

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ОТКАЗОУСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

ENSURING FAULT TOLERANCE OF THE VEHICLE POWER SUPPLY SYSTEM

Возникновение неисправностей в работе системы электроснабжения автомобиля ведет к недопустимым отклонениям напряжения бортовой сети. Обеспечение отказоустойчивости системы электроснабжения предполагает поддержание требуемого уровня напряжения на основе предлагаемых изменений в конструкции генератора и регулятора напряжения. Установлено, что повышение напряжения генератора при неисправностях обмотки статора и выпрямительного блока является следствием алгоритма работы регулятора напряжения. Для исключения чрезмерного повышения напряжения необходимо, помимо напряжения генератора, контролировать напряжение батареи. Дополнительный контроль тока возбуждения позволит избежать снижения напряжения при увеличении сопротивления в цепи обмотки ротора. Внесение изменений в алгоритм работы регулятора напряжения повысит отказоустойчивость системы электроснабжения.

Ключевые слова: автомобильный генератор, система электроснабжения автомобиля, регулятор напряжения, отказоустойчивость, аккумуляторная батарея.

The occurrence of malfunctions in the operation of the vehicle power supply system leads to unacceptable voltage deviations in the on-board network. Ensuring the fault tolerance of the power supply system involves maintaining the required voltage level based on the proposed changes in the design of the alternator and voltage regulator. It is established that an increase in the voltage of the alternator in case of failures of the stator winding and the rectifier unit is a consequence of the algorithm of the voltage regulator. In order to avoid excessive voltage rise, it is necessary to control the battery voltage in addition to the alternator voltage. Additional control of the excitation current will help avoiding voltage reduction with increasing resistance in the rotor winding circuit. Making changes to the algorithm of the voltage regulator will increase the fault tolerance of the power supply system.

Keywords: automotive alternator, vehicle power supply system, voltage regulator, fault tolerance, storage battery.

Введение

Система электроснабжения занимает промежуточное положение между автомобильным двигателем, являющимся первичным источником энергии, и потребителями, обеспечивающими безопасность движения, комфортность и протекание рабочих процессов, в том числе функциони-

рование самого двигателя. Следовательно, обеспечение работоспособности системы электроснабжения является важной задачей эффективности эксплуатации автомобилей [14, 15].

В процессе эксплуатации в работе агрегатов системы электроснабжения неизбежно происходит снижение эффективности

работы, обусловленное процессами старения, и возникают неисправности [1–3].

Контроль состояния электрооборудования на борту автомобиля можно представить в виде иерархии задач, среди которых наиболее простой можно считать мониторинг текущей работоспособности. Выше располагаются идентификация неисправностей, прогнозирование ресурса работы и обеспечение работоспособности. Отказоустойчивость — это свойство системы электроснабжения сохранять свою работоспособность после отказа одной или нескольких составных частей.

Система электроснабжения объединяет три ключевых устройства: основной источник электроэнергии (генератор), резервный источник питания (аккумуляторная батарея, АКБ) и регулятор напряжения [6, 7]. Оба источника питания могут обеспечивать электроснабжение потребителей, однако отказ одного из них вызовет отклонения в работе другого. При отсутствии АКБ в бортовой сети возникнут скачки напряжения, вызванные выключением мощных потребителей. Отключение генератора приведет к резкому снижению напряжения бортовой сети, которое будет неуклонно снижаться, поскольку резервная емкость АКБ невелика.

Основным методом повышения отказоустойчивости является резервирование ключевых элементов [16, 17]. Резервирование АКБ используется на практике, однако при этом вторая АКБ является стартерной и служит для обеспечения отказоустойчивости системы пуска двигателя. Резервирование генераторов реализовано на коммерческой технике (автобусы, рефрижераторы). В целом этот метод повышает отказоустойчивость, однако является дорогостоящим.

Целью работы является разработка изменений в конструкции генератора и регулятора напряжения для повышения отказоустойчивости системы электроснабжения.

Методы

На рис. 1 представлены результаты измерения напряжения генератора при моделировании характерных неисправностей системы электроснабжения [8, 12]. При этом частота вращения ротора генератора поддерживалась постоянной (равной среднему значению, полученному при дорожных испытаниях), а мощность потребителей (ток нагрузки) изменялась (профиль нагрузки указан пунктиром).

Анализ экспериментальных данных показал, что задача обеспечения отказоустойчивости системы электроснабжения на данный момент не может считаться выполненной по следующим причинам.

Во-первых, одни неисправности приводят к уменьшению напряжения бортовой сети, прогрессирующему разряду батареи и скорому обесточиванию автомобиля. В случае окисления силового вывода генератора это следствие прекращения работы генератора на нагрузку и его самоизоляция. При увеличении сопротивления обмотки ротора уровень напряжения снижается, так как часть тока возбуждения падает на дополнительном сопротивлении.

Во-вторых, другие неисправности, в том числе обмотки статора и выпрямительного блока, ведут к чрезмерному повышению напряжения бортовой сети силами регулятора напряжения [9–11].

Для повышения отказоустойчивости системы электроснабжения и стабилизации уровня напряжения бортовой сети при возникновении неисправностей предлагается: внести изменения в конструкцию генератора, изменить алгоритм работы регулятора для недопущения чрезмерного повышения напряжения бортовой сети, предупредить обесточивание автомобиля путем своевременного информирования водителя и повысить ток возбуждения при снижении напряжения бортовой сети с выдачей соответствующего предупреждения.

