мостовых и полумостовых регуляторах драйвер “нижнего” транзистора питается от источника затворов с гальванически развязанными источниками питания ШИМ-контроллера, а драйвер “верхнего” транзистора получает питание от «летающего» (*bootstrap*) конденсатора. Этот конденсатор заряжается от источника питания ШИМ-контроллера на интервале, когда открыт нижний транзистор.

В прямоходовом преобразователе применение этой схемы затруднительно, поскольку в отличие от мостовых или полумостовых преобразователей верхний и нижний транзисторы включаются и отключаются одновременно, что затрудняет пополнение заряда *bootstrap* конденсатора.

С учетом указанных особенностей наиболее приемлемым ШИМ-контроллером является контроллер NCL30125 [117] (*DD 1*), позволяющий значительно снизить сложность и стоимость схемы. Контроллер имеет встроенную схему начального запуска от высоковольтного (до 700В) напряжения питания V_{rect+} , которое подается на его вход *HV* через резисторы $R 7 - R 9$. После запуска эта схема отключается и ШИМ-контроллер переходит на питание от вторичной обмотки трансформатора V_{ctrl} .

В отличие от классической схемы регулятора диод в нижнем плече *VD 1* (рис. 3, 4) заменен транзистором $VT4$. Контроллер открывает этот транзистор на интервале паузы, когда основные транзисторы $VT3$ и $VT4$ закрываются. Это обеспечивает надежное пополнение заряда *bootstrap* конденсатора C_4 . Этот конденсатор заряжается от источника питания ШИМ-контроллера V_{ctrl} и на интервале импульса обеспечивает питание драйвера верхнего транзистора $VT2$.

Достоинством контроллера NCL30125 [6] также является наличие встроенных драйверов затворов силовых транзисторов, что значительно упрощает схему БВГ.

Напряжение питания БВГ поступает с выхода выпрямителя преобразователя частоты. Для появления этого напряжения необходимо наличие тока возбуждения генератора, в режиме запуска ДГУ ПЧВ нужно обеспечить работу БВГ от внешнего источника питания. В качестве такого источника используется аккумулятор напряжением 24 В.

Работа БВГ в режиме запуска ДГУ ПЧВ

Для работы БВГ на этапе пуска используется отдельный регулятор релейного типа. Обмотка возбуждения генератора подключается к соединителю $X1$. Напряжение 24 В поступает через соединитель $X2$.

Релейный регулятор состоит из силового транзистора $VT1$, программируемых таймеров $DA5$ [119] и силового транзистора $VT1$. Программируемый таймер $DA5-2$ работает в нестандартном режиме как двухпороговый компаратор, а таймер $DA5-1$ как одновибратор. Одновибратор задает предельное время работы релейного регулятора. При поступлении напряжения 24В происходит запуск одновибратора $DA5-1$, который выдает разрешающий сигнал высокого уровня на вход компаратора *Reset*. Если сигнал обратной связи *ISNS 1*, пропорциональный току

ОВ, не превышает верхний порог компаратора $DA5-2$, то выходной сигнал открывает транзисторы $VT5$ и $VT1$. При этом начинается нарастание тока ОВ. Когда ток ОВ достигает верхнего порога компаратора, выходной сигнал отключает транзисторы $VT5$ и $VT1$, и ток ОВ начинает протекать через диод $VD 1$. Когда сигнал с выхода масштабирующего усилителя достигает нижнего порога компаратора, вновь происходит включение транзисторов $VT5$ и $VT1$.

Когда в процессе запуска появляется напряжение на выходе выпрямителя V_{rect} , блок управления выдает на разъем $X3-2$ сигнал высокого уровня $STOP$. Этот сигнал поступает на вход оптрона $DA5$, и его транзистор отрывается, блокируя включение транзисторов релейного регулятора. Начиная с этого момента питание БВГ производится выходным напряжением выпрямителя V_{rect} .

