

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

А. В. Пузаков

Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

e-mail: and-rew78@yandex.ru

Аннотация: Агрегаты современных автомобилей требуют бесперебойного снабжения электроэнергией необходимого качества, поэтому оперативное определение технического состояния системы электроснабжения (СЭ) является актуальной задачей. В процессе работы автомобиля происходит динамическое перераспределение электроэнергии, расходуемой на нужды потребителей между автомобильным генератором и аккумуляторной батареей (АКБ). На эффективность баланса электроэнергии на борту автомобиля оказывает влияние не только мощность потребителей, режим движения автомобиля, погоднo-климатические факторы, но и техническое состояние генератора и АКБ, однако этому уделено недостаточное внимание. Установлено, что токи генератора, обмотки возбуждения и АКБ, а также напряжение бортовой сети могут служить индикаторами технического состояния СЭ автомобиля. Цель статьи заключается в разработке типовых режимов нагружения СЭ автомобиля и методике их моделирования в лабораторных условиях. Ведущим методом к решению данной задачи является фиксация параметров СЭ с помощью регистратора аналоговых данных при вариации тока нагрузки и частоты вращения ротора генератора. В процессе эксперимента режимы нагружения сменялись в порядке увеличения частоты вращения ротора генератора. Определён характер изменения параметров СЭ в случае исправного генератора и заряженной АКБ. Эффективность работы СЭ можно косвенно оценить по отношению площадей, ограниченных зарядным и разрядным токами АКБ динамической характеристической кривой. При токе нагрузки равном 10 А энергия, сообщаемая генератором АКБ, превышает энергию, расходуемую на работу потребителей. При увеличении тока нагрузки до 15 А баланс энергии смещается в сторону разрядной части. Научной новизной можно считать экспериментально установленные зависимости изменения параметров СЭ при вариации нагрузочного и скоростного режимов работы. Практическая значимость проведенных исследований заключается в повышении достоверности диагностирования СЭ на основе анализа индикаторов её технического состояния. Дальнейшие исследования будут направлены на определение изменения параметров СЭ автомобиля в процессе возникновения и развития неисправностей генератора и АКБ.

Ключевые слова: система электроснабжения автомобиля, автомобильный генератор, аккумуляторная батарея, нагрузочные режимы, динамическая характеристическая кривая.

Для цитирования: Пузаков А. В. Анализ динамической характеристической кривой системы электроснабжения автомобилей // Интеллект. Инновации. Инвестиции. – 2021. – № 1. – С. 87–96. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-1-87.

ANALYSIS OF THE DYNAMIC CHARACTERISTIC CURVE OF THE CAR POWER SUPPLY SYSTEM

A. V. Puzakov

Orenburg State University, Orenburg, Russia

e-mail: and-rew78@yandex.ru

Abstract. Units of modern cars require an uninterrupted supply of electricity of the required quality, therefore, the prompt determination of the technical condition of the power supply system (SE) is an urgent task. During the operation of the car, there is a dynamic redistribution of electricity consumed for the needs of consumers between the car generator and the storage battery (AKB). The efficiency of the balance of electricity on board the car is influenced not only by the power of consumers, the mode of movement of the car, weather and climatic factors, but also by the technical condition of the generator and battery, however, insufficient attention has been paid to this. It has been established that the currents of the generator, the field winding and the battery, as well as the voltage of the on-board network, can serve as indicators of the technical condition of the vehicle's ESS. The purpose of the article is to develop typical loading modes of a vehicle's solar cell and a technique for their

modeling in laboratory conditions. The leading method for solving this problem is fixing the ESS parameters using an analog data recorder with variations in the load current and the generator rotor speed. In the course of the experiment, the loading modes were changed in the order of increasing the generator rotor speed. The nature of the change in the parameters of the solar cell in the case of a working generator and a charged battery has been determined. The efficiency of the solar cell can be indirectly estimated by the ratio of the areas limited by the charging and discharging currents of the battery of the dynamic characteristic curve. With a load current of 10 A, the energy supplied by the battery generator exceeds the energy consumed for the work of consumers. When the load current increases to 15 A, the energy balance shifts towards the discharge part. The experimentally established dependences of the change in the parameters of the solar cell with variations in the load and speed modes of operation can be considered a scientific novelty. The practical significance of the research carried out is to increase the reliability of diagnosing SE based on the analysis of indicators of its technical condition. Further research will be aimed at determining changes in the parameters of the vehicle's ESS in the process of occurrence and development of generator and battery malfunctions.

Keywords: vehicle's power supply system, automotive alternator, battery, load modes, dynamic characteristic curve.

Cite as: Puzakov, A. V. (2021) [Analysis of the dynamic characteristic curve of the car power supply system] *Intellect. Innovatsii. Investitsii* [Intellect. Innovations. Investments]. Vol. 1, pp. 87–96. DOI: 10.25198/2077-7175-2021-1-87.

Введение

Система электроснабжения (СЭ) является наиболее ответственной системой электрооборудования автомобиля, задачей которой является обеспечение потребителей бортовой сети электроэнергией необходимого качества.