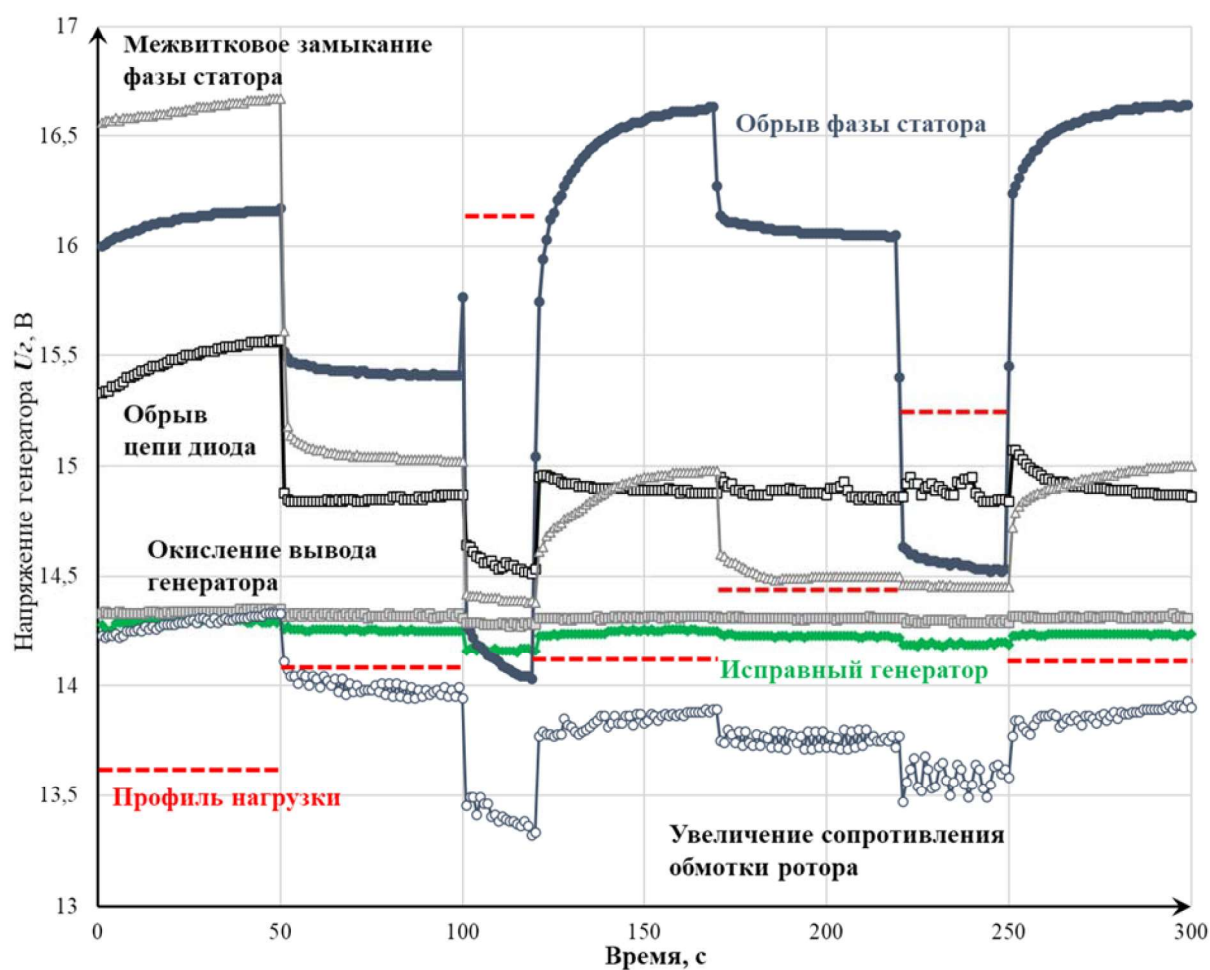


Рис. 1. Изменение напряжения генератора при вариации нагрузки и моделировании неисправностей

Уязвимыми деталями автомобильного генератора, неисправности которых способны вызвать изменение уровня напряжения бортовой сети, являются обмотки статора и ротора, а также выпрямительный блок.

Обмотка ротора генератора обеспечивает создание магнитного поля, и в эксплуатации происходит увеличение сопротивления цепи обмотки при износе щеток, окислении и загрязнении контактных колец. В этом случае выходное напряжение генератора снижается, что ведет к прогрессивному разряду батареи и снижению эффективности работы потребителей [4, 5].

Алгоритм работы регулятора напряжения не в состоянии обнаружить такую неисправность и предотвратить ее последствия.

Решением данной проблемы является размещение между полюсами ротора постоянных магнитов, как это реализовано в индукторных генераторах. В этом случае полный отказ обмотки ротора не приведет к исчезновению напряжения.

На современных автомобильных генераторах обмотку статора соединяют звездой, причем каждая фаза разделена на две катушки. Катушки могут быть соединены в одну узловую точку — нейтраль генератора (рис. 2). Также практикуется соединение катушек в две узловые точки. Однако наивысшей отказоустойчивостью обладает схема с тремя узловыми точками, экспериментальное исследование характеристик которой показало наличие выходного напряжения

