

УДК 621.313

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ БЕСЩЕТОЧНОГО ГЕНЕРАТОРА С ИНТЕГРИРОВАННЫМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ

Ю.В. Зубков

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

***Аннотация.** При разработке бесщеточных электрических генераторов (БЭГ) для автономных энергетических установок важными являются вопросы обеспечения качества вырабатываемой электроэнергии и достижения улучшенных массогабаритных и энергетических показателей. Эти проблемы решаются посредством применения новых конструктивных и схемных решений при проектировании и производстве БЭГ. Экспериментальная проверка реализованных технических идей, подтверждающая адекватность теоретических моделей и соответствие качества БЭГ, является актуальной задачей. Экспериментальные исследования проведены на опытных образцах БЭГ с интегрированным возбуждением. Приведены энергетические и массогабаритные показатели разработанных генераторов и их аналогов, исследованы статические и динамические характеристики. Подтверждено качество электрической энергии, генерируемой БЭГ. Определены постоянные времени, характеризующие быстрдействие системы стабилизации напряжения по контуру возбуждения.*

***Ключевые слова:** бесщеточный генератор, экспериментальные исследования, статические и динамические характеристики.*

В современных публикациях по теоретическому исследованию и практической реализации электромашинных источников электроэнергии малой и средней мощности для автономных энергетических установок (АЭУ) большое внимание уделяется бесщеточным генераторам с электромагнитным возбуждением [1-4]. В таких источниках, обеспечивающих электрической энергией потребителей, остро нуждаются, например, автомобильная промышленность, авиация, бронетанковая техника нового поколения с повышенной энерговооруженностью. К ним часто предъявляются жесткие требования по массе и габаритным размерам ввиду их размещения в зоне главных двигателей. Эти машины эксплуатируются при повышенной температуре окружающей среды, достигающей 100 °С, что предполагает нагрев активных частей генератора до 200 °С и выше. Столь жесткие условия накладывают существенные ограничения при выборе проводниковых и изоляционных материалов.

В то же время современные отечественные потребители, эксплуатирующие АЭУ, не спешат с заменой устаревших, морально изношенных, зачастую коллекторных электромашинных источников на современные бесщеточные.

В период с 2014 по 2017 гг. сотрудники кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование» СамГТУ совместно с НПО «Шторм» участвовали в разработке и освоении опытной партии бесщеточных электрических генераторов для ОАО «Барнаултрансмаш», которые предназначались для замены

Зубков Юрий Валентинович (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Электромеханика и автомобильное электрооборудование».

применяемых ранее коллекторных генераторов. В процессе работы ставилась задача повышения удельной мощности и улучшения энергетических показателей. В результате проведенной работы были спроектированы, изготовлены и прошли исследовательские испытания [5] синхронный генератор Г-408, выполненный по каскадной схеме [6], и бесщеточный электрический генератор с интегрированным возбуждением Г-409 [7].

Для сравнения основных характеристик разработанных и серийно выпускаемых промышленностью генераторов, предназначенных для использования на стационарных агрегатах и передвижных транспортных средствах в качестве низковольтных источников постоянного тока, были определены следующие электрические генераторы:

- генератор с когтеобразным индуктором ВГ-8К1;
- коллекторный генератор ВГ-7500.

Основные технические данные выпускаемых промышленностью и разработанных авторским коллективом генераторов приведены в таблице.

Технические данные генератора с интегрированным возбудителем и его аналогов

Параметр	Тип генератора			
	ВГ-8К1	ВГ-7500	Г-408	Г-409
Номинальная мощность P_n , кВт	8	9	18	12
Номинальное напряжение U_n , В	28,5	28,5	28,5	28,5
Номинальная частота вращения n_n , об/мин	3000	7200	7200	7340
Рабочий диапазон частот вращения, об/мин	2500÷6500	4000÷8000	4000÷8000	4000÷8000
Температура окружающей среды $T_{окр}$, °С	-50÷+60	-50÷+70	-50÷+100	-50÷+100
Масса M , кг	60	26	32	20
Удельная масса m , кг/кВт	7,5	2,9	1,78	1,67
Удельная мощность p , кВт/кг	0,13	0,35	0,56	0,60
Мощность возбуждения P_{jn} , Вт	250	266	232	178
Коэффициент усиления по мощности k_p , о.е.	32	34	78	67
Номинальный КПД η_n , о.е.	0,75	0,77	0,75	0,8

Анализируя данные таблицы, можно заметить, что генератор с интегрированным возбуждением превосходит по основным критериям (удельная мощность, КПД, мощность возбуждения) не только генераторы с клювообразным ротором, двухкаскадный синхронный, но и коллекторный генератор. Таких результатов удалось достичь прежде всего за счет реализации разработанных при синтезе процедур оптимизационного поиска и применения новых авторских технических решений.