Изучением работы СЭ автомобилей в разные годы занимались отечественные и зарубежные учёные: Гольдштейн О. С. «Исследование и разработка методов и средств диагностики систем электроснабжения автомобилей» (1973), Смирнов Ю. А. «Выбор параметров систем электроснабжения, обеспечивающих заряженность аккумуляторной батареи в различных условиях эксплуатации» (1975), Ютт В. Е. «Повышение эффективности работы автомобильного транспорта методами диагностирования электрооборудования подвижного состава» (1979), Акимов А. В. «Разработка систем электроснабжения автомобилей на два уровня напряжения» (1983), Буренков К. Э. «Разработка методики автоматизированного расчёта и усовершенствование автомобильных систем электроснабжения» (1988), Махновский Е. Е. «Методы бортового диагностирования электрооборудования автомобилей» (1989), Капелинский А. В. «Система электроснабжения транспортных машин с повышенным качеством электроэнергии» (1990), Radomir Michal Fabis «Beitrag zum Energiemanagement in Kfz-Bordnetzen» (2006), Чернов А. Е. «Методология повышения энергетической эффективности систем электрооборудования автотранспортных средств» (2017), Michael Harald Winter «Zur Optimierung und Validierung von Managementsystemen für elektrische Energiebordnetze im Kraftfahrzeug» (2018) и др.

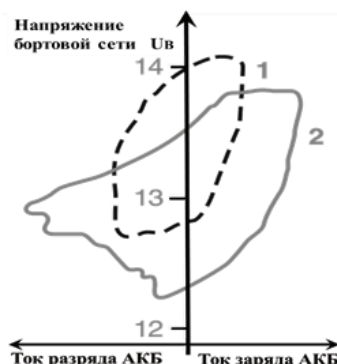
Большинство публикаций затрагивают вопросы разработки специфических и совершенствования существующих СЭ, однако вопросы диаг-

ностирования СЭ как совокупности генератора и АКБ в достаточной мере не изучены. В работе Махновского Е. Е. производится анализ технического состояния генератора на основе построения трёхмерной зависимости его выходного напряжения и силы тока. Однако неисправности АКБ, которые вносят свой вклад в формирование подобной зависимости, автором не учитываются.

В процессе работы автомобиля происходит динамическое перераспределение электроэнергии, расходуемой на нужды потребителей между устройствами генерации электроэнергии (генератор) и устройствами хранения электроэнергии (АКБ).

Существуют режимы, когда АКБ отдаёт накопленную энергию потребителям (разряд батареи); в остальное время её степень заряженности увеличивается благодаря работе автомобильного генератора [1, 2].

Динамическая характеристическая кривая СЭ представляет собой изменение напряжения АКБ по отношению к току АКБ во время цикла движения (рисунок 1). Огибающая кривая указывает на общее взаимодействие элементов СЭ (АКБ, генератора, потребителей), а также на влияние температуры окружающего воздуха (при низкой температуре воздуха генератор способен отдать больший на 15–20% ток благодаря пониженному сопротивлению электрических проводов, при высокой температуре энергетические возможности генератора наоборот снижены), частоты вращения (определяет величину вырабатываемого генератором тока) и передаточного отношения шкив двигателя внутреннего сгорания – шкив генератора (увеличение передаточного отношения ведет к увеличению крутизны токоскоростной характеристики, а, следовательно, к увеличению тока генератора).



- 1 – при большой мощности генератора и небольшой ёмкости АКБ;
2 – при небольшой мощности генератора и большой ёмкости АКБ

Рисунок 1 – Динамическая характеристическая кривая СЭ
Источник¹

Большая площадь огибающей кривой означает, что при таком исполнении бортовой сети в выбранном цикле движения возникают сильные колебания напряжения, а АКБ быстрее замыкается в цикл (переходя от приема заряда к отдаче электроэнергии), то есть её степень заряженности испытывает сильные временные изменения.

Данная характеристическая кривая СЭ своя для любой комбинации условий эксплуатации и режимов движения (город/шоссе). Характеристическая кривая системы может измеряться на выводах АКБ и отображаться графически с помощью измерительной системы.

Однако на работу СЭ оказывает значительное влияние не только изменение нагрузки, скорости движения и погодно-климатических факторов. Не меньшее значение оказывает изменение технического состояния элементов СЭ [3, 4, 6].

Определение технического состояния СЭ на борту транспортного средства возможно с помощью амперметра, вольтметра или контрольной лампы. Амперметр установлен в цепи АКБ, и при нормальной работе СЭ сила тока принимает отрицательное значение в процессе запуска двигателя внутреннего сгорания и небольшое положительное значение в процессе движения автомобиля. Вольтметр позволяет контролировать напряжение бортовой сети и определять ряд неисправностей генератора, поскольку напряжение бортовой сети в процессе работы двигателя внутреннего сгорания (ДВС) всегда выше напряжения АКБ в случае исправности генератора.