Если в течение интервала времени, задаваемого одновибратором $DA5-1$, по каким-либо причинам не происходит запуск генератора, то он устанавливает сигнал низкого уровня на входе $RESET$, который запрещает работу компаратора, и регулятор блокируется. Блокировка снимается при отключении напряжения 24 В. Ограничение времени работы генератора позволяет использовать транзистор меньшей мощности.

Для проверки режима работы релейного регулятора выполнено его моделирование, временные диаграммы P_{spice} модели представлены на рис. 5. Моделировался неудачный запуск

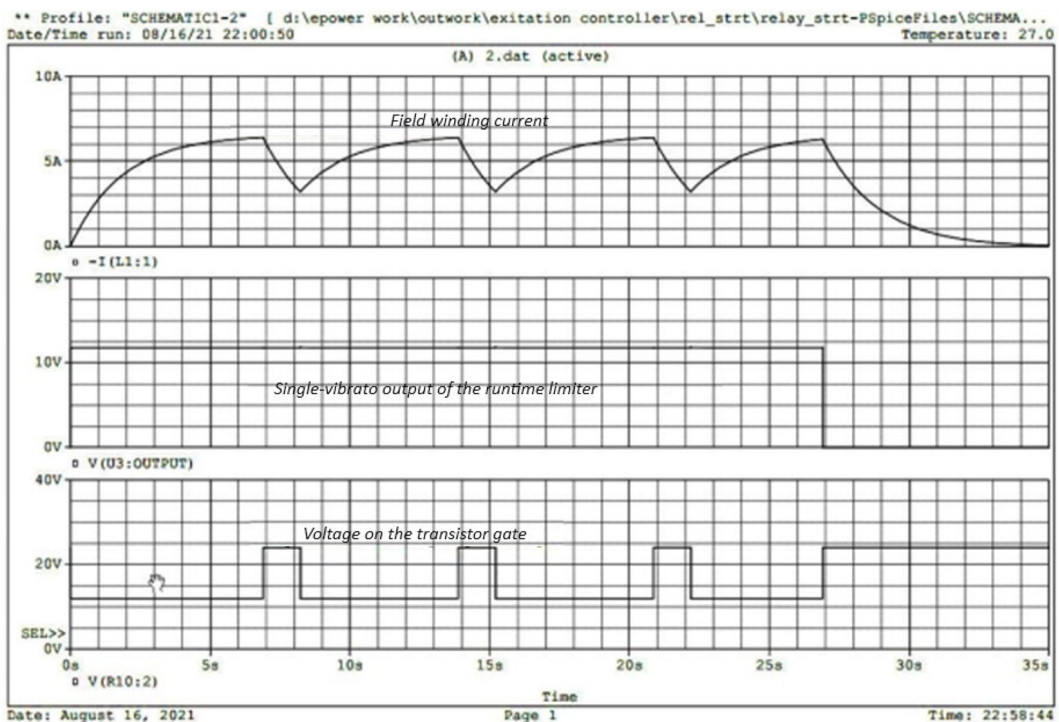


Рис. 5. Работа релейного регулятора тока возбуждения генератора

Fig. 5. Operation of the relay regulator of the generator excitation current

генератора, при котором регулятор отключился по сигналу одновибратора при превышении допустимого времени работы.

Рабочий режим блока возбуждения

БВГ переходит в рабочий режим, когда напряжение на выходе силового выпрямителя V_{rect} достигает минимально допустимого уровня. При этом активируется встроенная в ШИМ-контроллер DD 1 схема запуска. В результате начинается переключение транзисторов регулятора и ШИМ-контроллер переходит на питание от вторичной обмотки трансформатора $T1$. ШИМ-контроллер обеспечивает “мягкий” запуск регулятора (*soft start*) и плавный переход обмотки возбуждения на питание от вторичной обмотки трансформатора. ШИМ-контроллер обеспечивает реализацию токового (*current mode*) принципа регулирования. Этот метод регулирования предпочтителен для БВГ, поскольку, в отличие от большинства импульсных регуляторов, он является регулятором именно тока, а не напряжения. Кроме того, токовый принцип управления обеспечивает контроль тока силовых транзисторов $VT2$, $VT3$ и, соответственно, их защиту от перегрузок.