С целью проверки адекватности теоретических моделей, лежащих в основе разработки генератора, опытный образец БЭГ с интегрированным возбудителем подвергался испытаниям на соответствие статическим и динамическим показателям: величина изменения и качество выходного напряжения, значение постоян-

ных времени переходных процессов по управляющему и возмущающему воздействиям, точность стабилизации напряжения при изменении нагрузки и т. д.

На рис. 1, 2 показаны экспериментальные (сплошная линия) и рассчитанные по математической модели (прерывистая линия) внешние характеристики в разомкнутой и замкнутой системе стабилизации напряжения соответственно.

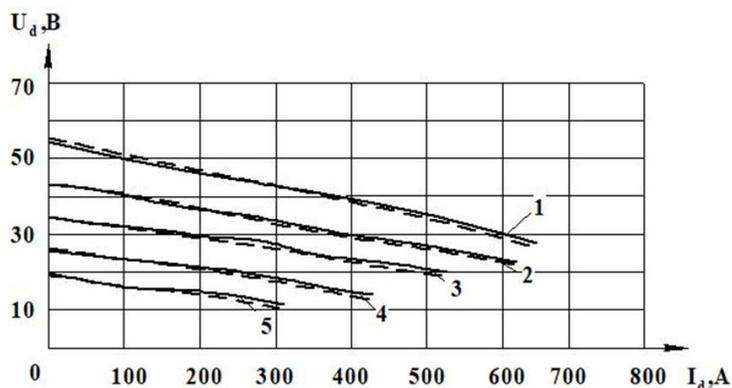


Рис. 1. Внешние характеристики БЭГ при:
1 – 7200 об/мин; 2 – 6000 об/мин; 3 – 5000 об/мин; 4 – 4000 об/мин; 5 – 3000 об/мин

Относительное расхождение экспериментальных и теоретических характеристик не превышает 7 %, что указывает на адекватность используемой математической модели. Система автоматического регулирования поддерживает стабильное напряжение в диапазоне изменения нагрузки $(0,05 \div 1,05) I_{dн}$.

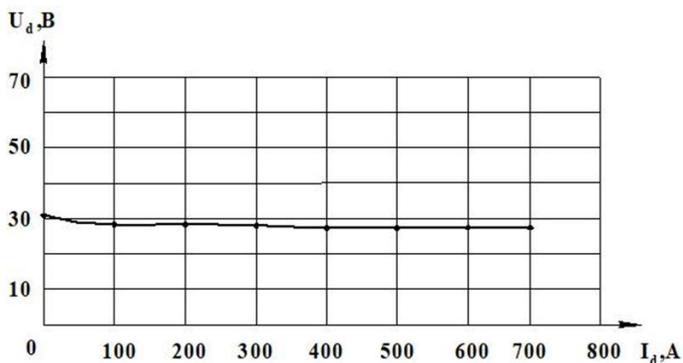


Рис. 2. Внешняя характеристика БЭГ с регулятором напряжения

Автором предложено оригинальное техническое решение, позволяющее стабилизировать выходное напряжение БЭГ посредством воздействия на величину тока возбуждения основного генератора. На рис. 3 показана принципиальная электрическая схема, поясняющая суть решения.

БЭГ состоит из $2p_2$ -полюсного синхронного генератора (СГ) с обмоткой возбуждения w_2 на роторе и m_S -фазной якорной обмоткой w_S на статоре, подключенной к выпрямителю В2. К выходным зажимам последовательно с нагрузкой подключена однофазная обмотка w_0 , выполненная с числом полюсов $4p_2 \cdot m_S$. В магнитную систему генератора интегрирован возбудитель (СВ), представляющий собой $2p_1$ -полюсную трехфазную синхронную машину с об-

моткой возбуждения w_f на статоре и обмоткой якоря w_R на роторе, которая подключена к обмотке возбуждения генератора w_2 через однополупериодный выпрямитель В1. Обмотка w_R выполнена электрически совмещенной и возбуждает одновременно $2p_1$ -полюсное вращающееся и $2p_3 = 3 \cdot 2p_1$ -полюсное неподвижное в пространстве магнитные поля.