Сигнал контрольной лампы информирует водителя о том, что АКБ работает в режиме разряда. Отсутствие сигнала контрольной лампы свидетель-

ствует только о том, что происходит заряд АКБ, однако о состоянии АКБ (заряжена или разряжена), уровне регулировки напряжения и силе зарядного или разрядного тока сигнал контрольной лампы информировать водителя не может, поэтому при наличии на автомобиле сигнализатора разрядного режима требуется более тщательное наблюдение за состоянием АКБ и уровнем регулировки напряжения.

Анализ параметров системы электроснабжения автомобилей

В общем случае работу СЭ автомобиля можно охарактеризовать следующими параметрами (рисунок 2): сила тока генератора I_g , сила тока обмотки возбуждения генератора $I_{\text{в}}$, сила тока АКБ $I_{\text{б}}$ (в зарядном или разрядном режиме), напряжение бортовой сети U и частота вращения ротора генератора n [8, 9, 14].

Рассмотрим, как изменяются вышеуказанные параметры СЭ при изменении технического состояния её элементов.

Сила тока генератора увеличивается пропорционально частоте вращения ротора (токоскоростная характеристика), однако возникновение наиболее характерных неисправностей приводит к снижению тока, отдаваемого генератором в бортовую сеть [2, 7, 10].

Дефекты АКБ в системе электроснабжения характеризуются изменением величины зарядного или разрядного тока. Увеличение зарядного тока происходит при возникновении короткого замыкания между разноименными пластинами аккумулятора, уменьшение при окислении полюсных выводов и клемм или необратимой сульфатации пластин.

¹ Konrad Reif (Hrsg.) Generatoren, Batterien und Bordnetze. Springer-Verlag GmbH. 2018. 125 s.



Рисунок 2 – Схема СЭ автомобиля
Источник: разработано автором

Напряжение бортовой сети может выступать индикатором неисправности (или разряженности) АКБ в начальный период времени (до запуска (ДВС), или дефектов генератора (после запуска ДВС).

Стабилизация выходного напряжения генератора реализуется за счёт широтно-импульсной модуляции тока в обмотке возбуждения. Начальная

стадия развития неисправности компенсируется увеличением времени включённого состояния обмотки возбуждения (рисунок 3) [13]. Дальнейшее развитие неисправности приводит к снижению напряжения и силы тока генератора, что приведёт к прогрессирующему разряду АКБ и прекращению работы ответственных потребителей.

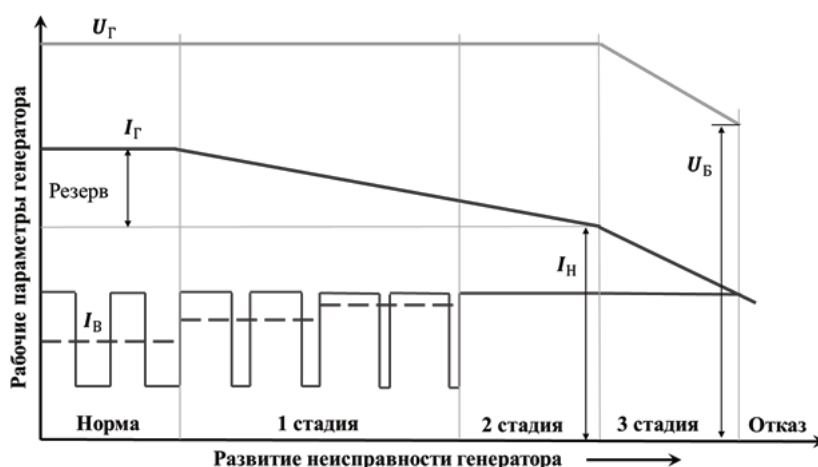


Рисунок 3. Изменение параметров генератора в процессе формирования неисправности
Источник: разработано автором

Таким образом, все рассмотренные параметры СЭ могут выступать в качестве диагностических, однако для повышения информативности диагноза их следует использовать в комплексе.

Обоснование тестовых режимов нагружения системы электроснабжения автомобилей

Анализ совместной работы генератора и АКБ позволил выделить следующие характерные режимы нагружения [5, 15].

Режим аварийной работы АКБ. В этом режиме проверяется способность АКБ снабжать электроэнергией ряд ответственных потребителей (системы впрыска топлива, освещения, стеклоочиститель и т. п.) при отказе генератора. Нормированное значение силы тока АКБ в этом режиме составляет 25 А.

Режим компенсации дефицита энергии. В этом режиме сила тока потребителей складывается из силы тока генератора и силы тока АКБ. Характеризует работу СЭ во время стоянки автомобиля (или движения с невысокой скоростью) и задействовании большого числа потребителей (осадки, низкая температура окружающего воздуха, темное время суток и т. п.) [9].

Режим нулевого зарядного баланса. В этом режиме вся электроэнергия, выработанная генератором расходуется на питание потребителей, сила тока АКБ равна нулю (предполагается полная заряженность АКБ). Является промежуточным режимом нагружения.

Режим срабатывания регулятора напряжения. В этом режиме генератор начинает вырабатывать

номинальное выходное напряжение (обычно для легковых автомобилей $U = 14$ В). Косвенно определяется по падению силы тока обмотки возбуждения.