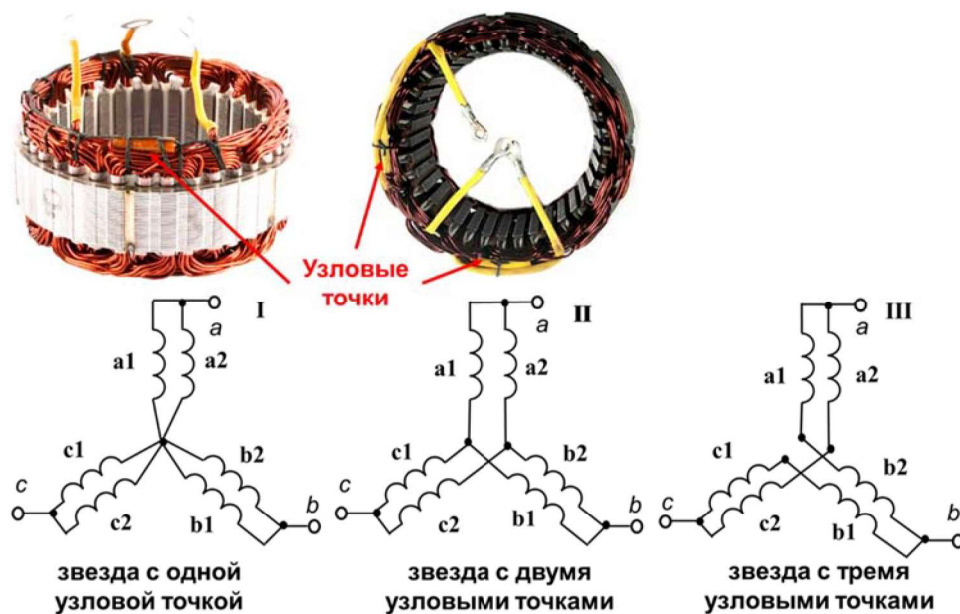


Рис. 2. Схемы соединения обмотки статора автомобильного генератора

даже после отключения четырех катушек из шести.

Результаты и обсуждение

Выпрямительный блок, с одной стороны, является слабым звеном конструкции генератора, а с другой — защищает генератор от перегрузок. В работе системы электроснабжения реализовано три механизма защиты от повышенного напряжения [13]. Первый обеспечивается АКБ, с которой совместная работа генератора резко снижает дальнейший рост напряжения (рис. 3, зона I). На втором этапе подключается регулятор напряжения, поддерживающий напряжение в заданном диапазоне (рис. 3, зона II). На третьем этапе ограничение роста напряжения выполняется стабилитронами выпрямительного блока (рис. 3, зона III).

Увеличение тока в обмотке статора при замыканиях в первую очередь вызовет перегрев и выход из строя одного или нескольких диодов выпрямителя, защищая тем самым генератор от воспламенения. В таком случае повышение отказоустойчивости выпрямительного блока становится нецелесообразным.

Алгоритм работы регулятора напряжения автоматически увеличивает выходное напряжение генератора при обрыве и замыканиях диодов и фаз обмотки статора. Однако в большинстве случаев этот алгоритм приводит к чрезмерному повышению напряжения.

На рис. 4 приведены результаты эксперимента по увеличению сопротивления в цепи фазы статора. Сплошной линией зеленого цвета обозначено напряжение исправного генератора. При работе генератора без регулятора напряжения подобная неисправность приведет к снижению выходного напряжения при тех же значениях тока обмотки возбуждения. Полный обрыв одной из фаз обмотки статора снижает напряжение генератора вплоть до напряжения АКБ, ток которой при этом сменяется на разрядный.

При работе генератора с регулятором напряжения характер изменения выходного напряжения определяется величиной сопротивления в цепи фазы статора и тока нагрузки. При небольших значениях дополнительного сопротивления напряжение незначительно повышается (зона компенсации). Однако дальнейшее увеличение сопротивле-