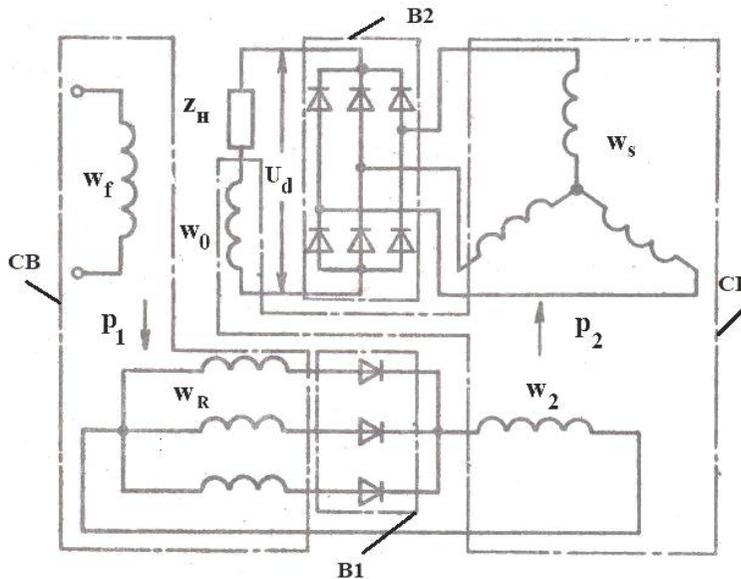


Рис. 3. Электрическая схема БЭГ с компаундированием

Генератор работает следующим образом. При питании обмотки w_f постоянным током и вращении ротора в обмотке w_R индуцируется ЭДС частоты $f_R = \frac{p_1 \cdot n}{60}$ и по обмоткам w_R и w_2 протекает выпрямленный ток. Переменная составляющая этого тока в обмотке w_R создает магнитное поле реакции якоря возбудителя. Обмотка w_2 , обтекаемая выпрямленным током, создает поле возбуждения основного генератора, которое при вращении ротора индуцирует в силовой обмотке w_s ЭДС частоты $f_S = \frac{p_2 \cdot n}{60}$. При работе под нагрузкой по обмотке w_0 протекает ток, величина которого определяется сопротивлением нагрузки и суммой ЭДС обмотки w_s и ЭДС, индуцируемой в обмотке w_0 $2p_3$ -полюсным магнитным полем, созданным постоянной составляющей тока обмотки w_R . Таким образом, за счет магнитной связи обмоток w_R и w_0 при уменьшении нагрузки и увеличении выпрямленного напряжения U_d ток в обмотке w_R уменьшается, что приводит в итоге к падению ЭДС обмотки w_s и уменьшению выходного напряжения БЭГ.

Помимо эффекта стабилизации напряжения при изменении нагрузки предложенная схема БЭГ дает существенное снижение пульсации выпрямленного напряжения. Например, при работе в режиме холостого хода выходное напряже-

ние БЭГ содержит кроме постоянной составляющей переменную, частота которой в $2m_S$ раз выше частоты ЭДС обмотки w_S . Постоянная составляющая тока обмотки w_R индуцирует в обмотке w_0 ЭДС частоты $f_0 = \frac{p_3 \cdot n}{60} = 2m_S \cdot f_S$. Обмотка w_0 включена последовательно в цепь нагрузки таким образом, что ее ЭДС сдвинута по фазе на угол 180° относительно переменной составляющей напряжения U_d . На рис. 4 показана форма выходного выпрямленного напряжения U_d , ЭДС обмотки w_0 и напряжения на нагрузке.