Режим установившейся мощности генератора. В этом режиме сила тока, вырабатываемая генератором, должна составлять не менее $2/3$ от его максимальной мощности. Как правило, при оснащении автомобиля только штатными потребителями сила тока генератора не превышает данного значения.

Совокупность вышеперечисленных режимов позволит воссоздать полную картину изменения параметров бортовой сети с целью оценки технического состояния СЭ автомобиля.

Экспериментальная часть

Экспериментальное исследование режимов нагружения СЭ проводилось на специализированном стенде, позволяющем регулировать силу тока нагрузки и частоту вращения ротора генератора.

Для измерения текущих значений параметров

СЭ использовались регистраторы напряжения постоянного тока DT-171V (0–30 В) (для записи величин напряжения бортовой сети и частоты вращения ротора генератора) и четырёхканальный регистратор аналоговых данных UX120-006M (для записи значений комплектных датчиков постоянного напряжения, подключаемых к токовым шунтам) согласно схеме, приведённой на рисунке 4 [1].

A1, A3 – регистратор напряжения постоянного тока DT-171V; A2 – четырёхканальный регистратор аналоговых данных UX120-006M; B1 – индуктивный датчик частоты вращения; G1 – генератор 9402.3771; GB1 – АКБ 6СТ-60VL; M1 – приводной электродвигатель; PA1-PA3 – амперметры; PN1 – тахометр; PV1 – вольтметр; QF1 – автоматический выключатель; RS1 – токовый шунт 10А 75 мВ; RS2 – токовый шунт 100 А 75 мВ; RS3, RS4 – токовые шунты 20 А 75 мВ; Rн – нагрузочный реостат; S1 – выключатель.

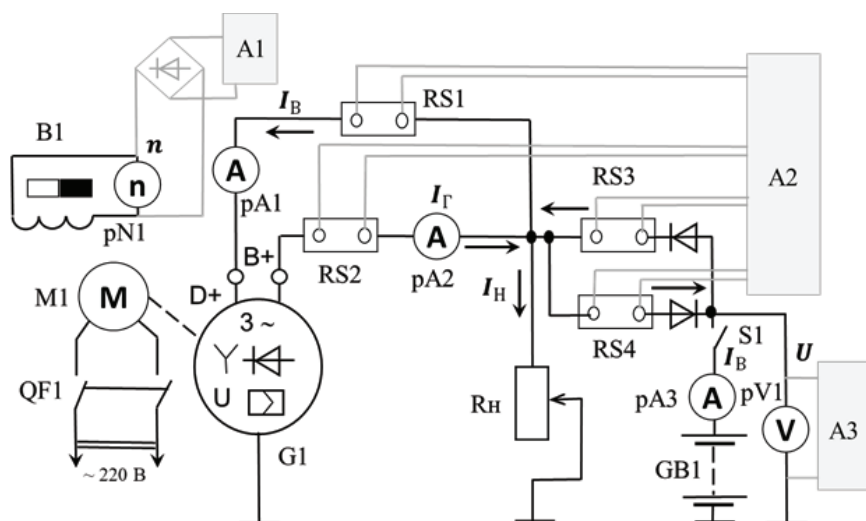


Рисунок 4. Схема подключения измерительных приборов

Источник: разработано автором

В процессе эксперимента режимы нагружения сменялись в порядке увеличения частоты вращения ротора генератора. Первоначально с помощью нагрузочного реостата Rн устанавливалась величина тока нагрузки в диапазоне (0–25 А) с шагом 5 А. Затем с помощью тумблера S1 подключалась АКБ и фиксировались показания измерительных приборов для частоты вращения ротора генератора равной нулю.

Далее частота вращения ротора увеличивалась, и, начиная со значения 500 мин^{-1} , записывались показания приборов с шагом 100 мин^{-1} . Результаты эксперимента приведены на рисунках 5–8, где отражены зависимости параметров СЭ автомобилей при вариации силы тока нагрузки и частоты вра-

щения ротора генератора. На рисунке 5 приведена зависимость силы тока исправного генератора, из которой следует, что начало токоотдачи лежит в диапазоне $1000\text{--}1200 \text{ мин}^{-1}$, затем происходит резкое увеличение тока и его последующая стабилизация.

На рисунке 6 представлены зависимости силы тока обмотки возбуждения, имеющие два характерных участка: начальное увеличение тока до частоты вращения $1000\text{--}2000 \text{ мин}^{-1}$ (зависит от тока нагрузки) и дальнейшее резкое снижение в момент срабатывания регулятора напряжения. Минимальное значение тока возбуждения также определяется величиной нагрузки и изменяется от 0,5 А при отсутствии нагрузки до 2,0 А при токе нагрузки 25 А.