Регулятор имеет два контура обратной связи (ОС). Основной контур ОС образует датчик тока обмотки возбуждения $DA1$, дифференциальный усилитель $DA3-1$, оптрон гальванической развязки $DA4$. На один из входов усилителя от блока управления поступает напряжение уставки тока OB , а на второй – выходное напряжение датчика тока OB ISNS. Сигнал рассогласования с выхода усилителя через оптрон подается на вход ШИМ-контроллера и управляет коэффициентом заполнения выходного напряжения регулятора.

Второй локальный контур ОС образует сигнал, пропорциональный току первичной обмотки трансформатора, который снимается с шунта R 13 и поступает на вход CS контроллера, где сравнивается с сигналом ошибки, поступающим на вход FB .

Применение двух идентичных датчиков тока OB ($DA1$ и $DA2$) обусловлено требованиями гальванической развязки между четырьмя группами электрических цепей: звена постоянного тока ПЧ (V_{rect}), автономного источника питания (ACC), питания первичной стороны регулятора (V_{ctrl}) и источника питания электронных блоков (VCC). Датчики тока имеют гальваническую развязку выходного напряжения и цепи измерения тока. Дополнительным преимуществом выбранных датчиков тока является наличие в них встроенного шунта, позволяющего измерять токи до 30 А.

Выводы

Разработанный БВГ пригоден для применения в ДГУ ПЧВ с ВИГ, поскольку обеспечивает: начальное независимое возбуждение генератора от внешнего источника питания до заданной уставки напряжения на шине постоянного тока; работу в изолированных системах с нагрузками от холостого хода до номинальной мощности, с поддержанием заданного уровня напряжения на шине постоянного тока; работу в автоматическом и ручном режимах регулирования с безударным переходом между режимами; форсировку возбуждения при снижении напряжения на шинах постоянного тока; ток возбуждения, необходимый для поддержания заданного напряжения, при любом допустимом изменении тока нагрузки изолированной системы, определяемого инвертором.

Список литературы / References

[1] Амузаде А. С., Сизганова Е. Ю., Петухов Р. А. Математическая модель автономной локальной системы электроснабжения: генерация и распределение. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2012, 8(67), 143–147. [Amuzade A. S., Sizganova E. Yu., Petukhov R. A. Mathematical model of autonomous local power supply system: generation and distribution. *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2012, 8(67), 143–147. (in Rus.).]

[2] Хватов О. С., Дарьенков А. Б., Самоявчев И. С., Поляков И. С. *Автономные генераторные установки на основе двигателей внутреннего сгорания переменной частоты вращения*. Н. Новгород: НГТУ, 2016. 172 [Khvatov O. S., Darienkov A. B., Samoyavchev I. S., Polyakov I. S. *Autonomous generator sets based on variable speed internal combustion engines*. Н. Novgorod: NSTU, 2016. 172 (in Rus.).]

[3] Panteleev V., Petukhov R., Pilyugin G., Amuzade A.. Fuzzy power regulator of a diesel generator set with variable speed. *AIP Conference Proceedings: 2*, Krasnoyarsk, 2022, 080048115/

[4] Мелешин В. И. *Транзисторная преобразовательная техника*. М.: Техносфера, 2006. 632. [Meleshin V. I. *Transistor converter technique*. Moscow, Tekhnosphere, 2006. 632 (in Rus.).]

[5] Зиновьев В. И. *Силовая электроника*. М.: Издательство Юрайт, 2015. 667 [Zinoviev V. I. *Power Electronics*. Moscow. Yurait Publishing House, 2015. 667 (in Rus.).]

[6] NCL30125 Current-Mode Controller, Fixed Frequency for Two-Switch Forward Converter [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/ncl30125-d.pdf>