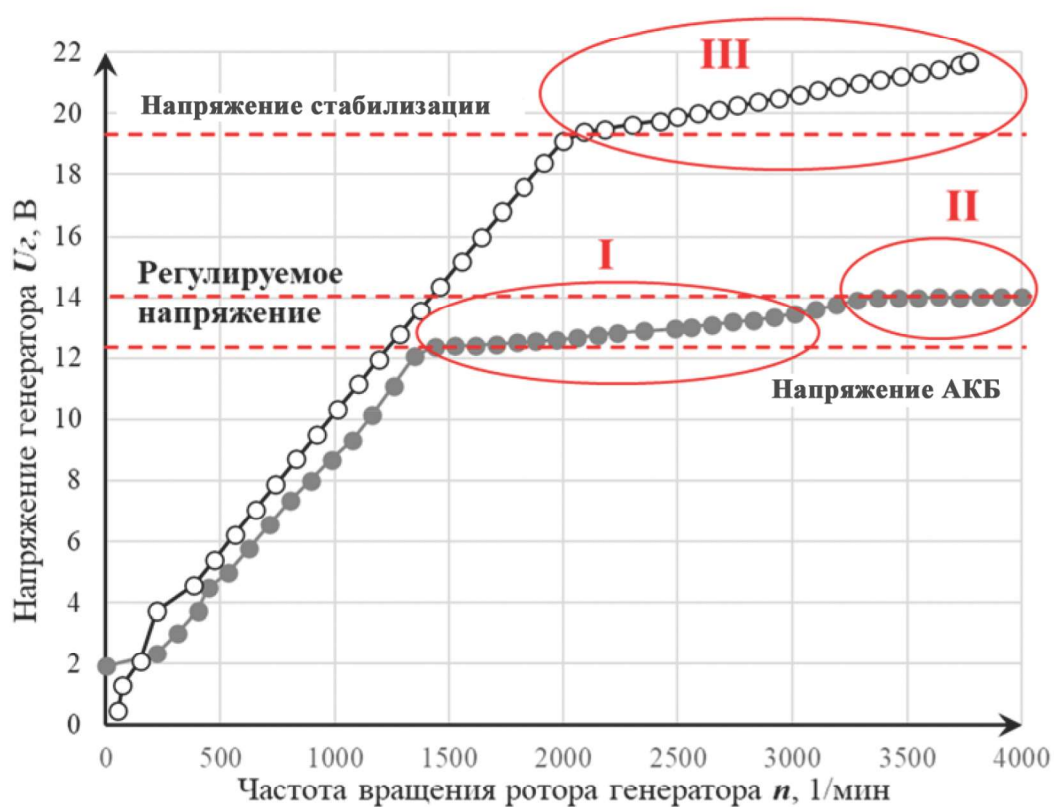


Рис. 3. Механизмы защиты от повышения напряжения в бортовой сети

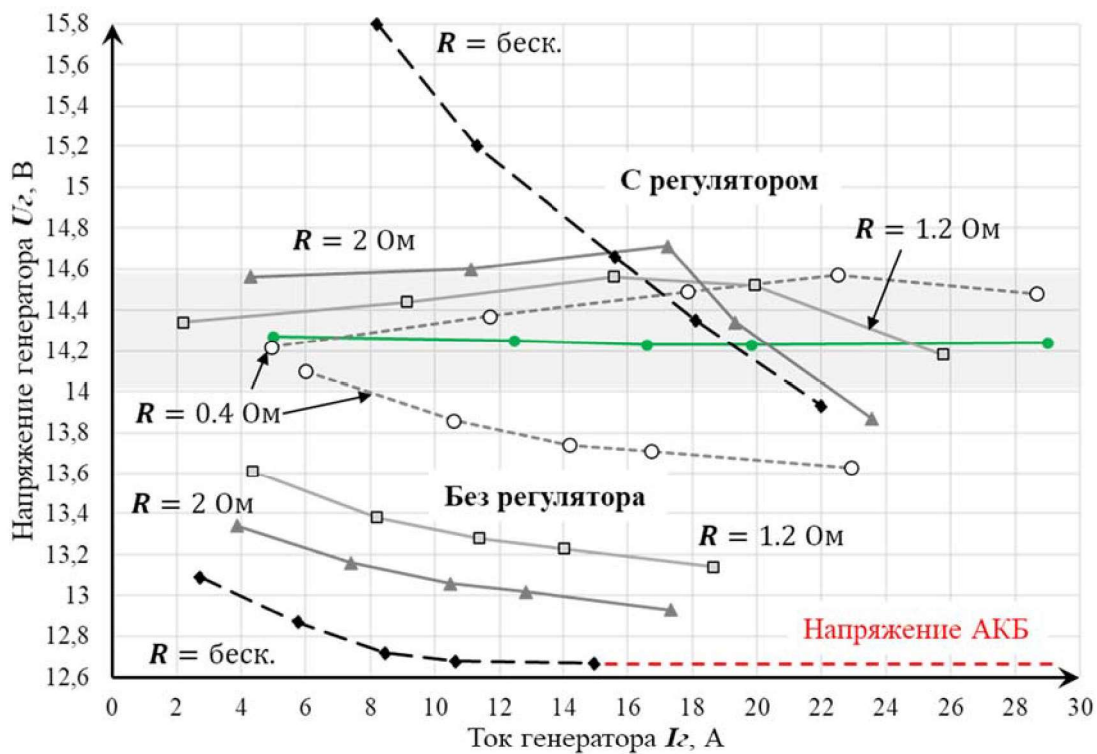


Рис. 4. Изменение напряжения генератора при увеличении сопротивления в цепи фазы статора

ния приводит к тому, что при токе нагрузки более 18 А напряжение снижается ниже номинального (*срыв регулирования*). Отключение одной из фаз обмотки статора (моделирование обрыва) приводит к повышению напряжения 16 В, что небезопасно для работы потребителей.

Указанное повышение напряжения реализовано за счет увеличения тока в обмотке возбуждения (рис. 5). Очевидно, что для исключения чрезмерного повышения напряжения ток возбуждения необходимо снизить в зоне компенсации (до точки 1 на рис. 5).

Для обеспечения отказоустойчивости системы электроснабжения регулятор напряжения помимо значения напряжения генератора должен получать информацию о напряжении АКБ и токе возбуждения (рис. 6). На основании данных о напряжении АКБ возможно предотвратить чрезмерное повышение напряжения бортовой сети и предупредить водителя о снижении напряжения (например, при окислении вывода генератора).

Контроль тока возбуждения предотвратит снижение напряжения генератора вследствие увеличения сопротивления обмотки ротора, так как появится обратная связь не только по напряжению, но и по току возбуждения.

Алгоритм работы регулятора напряжения (см. рис. 6) состоит из следующих операций: измерение напряжения, сравнение величины напряжения с опорным значением и установка требуемого значения тока возбуждения.