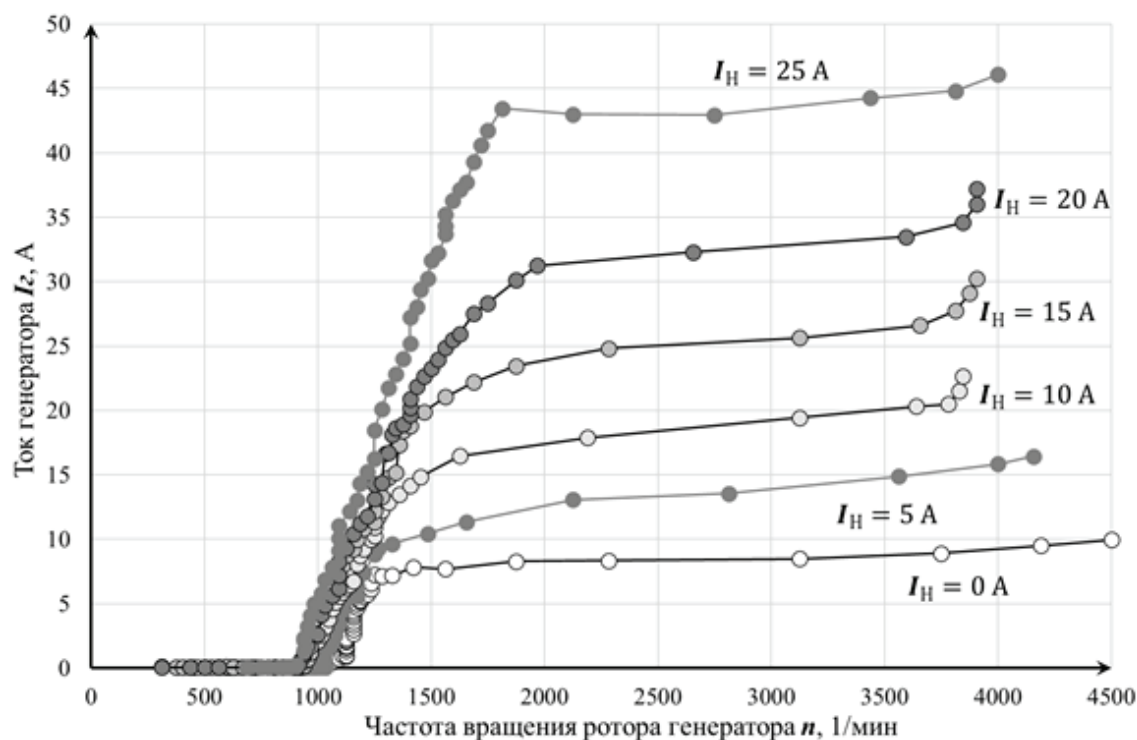


Рисунок 5. Изменение силы тока генератора при вариации нагрузки и частоты вращения ротора генератора

Источник: разработано автором

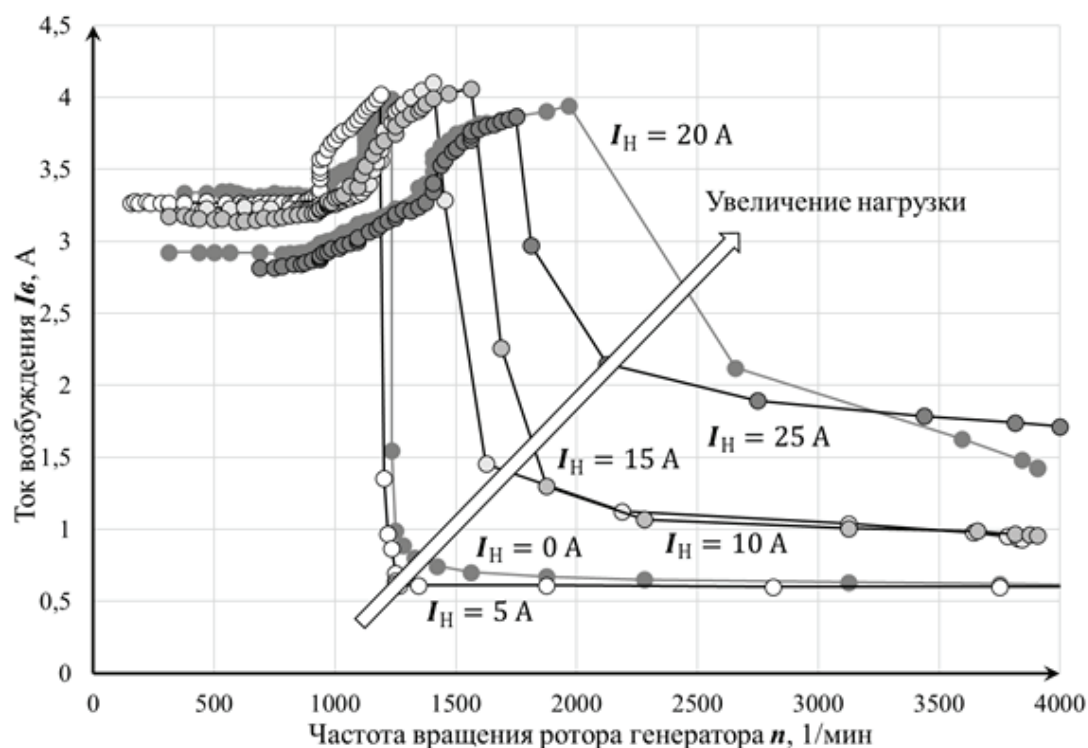


Рисунок 6. Изменение силы тока возбуждения генератора при вариации нагрузки и частоты вращения ротора генератора