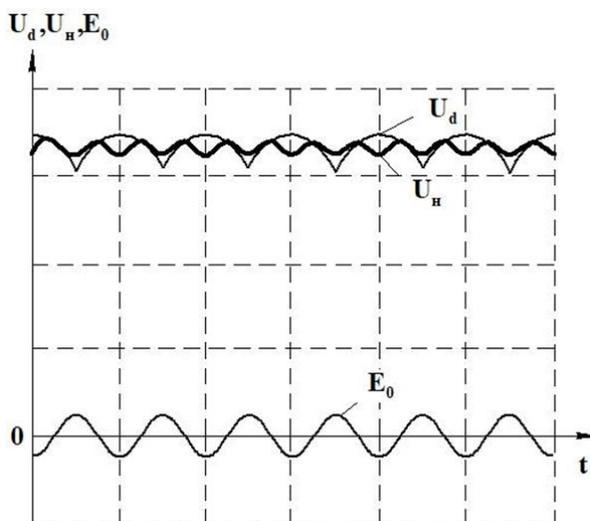


Рис. 4. Пульсации выходного напряжения БЭГ

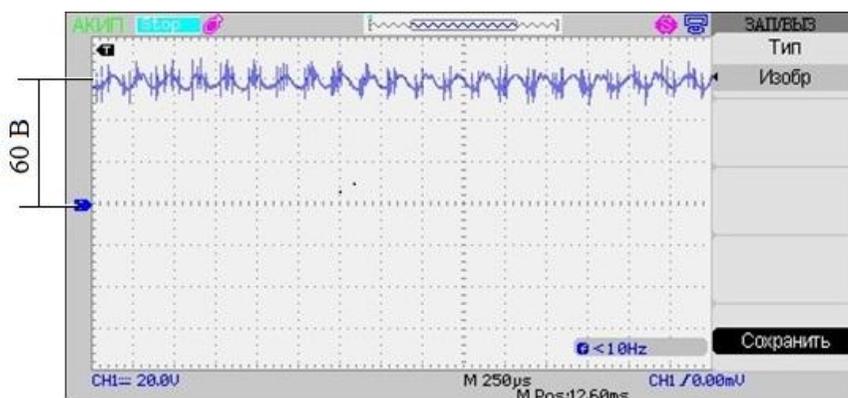


Рис. 5. Напряжение холостого хода $n = 7200 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$, $U_d = 59\text{В}$, $k_{\text{пуль}} = 8,5\%$

За счет реализации предложенного технического решения коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения $k_{\text{пуль}}$ был снижен по сравнению с аналогами на $(2 \div 4)\%$.

Оценка качества генерируемой БЭГ энергии получена из экспериментальных осциллограмм, показанных на рис. 5, 6.

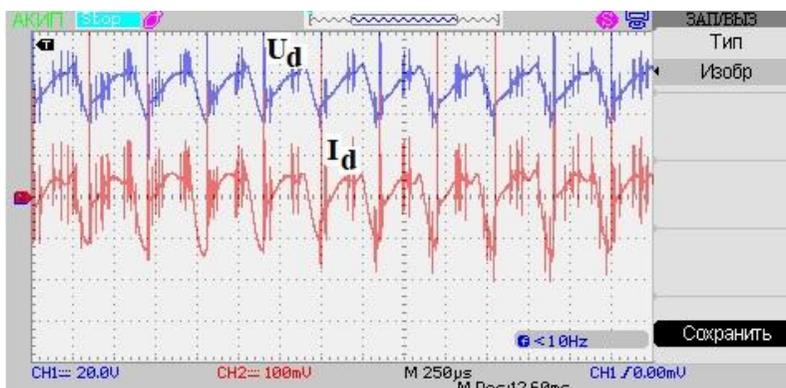


Рис. 6. Осциллограммы напряжения и тока при нагрузке $U_d = 53B, I_d = 105A$

Регистрация данных проводилась цифровым осциллографом АКИП 4115А с использованием датчика тока компенсационного типа LTC 1000-SI/SP98 для электронного преобразования тока – постоянного, переменного, импульсного в пропорциональный выходной ток с гальванической развязкой между первичной (силовой) и вторичной (измерительной) цепями.

На рис. 7 показана осциллограмма переходного процесса в цепи якоря БЭГ при включении возбуждения в нагрузочном режиме работы.