Измерительный элемент регулятора напряжения представляет собой резистивный делитель, соотношение плеч которого определяет величину измеренного напряжения. Величина измеренного напряжения подвергается температурной коррекции, для чего одно из плеч делителя связано с резистором, сопротивление которого зависит от температуры окружающего воздуха.

$$U_i^{\text{ИЗМ}} = U_i^{\text{ГЕН}} \frac{R_1}{R_2 \cdot R_3(T)}, \quad (1)$$

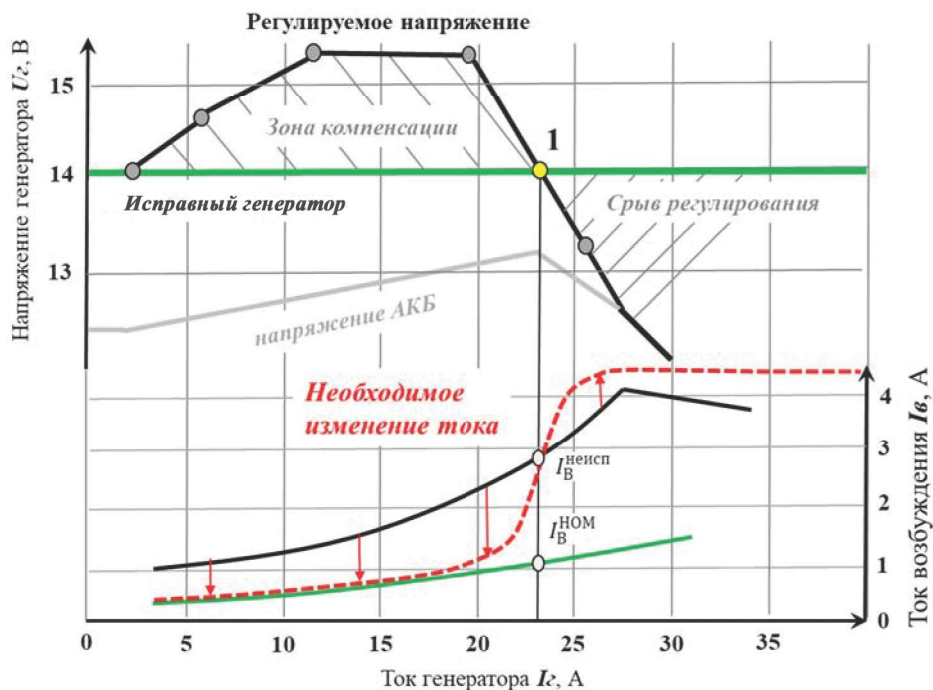


Рис. 5. Предлагаемое изменение тока возбуждения для стабилизации напряжения бортовой сети

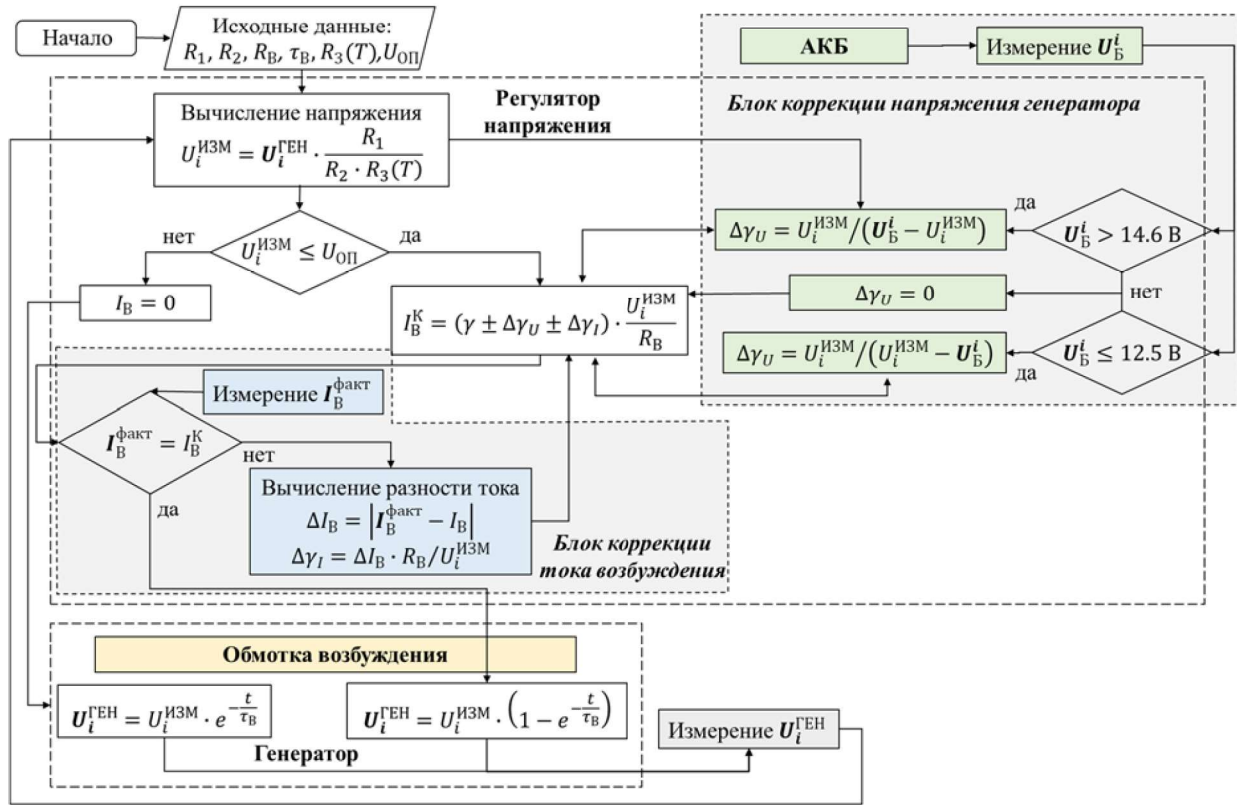


Рис. 6. Алгоритм работы регулятора, повышающий отказоустойчивость системы электроснабжения

где $U_i^{\text{ГЕН}}$ — текущее значение выходного напряжения генератора, В; $U_i^{\text{ИЗМ}}$ — текущее значение измеренного напряжения генератора, В; R_1, R_2 — сопротивления плеч резистивного делителя, Ом; $R_3(T)$ — сопротивление резистора, отвечающего за температурную коррекцию напряжения, Ом.