Источник: разработано автором

На рисунке 7 показаны зависимости напряжения бортовой сети, имеющие три характерных участка: на начальном участке вся нагрузка СЭ приходится на АКБ, причём рост нагрузки приводит к резкому снижению напряжения (до величины $U = 10,4$ В

при токе нагрузки 25 А); следующий участок приводит к резкому увеличению напряжения благодаря работе генератора и, наконец, последний участок характеризуется постоянством напряжения за счёт работы регулятора напряжения.

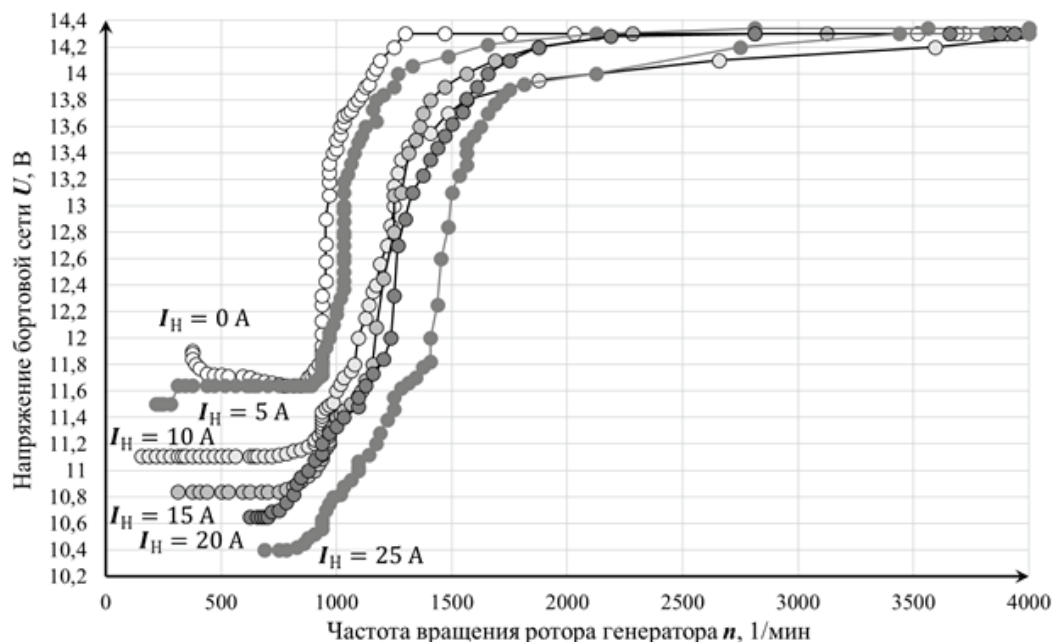


Рисунок 7. Изменение напряжения бортовой сети при вариации нагрузки и частоты вращения ротора генератора

Источник: разработано автором

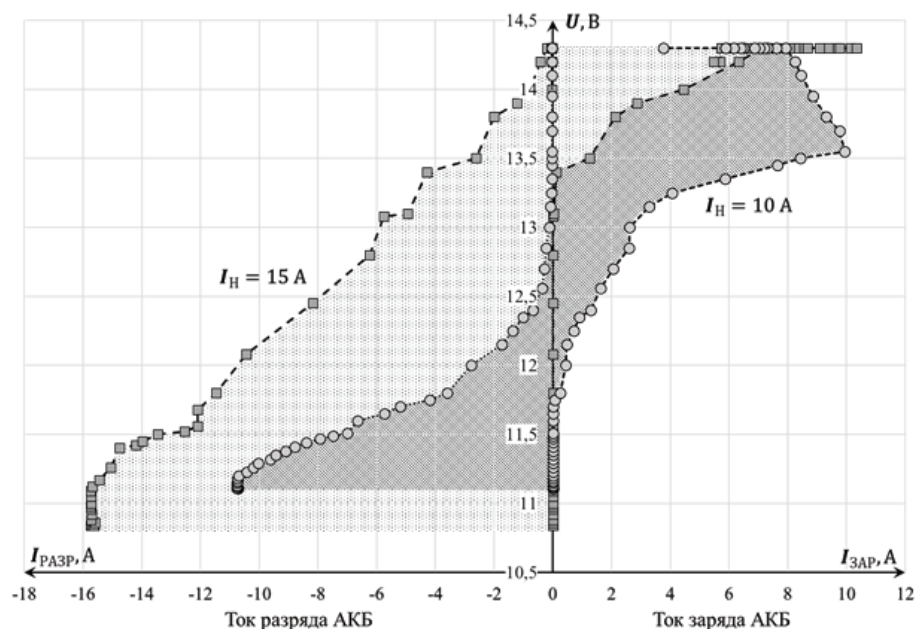


Рисунок 8. Зависимость напряжения бортовой сети от тока АКБ

Источник: разработано автором

¹ Пузаков А. В. Прогнозирование работоспособности генераторов транспортных средств: монография. – Оренбург: Университет, 2019. – 332 с.