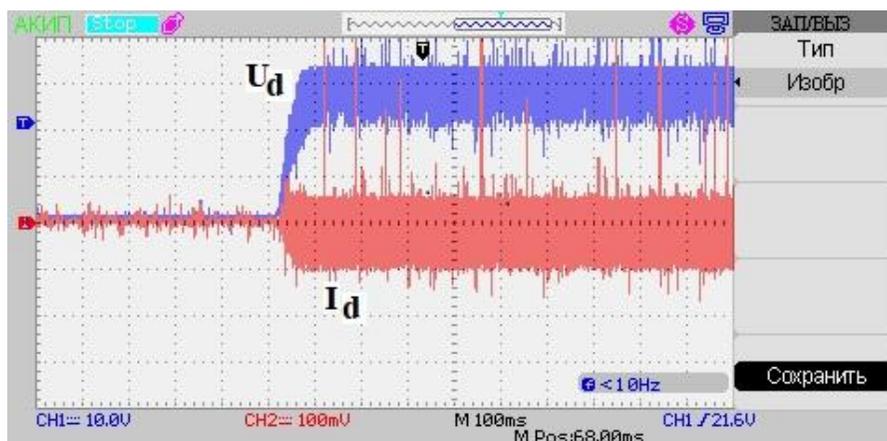


Рис. 7. Осциллограмма выпрямленного напряжения и тока при включении возбуждения в режиме номинальной нагрузки $U_d = 28B, I_d = 650A$

Анализ переходного процесса показывает, что время установления напряжения в обмотке якоря при внезапном изменении напряжения возбуждения не превышает в нагрузочном режиме 50 мс, что указывает на хорошее быстродействие БЭГ по контуру регулирования напряжения. Электромагнитная постоянная времени генератора как объекта регулирования, наибольший вклад в величину кото-

рой вносит индуктивность обмотки возбуждения возбудителя, весьма близка к расчетной теоретической величине $T_{эм} = 0,058$ с.

При исследовании магнитного поля генератора методом конечных элементов установлено, что с точки зрения увеличения быстродействия системы автоматического регулирования напряжения магнитную систему возбудителя следует выполнять более насыщенной.

Выводы

1. Теоретические положения и практические рекомендации, изложенные в настоящей статье, стали основой при разработке гаммы бесщеточных синхронных машин малой и средней мощности (генераторов с интегрированным возбуждением), изготовленных и испытанных на профильных предприятиях электротехнической отрасли.

2. Результаты испытаний бесщеточного генератора с интегрированным возбуждением, изготовленного НПО «Шторм» по заказу АО «Барнаултрансмаш», подтвердили все основные теоретические положения и рекомендации, предложенные автором. Генератор отличается от известных аналогов повышенным на 7 % КПД, сниженной на 70 % удельной массой, более высоким быстродействием по цепям возбуждения и нагрузки.

3. Адекватность моделей генератора с интегрированным возбуждением по длительности, характеру переходных процессов подтверждена экспериментальными данными.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Зубков Ю.В.* Имитационное моделирование вентильного генератора совмещенного типа // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2016. – № 1(49). – С. 96–102.
2. *Nøland J.K.* Design and characterization of a rotating brushless outer pole PM exciter for a synchronous generator / J.K. Nøland, F. Evestedt, J.J. P´erez-Loya [et al] // IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 14, no. 8, 2015. – P. 1–11.
3. *Shahnazari M.* Improved dynamic average modeling of brushless excitation system in allrectification modes / M. Shahnazari, A. Vahedi // IET Electric Power Applications. – 2010, vol. 4, no. 8. – P. 657–669.
4. *Yu W.* Comparison of hybrid excitation topologies for flux-switching machines / W. Yu, D. Zhiguan // IEEE Trans. Magn., 48(9), 2017. – P. 2518–2527.
5. *Жерве Г.К.* Промышленные испытания электрических машин. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 407 с.
6. *Бут Д.А.* Бесконтактные электрические машины. – М.: Высшая школа, 1985. – 225 с.
7. *Зубков Ю.В., Давидков А.И.* Бесщеточный генератор с интегрированным гибридным возбуждением // Труды Международной научно-практической конференции «Ашировские чтения», Самара, 2017. – С. 686–691.

Статья поступила в редакцию 3 февраля 2018 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF BRUSHLESS GENERATOR WITH INTEGRATED EXCITER

Yu. V. Zubkov

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

Abstract. When developing brushless electric generators (BEG) for autonomous power plants, it is important to ensure the quality of generated electricity and achieve improved mass and size and energy performance. These problems are solved through the use of new design and circuit solutions in the design and production of BEG. The experimental verification of realized technical ideas, confirming the adequacy of theoretical models and the conformity of BEG quality, is an actual task. Experimental studies were carried out on experimental BEG samples with integrated excitation. Energy and mass-dimensional parameters of the developed generators and their analogs are given, static and dynamic characteristics are investigated. The quality of electrical energy generated by BEG was confirmed. The time constants characterizing the speed of the voltage stabilization system along the excitation circuit are determined.

Keywords: brushless generator, experimental studies, static and dynamic characteristics.