В элементе сравнения измеренное напряжение сравнивается с опорным значением, равным верхнему пределу регулируемого напряжения генератора. Если измеренное напряжение превышает опорное значение, то **регулирующий элемент** (составной транзистор) обеспечивает отключение тока в обмотке возбуждения. При этом напряжение генератора начинает снижаться по экспоненте:

$$U_i^{\text{ГЕН}} = U_i^{\text{ИЗМ}} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_B}}, \quad (2)$$

где τ_B — постоянная времени обмотки возбуждения, с; t — интервал времени, с.

Если измеренное напряжение меньше либо равно опорному, то регулирующий элемент обеспечивает периодическое подключение обмотки возбуждения к бортовой сети. Частота подключения является постоянной, но изменяется коэффициент заполнения цикла (широтно-импульсное модулирование, ШИМ). На величину этого коэффициента оказывает влияние частота вращения ротора генератора и сила тока генератора:

$$I_B = I_B^0(n) + \Delta I_B(n, I_d) = I_B^{\max}(\gamma_0 + \Delta\gamma), \quad (3)$$
 где I_B^0 — безнагрузочный ток обмотки возбуждения, А; ΔI_B — приращение тока обмотки возбуждения, А; n — текущее значение частоты вращения ротора генератора, 1/мин; I_d — ток генератора, А; γ_0 — безнагрузочная величина коэффициента заполнения цикла; $\Delta\gamma$ — приращение коэффициента заполнения цикла.

Окончательно аналитическую модель тока обмотки возбуждения представим в следующем виде [18]:

$$I_B = \frac{U_i^{\text{ИЗМ}}}{R_B} \left[\frac{\delta}{n} + \frac{\mu \cdot I_d \cdot n}{(n - n_0)} \right], \quad (4)$$

где δ, μ — коэффициенты математической модели; n_0 — начальное значение частоты вращения ротора, 1/мин; R_B — номинальное значение сопротивления обмотки возбуждения, Ом.

Если через обмотку возбуждения протекает ток, то напряжение генератора повышается относительно измеренной величины также по экспоненте:

$$U_i^{\text{ГЕН}} = U_i^{\text{ИЗМ}} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_B}} \right). \quad (5)$$

Если сопротивление обмотки возбуждения в процессе эксплуатации увеличилось или уменьшилось, то штатный алгоритм работы регулятора не сможет корректно стабилизировать величину напряжения генератора. Введем в алгоритм работы регулятора напряжения блок коррекции тока возбуждения.

Для этого необходимо осуществить измерение фактического значения тока возбуждения и сравнить его величину с рассчитанной регулятором. Поскольку обмотка возбуждения обладает существенной индуктивностью, для измерения тока возбуждения необходимо использовать датчик Холла, так как токоизмерительный шунт даст значительную погрешность.

При появлении разности между фактическим и расчетным значениями тока возбуждения определяется значение поправки коэффициента заполнения цикла. Она может быть положительной — при увеличении сопротивления в цепи обмотки возбуждения или отрицательной — при замыканиях в цепи обмотки:

$$\Delta I_B = (I_B^{\text{факт}} - I_B), \quad (6)$$

где $I_B^{\text{факт}}$ — измеренная с помощью датчика сила тока возбуждения, А; ΔI_B — разность фактического и расчетного значений тока возбуждения, А.

$$\Delta \gamma_I = \Delta I_B \cdot R_B / U_i^{\text{ИЗМ}}, \quad (7)$$

где $\Delta \gamma_I$ — коррекция коэффициента заполнения цикла по току возбуждения.

При неисправностях обмотки статора или выпрямительного блока регулятор чрезмерно повышает выходное напряжение генератора, что негативно сказывается на работе потребителей и аккумуляторной батареи.

Для предотвращения подобной ситуации введем блок коррекции напряжения на основе текущего значения напряжения АКБ. Если напряжение АКБ превышает 14,6 В, то необходимо уменьшить коэффициент заполнения цикла на величину, соответствующую степени превышения:

$$\Delta \gamma_U = U_i^{\text{ИЗМ}} / (U_B^i - U_i^{\text{ИЗМ}}), \quad (8)$$

где U_B^i — текущее значение напряжения АКБ, В; $\Delta \gamma_U$ — коррекция коэффициента заполнения цикла по напряжению АКБ.

Если же напряжение АКБ меньше 12,5 В, то для предотвращения прогрессивного разряда батареи напряжение генератора, а значит, и коэффициент заполнения цикла следует увеличить:

$$\Delta \gamma_U = U_i^{\text{ИЗМ}} / (U_i^{\text{ИЗМ}} - U_B^i). \quad (9)$$

Тогда значение тока возбуждения по результатам работы двух блоков коррекции

$$I_B^K = (\gamma \pm \Delta \gamma_U \pm \Delta \gamma_I) \cdot \frac{U_i^{\text{ИЗМ}}}{R_B}, \quad (10)$$

где I_B^K — скорректированное значение тока возбуждения, А.

Выводы

Возникновение неисправностей в работе системы электроснабжения автомобиля ведет к недопустимым отклонениям напряжения бортовой сети. Обеспечение отказоустойчивости системы электроснабжения предполагает поддержание требуемого уровня напряжения на основе предлагаемых изменений в конструкции генератора и регулятора напряжения.

Предложено разместить на роторе постоянные магниты, что гарантирует наличие напряжения при отказе обмотки возбуждения.

Обмотку статора предложено соединить таким образом, чтобы по две катушки разных фаз обеспечивали генерацию напряжения независимо от работы других катушек.