На рисунке 8 приведено построение зависимости напряжения бортовой сети от тока АКБ (характеристическая кривая СЭ) для двух значений тока нагрузки ($I_n = 10$ А и $I_n = 15$ А).

Эффективность работы СЭ в этом случае можно косвенно оценить по отношению площадей, ограниченных зарядным и разрядным токами АКБ. При токе нагрузки равном 10 А энергия, сообщаемая генератором АКБ (тёмная заштрихованная площадь, расположенная справа от оси ординат) превышает энергию, расходуемую на работу потребителей (тёмная заштрихованная площадь, расположенная слева от оси ординат). При увеличении тока нагрузки до 15 А баланс энергии смещается в сторону разрядной части.

Выводы

В процессе работы автомобиля происходит динамическое перераспределение электроэнергии, расходуемой на нужды потребителей между устройствами генерации электроэнергии (генератор) и устройствами хранения электроэнергии (АКБ).

Динамическая характеристическая кривая СЭ представляет собой изменение напряжения АКБ по отношению к току АКБ во время цикла движения.

На работу СЭ оказывает влияние изменение нагрузки, скорости движения, погодных-климатических факторов и технического состояния элементов СЭ¹. Следовательно, изменение параметров СЭ в процессе работы автомобиля может быть использовано для диагностирования технического состояния его элементов.

Разработано пять режимов нагружения, совокупность которых позволит воссоздать полную картину изменения параметров бортовой сети с целью оценки технического состояния СЭ автомобиля.

Установлен характер изменения параметров СЭ при вариации нагрузки и частоты вращения ротора генератора.

Дальнейшие исследования будут направлены на определение изменения напряжения бортовой сети в процессе работы СЭ автомобиля при возникновении и развитии неисправностей генератора и АКБ, методика моделирования которых изложена в [11, 12].

Литература

1. Пузаков А. В. Инструментальный контроль зарядного баланса транспортных средств // Вестник гражданских инженеров. – 2020. – № 5(82). – С. 30–34.
2. Adamiec, M., Dziubiński, M. and Siemionek, E. (2018) Research of the alternator on the stand-efficiency aspect. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 421. 10.1088/1757-899X/421/2/022001.
3. Adamiec, M., & Dziubiński, M., & Siemionek, E. (2017) Diagnostics methods in condition assessment of automotive starting battery. *Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*. 10. p. 677–681.
4. Demirci, O., Demirci, B., and Taskin, S. (2019) Battery Cell Measurement and Fault Diagnosis System for Detection of Problem in Automotive Batteries. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*. 25. pp. 546–552.
5. Diebig, M., Frei, S., Reitingner, H. and Ullrich, C. (2010) Modeling of the automotive power supply network with VHDL-AMS. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*. pp. 1–6. 10.1109/VPPC.2010.5729074.
6. Kodali, A., Zhang, Y., Sankavaram, Ch., Pattipati, K. and Salman, M. (2013) Fault diagnosis in the automotive electric power generation and storage system (EPGS) *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 18. pp. 1809–1818.
7. Li, W., Suozzo, C., Onori, S., Rizzoni, G., Salman, M.A. and Zhang, F. (2008) Experimental calibration and validation of fault diagnosis of automotive electric power generation system. *Proc. ASME Dynam. Syst. Control Conf.* pp. 1317–1324.
8. Mazlan, R. K., Dan, R. M., Zakaria, M. Z. and Hamid, A.H.A. (2017) Experimental study on the effect of alternator speed to the car charging system. *MATEC Web of Conferences*. 90. 10.1051/matecconf/20179001076.
9. Nagashima, N., Nishimura, R., Ochiai, R., Fujita, G. and Fukuda, T. (2007) Construction of Highly-Accurate Simulation Model in Automobile's Power System. *7th WSEAS International Conference on Electric Power System, High Voltages, Electric Machines*.
10. Parkash, V., Kumar, D., Kumar, Ch. and Rajoria, R. (2013) Failure mode and effect analysis of automotive charging system *Int. journal of software & hardware research in engineering*. 3. pp. 53–57.
11. Puzakov, A. (2019) Physical modeling of failures of the automotive alternator. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 643. 10.1088/1757-899X/643/1/012019.
12. Puzakov, A. and Smirnov, D. (2020). Physical simulation of the faults of starter batteries. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 971. 10.1088/1757-899X/971/5/052066.
13. Unutulmaz, M. G. and Ergene, L. T. (2013) Excitation current control of a claw pole automotive alternator". *3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems*, pp. 1–6.
14. Wang, S., Wang, L., Shen, P. and Liu, B. (2008) Monitoring system for vehicle power supply based on CAN bus. *Eighth Int. Conf. on Intelligent Systems Design and Applications (Kaohsiung)*, pp. 323–326. 10.1109/ISDA.2008.32.

15. Weibin, W., Yue, F. T., Junyi, D., Pengbo, X., Yunlin, F., Tiansheng, H., Jiewei, C. and Luoshi, L. (2014). Integrated Durability of Automobile Alternator Test System Design Based on LabVIEW. *The Open Mechanical Engineering Journal*, 8, pp. 839–845.

References

1. Puzakov, A. V. (2020) [Instrumental monitoring of vehicle charging balance] *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov* [Bulletin of Civil Engineers]. Vol. 5(82), pp. 30–34. (In Russ.).
2. Adamiec, M., Dziubiński, M. and Siemionek, E. (2018) Research of the alternator on the stand-efficiency aspect. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 421. 10.1088/1757-899X/421/2/022001.
3. Adamiec, M., & Dziubiński, M., & Siemionek, E. (2017) Diagnostics methods in condition assessment of automotive starting battery. *Autobusy, Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*. Vol. 10, pp. 677–681. (In Engl.).
4. Demirci, O., Demirci, B., and Taskin, S. (2019) Battery Cell Measurement and Fault Diagnosis System for Detection of Problem in Automotive Batteries. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*. Vol. 25, pp. 546–552. (In Engl.).
5. Diebig, M., Frei, S., Reiting, H. and Ullrich, C. (2010) Modeling of the automotive power supply network with VHDL-AMS. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 1-6. 10.1109/VPPC.2010.5729074. (In Engl.).
6. Kodali, A., Zhang, Y., Sankavaram, Ch., Pattipati, K. and Salman, M. (2013) Fault diagnosis in the automotive electric power generation and storage system (EPGS) *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. Vol.18, pp. 1809–1818. (In Engl.).
7. Li, W., Suozzo, C., Onori, S., Rizzoni, G., Salman, M. A. and Zhang, F. (2008) Experimental calibration and validation of fault diagnosis of automotive electric power generation system. *Proc. ASME Dynam. Syst. Control Conf.*, pp. 1317–1324. (In Engl.).
8. Mazlan, R. K., Dan, R. M., Zakaria, M. Z. and Hamid, A.H.A. (2017) Experimental study on the effect of alternator speed to the car charging system. *MATEC Web of Conferences*. 90.10.1051/mateconf/20179001076. (In Engl.).
9. Nagashima, N., Nishimura, R., Ochiai, R., Fujita, G. and Fukuda, T. (2007) Construction of Highly-Accurate Simulation Model in Automobile's Power System. *7th WSEAS International Conference on Electric Power System, High Voltages, Electric Machines*. (In Engl.).
10. Parkash, V., Kumar, D., Kumar, Ch. and Rajoria, R. (2013) Failure mode and effect analysis of automotive charging system *Int. journal of software & hardware research in engineering*. Vol. 3, pp. 53–57. (In Engl.).
11. Puzakov, A. (2019) Physical modeling of failures of the automotive alternator. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 643. 10.1088/1757-899X/643/1/012019. (In Engl.).
12. Puzakov, A. and Smirnov, D. (2020). Physical simulation of the faults of starter batteries. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 971. 10.1088/1757-899X/971/5/052066. (In Engl.).
13. Unutulmaz, M. G. and Ergene, L. T. (2013) Excitation current control of a claw pole automotive alternator". *3rd International Conference on Electric Power and Energy Conversion Systems*, pp. 1–6. (In Engl.).
14. Wang, S., Wang, L., Shen, P. and Liu, B. (2008) Monitoring system for vehicle power supply based on CAN bus. *Eighth Int. Conf. on Intelligent Systems Design and Applications (Kaohsiung)*, pp. 323–326. 10.1109/ISDA.2008.32 (In Engl.).
15. Weibin, W., Yue, F. T., Junyi, D., Pengbo, X., Yunlin, F., Tiansheng, H., Jiewei, C. and Luoshi, L. (2014). Integrated Durability of Automobile Alternator Test System Design Based on LabVIEW. *The Open Mechanical Engineering Journal*. Vol. 8, pp. 839–845. (In Engl.).

Информация об авторе:

Андрей Владимирович Пузаков, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технической эксплуатации и ремонта автомобилей, Оренбургский государственный университет, Оренбург, Россия

ORCID ID: 0000-0002-9754-8165, **Researcher ID:** G-3297-2015, **Scopus Author ID:** 57212170587

e-mail: andrew78@yandex.ru

Статья поступила в редакцию: 19.11.2020; принята в печать: 12.02.2021.

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Information about the author:

Andrey Vladimirovich Puzakov, PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Technical Operation and Repair of Cars, Orenburg State University, Orenburg, Russia

ORCID ID: 0000-0002-9754-8165, **Researcher ID:** G-3297-2015, **Scopus Author ID:** 57212170587
e-mail: and-rew78@yandex.ru

The paper was submitted: 19.11.2020.

Accepted for publication: 12.02.2021.

The author has read and approved the final manuscript.