Установлено, что повышение напряжения генератора при неисправностях обмотки статора и выпрямительного блока является следствием алгоритма работы регулятора напряжения. Для исключения чрезмерного повышения напряжения необходимо, чтобы регулятор напряжения, помимо напряжения генератора, контролировал напряжение АКБ. Дополнительный контроль тока возбуждения позволит избежать снижения напряжения при увеличении сопротивления в цепи обмотки ротора. Внесение изменений в алгоритм работы регулятора напряжения повысит отказоустойчивость системы электроснабжения автомобиля.

Библиографический список

1. Денисов И. В., Смирнов А. А. Исследование надежности генераторной установки автомобиля «Лада Калина» в гарантийный период эксплуатации // Бюллетень транспортной информации. 2017. № 6 (264). С. 19–22.
2. Козловский В. Н., Ютт В. Е. Анализ надежности автомобильных генераторных установок // Электроника и электрооборудование транспорта. 2008. № 6. С. 39–41.
3. Adamiec M., Dziubiński M., Siemionek E. Research of the alternator on the stand-efficiency aspect // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 421 (2). 022011. DOI 10.1088/1757-899X/421/2/022001.
4. Пузаков А. В. Инструментальный контроль зарядного баланса транспортных средств // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 5 (82). С. 199–205.
5. Козловский В. Н., Брачунова У. В., Крицкий А. В., Саксонов А. С. Математическая имитационная модель оценки зарядного баланса автомобиля // Грузовик. 2021. № 7. С. 17–26.
6. Lee W., Choi D., Sunwoo M. Modelling and simulation of vehicle electric power system // Journal of Power Sources. 2002. Vol. 109. Pp. 58–66. DOI 10.1016/S0378-7753(02)00033-2.
7. Зуев С. М., Малеев Р. А., Чернов А. Е. Энергетическая эффективность систем электрооборудования автономных объектов. М.: Инфра-М, 2022. 170 с.
8. Пузаков А. В. Концепция оперативного мониторинга системы электроснабжения автомобилей // Прогрессивные технологии в транспортных системах: сб. материалов XIV Междунар. науч.-практ. конф. Оренбург, 20–22 ноября 2019 г. Оренбург: ОГУ, 2019. С. 515–522.
9. Chavez R. Instructional Automotive Charging System with Automatic Voltage Regulator and Integrated Circuits // International Journal of Engineering and Advanced Technology. 2022. Vol. 12 (2). Pp. 82–91. DOI 10.35940/ijeat.B3926.1212222.
10. Пузаков А. В. Исследование работы многофункциональных регуляторов напряжения автомобильных генераторов // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2016. Т. 4, № 5–4 (25–4). С. 290–295.
11. Чернов А. Е. Многофункциональный регулятор напряжения для генераторных установок нового поколения большегрузных автомобилей и автобусов // Грузовик. 2012. № 3. С. 6–7.
12. Филатов М. И., Пузаков А. В. Обоснование параметров оценки технического состояния автомобильных генераторов на основе моделирования неисправностей // Грузовик. 2016. № 1. С. 25–29.
13. Пузаков А. В., Копылов К. Е. Исследование напряжения автомобильного генератора при работе в составе системы электроснабжения // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: сб. материалов VI Междунар. науч.-практ. конф. Омск, 25–26 ноября 2021 г. Омск: СибАДИ, 2021. С. 119–124.
14. Тимохин С. В., Сергеевичев Ю. В. Исследование технико-экономических показателей системы электроснабжения автомобиля // Нива Поволжья. 2021. № 1 (58). С. 137–143.
15. Терещук В. С., Новосельский В. Г., Ференец А. В., Дудка Н. А., Шакирзянова Н. Ш. Основы электроснабжения автомобилей и тракторов. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2010. 205 с.
16. Журавский Б. В., Маркин А. Г. Повышение эффективности системы электроснабжения автомобилей // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, новации: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Омск, 7–9 декабря 2016 г. Омск: СибАДИ, 2016. С. 555–561.
17. Хацевский К. В., Сидоренко А. А., Беляков В. Е., Бисимбаев С. К., Григорьев М. Г. Повышение эффективности системы электроснабжения автомобильного транспорта // Вестник Инновационного Евразийского университета. 2020. № 1 (77). С. 92–101.
18. Puzakov A. Model of Automotive Alternator Output Voltage with Rectifier and Voltage Regulator // 2024 International Ural Conference on Electrical

Power Engineering (UralCon). Magnitogorsk, 27–29 September 2024. Pp. 466–471. DOI 10.1109/UralCon62137.2024.10718942.

References

1. Denisov I. V., Smirnov A. A. *Issledovanie nadezhnosti generatornoy ustanovki avtomobilya «Lada Kalina» v garantiyniy period ekspluatatsii* [Study of the generator set reliability in the Lada Kalina car during the warrant period of operation]. *Byulleten' transportnoy informatsii – Transport Information Bulletin*, 2017, no. 6 (264), pp. 19–22.
2. Kozlovskiy V. N., Yutt V. E. *Analiz nadezhnosti avtomobil'nykh generatornykh ustanovok* [Analysis of automobile generator set reliability]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Electronics and Electrical Equipment of Transport*, 2008, no. 6, pp. 39–41.
3. Adamiec M., Dziubiński M., Siemionek E. Research of the alternator on the stand-efficiency aspect. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2018, vol. 421 (2). 022011. DOI 10.1088/1757-899X/421/2/022001.
4. Puzakov A. V. *Instrumental'niy kontrol' zaryadnogo balansa transportnykh sredstv* [Instrumental control of the charging balance of vehicles]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2020, no. 5 (82), pp. 199–205.
5. Kozlovskiy V. N., Brachunova U. V., Kritskiy A. V., Saksonov A. S. *Matematicheskaya imitatsionnaya model' otsenki zaryadnogo balansa avtomobilya* [Mathematical simulation model for estimating the charge balance of a car]. *Gruzovik – Truck*, 2021, no. 7, pp. 17–26.
6. Lee W., Choi D., Sunwoo M. Modelling and simulation of vehicle electric power system. *Journal of Power Sources*, 2002, vol. 109, pp. 58–66. DOI 10.1016/S0378-7753(02)00033-2.
7. Zuev S. M., Maleev R. A., Chernov A. E. *Energeticheskaya effektivnost' sistem elektrooborudovaniya avtonomnykh ob'ektov* [Energy efficiency of electrical equipment systems of autonomous objects]. Moscow, Infra-M Publ., 2022, 170 p.
8. Puzakov A. V. *Kontseptsiya operativnogo monitoringa sistemy elektrosnabzheniya avtomobiley* [Concept of operational monitoring of the power supply system of cars]. *Progressivnye tekhnologii v transportnykh sistemakh. Trudy XIV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Orenburg, 20–22 noyabrya 2019 g.* [Progressive technologies in transportation systems. Proceedings of the XIV International scientific-practical. conf. Orenburg, November 20–22, 2019]. Orenburg, OGU Publ., 2019, pp. 515–522.
9. Chavez R. Instructional Automotive Charging System with Automatic Voltage Regulator and Integrated Circuits. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, 2022, vol. 12 (2), pp. 82–91. DOI 10.35940/ijeat.B3926.1212222.
10. Puzakov A. V. *Issledovanie raboty mnogofunktsional'nykh regulyatorov napryazheniya avtomobil'nykh generatorov* [Study of the operation of multifunctional voltage regulators of automobile generators]. *Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: teoriya i praktika – Actual directions of scientific research of the XXI century: theory and practice*, 2016, vol. 4, no. 5–4 (25–4), pp. 290–295.
11. Chernov A. E. *Mnogofunktsional'niy regulyator napryazheniya dlya generatornykh ustanovok novogo pokoleniya bol'shegruznykh avtomobiley i avtobusov* [Multifunctional voltage regulator for generator sets of a new generation of heavy vehicles and buses]. *Gruzovik – Truck*, 2012, no. 3, pp. 6–7.
12. Filatov M. I., Puzakov A. V. *Obosnovanie parametrov otsenki tekhnicheskogo sostoyaniya avtomobil'nykh generatorov na osnove modelirovaniya neispravnostey* [Basing the parameters for assessing the technical condition of automobile generators based on fault modeling]. *Gruzovik – Truck*, 2016, no. 1, pp. 25–29.
13. Puzakov A. V., Kopylov K. E. *Issledovanie napryazheniya avtomobil'nogo generatora pri rabote v sostave sistemy elektrosnabzheniya* [Study of the voltage of the automobile generator when operating as part of the power supply system]. *Arkhiturno-stroitel'niy i dorozhno-transportniy kompleksy: problemy, perspektivy, innovatsii. Trudy VI Mezhdunar. nauch.-prakt.konf. Omsk, 25–26 noyabrya 2021 g.* [Architectural and construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations. Proceedings of the VI International. scientific-practical conf. Omsk, November 25–26, 2021]. Omsk, SibADI Publ., 2021, pp. 119–124.
14. Timokhin S. V., Sergeevichev Yu. V. *Issledovanie tekhniko-ekonomicheskikh pokazateley sistemy elektrosnabzheniya avtomobilya* [Study of the technical and economic indicators of the power supply system of the car]. *Niva Povolzh'ya – Niva Volga region*, 2021, no. 1 (58), pp. 137–143.
15. Tereshchuk V. S., Novosel'skiy V. G., Ferenets A. V., Dudka N. A., Shakirzyanova N. Sh. *Osnovy elektrosnabzheniya avtomobiley i traktorov* [Fundamentals of power supply of cars and tractors]. Kazan', Izd-vo Kazan. gos.tekhn. un-ta Publ., 2010, 205 p.
16. Zhuravskiy B. V., Markin A. G. *Povyshenie effektivnosti sistemy elektrosnabzheniya avtomobiley* [Increasing the efficiency of the power supply system of cars]. *Arkhiturno-stroitel'niy i dorozhno-transportniy*

kompleksy: problemy, perspektivy, novatsii. Trudy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf. Omsk, 7–9 dekabrya 2016 g. [Architectural and construction and road transport complexes: problems, prospects, innovations. Proceedings of the International. scientific-practical. conf. Omsk, December 7-9, 2016]. Omsk, SibADI Publ., 2016, pp. 555–561.

17. Khatsevskiy K. V., Sidorenko A. A., Belyakov V. E., Bisimbaev S. K., Grigor'ev M. G. *Povyshenie effektivnosti sistemy elektrosnabzheniya avtomobil'nogo transporta*

[Increasing the efficiency of the power supply system for road transport]. *Vestnik Innovatsionnogo Evraziyskogo universiteta – Bulletin of the Innovative Eurasian University*, 2020, no. 1 (77), pp. 92–101.

18. Puzakov A. Model of Automotive Alternator Output Voltage with Rectifier and Voltage Regulator. *Proceedings of the 2024 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. Magnitogorsk, 27–29 September 2024, pp. 466–471. DOI 10.1109/UralCon62137.2024.10718942.