

## Особенности проектирования малогабаритной автономной системы генерирования постоянного тока

ИШУТИНОВ В.В., САВИН А.А., ШИЛОВ А.В.

*Представлены требования, предъявляемые к автономным малогабаритным системам генерирования постоянного тока, рассмотрены основные особенности таких систем. Проанализировано несколько концепций построения рассматриваемых систем генерирования — на базе индукторного генератора, синхронного генератора с комбинированным возбуждением и синхронного генератора с постоянными магнитами. По результатам анализа были выявлены достоинства и недостатки каждой из рассмотренных систем и выбрана концепция на базе синхронного генератора с постоянными магнитами с внешним ротором и повышенным напряжением. Одной из основных составных частей блока регулирования является DC-DC-преобразователь. Он позволяет регулировать напряжение при изменении частоты генератора в широком диапазоне и значительно снизить пульсации выходного напряжения. Для определения особенностей моделирования автономной малогабаритной системы генерирования с помощью системы ANSYS рассматривались две конструкции генератора: с внутренним и внешним ротором. С помощью моделирования дана оценка качества работы каждой конструкции генератора и подтверждена отдаваемая мощность системы генерирования.*

**Ключевые слова:** автономная система генерирования, постоянный ток, синхронный генератор, постоянные магниты, высокие значения частоты вращения, моделирование системы генерирования

Перед отечественным машиностроением стоит ряд актуальных задач по разработке электрооборудования автономных объектов с качественно новыми показателями. Это связано с необходимостью масштабного обновления автономных объектов, а также с рядом серьезных успехов в смежных областях — электромашиностроении, электронике, программном обеспечении. При этом одна из важнейших задач — создание автономных малогабаритных систем генерирования (АМСГ) постоянного тока с низкими пульсациями выходного напряжения. Основные требования к таким системам:

номинальная полезная мощность генератора, кВт	1,8–3,5
диапазон частот вращения генераторов (приводных двигателей), об/мин	65000--88000
номинальное напряжение в точке регулирования, В	27
диапазон значений напряжения в точке регулирования в установившемся режиме в заданном диапазоне частоты регулирования, В	26–28
КПД, %	не менее 90
полный объем генератора, дм <sup>2</sup>	не более 0,15
полная масса генератора, кг	не более 1,5
полный объем блока регулирования, дм <sup>3</sup>	не более 10
максимальная рабочая температура, °С	300
охлаждение	продув воздухом ( $t=100^{\circ}\text{C}$ )

Специфические особенности АМСГ постоянного тока:

высокие значения частоты вращения приводного двигателя (до 88000 об/мин), а значит и генератора, что оказывает влияние на магнитные потери в генераторе и на прочность его конструкции;

высокое значение полезной мощности (до 3,5 кВт) при небольшом объеме и значительном ограничении по наружному диаметру (всего 45 мм) при сравнительно небольшой массе генератора; при этом удельная мощность может составлять не менее 3 кВт/кг;

ухудшение условия отвода тепла от генератора из-за малых объемов и повышенной температуры окружающей среды;

малый объем блока регулирования.

Вышеперечисленные особенности учитываются при проектировании АМСГ и его изготовлении.

В прошлом концепции построения таких систем предполагали, что выходное напряжение генератора регулируется за счет обмотки возбуждения с помощью блока регулирования. При этом конструктивно генератор представлял собой индукторную машину с традиционной трехфазной обмоткой статора. Для снижения пульсаций выходного напряжения в пазах статора размещались две трехфазные обмотки, смещенные относительно друг друга на определенный угол. Ротор имел монолитную конструкцию с явно выраженными полюсами, а обмотка возбуждения располагалась неподвижно.

Такая конструкция имела как ряд достоинств:

простота, высокая технологичность и механическая прочность монолитного ротора;

простота, высокая технологичность обмотки возбуждения, представляющая собой катушку;

простота регулирования выходного напряжения генератора с помощью потока обмотки возбуждения,

так и существенных недостатков:

сложность выполнения обмотки статора из-за необходимости увеличения числа пазов в два раза по сравнению с традиционной обмоткой;

очень низкий КПД (не более 40%) для однопакетной конструкции, применяемой во всех аналогах;

ограничение по осевой длине машины, вызванное особенностями конструкции индукторного генератора (рекомендованное соотношение полной длины генератора к наружному диаметру 0,3–0,4 [1]);

необходимость в источнике питания для обмотки возбуждения, в качестве которого могут использоваться подвозбудитель или аккумуляторная батарея, а следовательно, увеличение массы и снижение автономности всей системы.

Анализ и предварительные расчеты показали, что неплохие показатели имеет система генерирования, построенная на базе генератора с комбинированным возбуждением. Обладая преимуществами системы генерирования, построенной на базе индукторного генератора (простота реализации регулирования выходного напряжения), она в то же время имеет более высокое значение удельной мощности на единицу массы и, соответственно, в два раза больший КПД и в два раза меньшую массу. Однако данная конструкция не лишена недостатков, главный из которых — ограничение по мощности регулирования, которая может составлять не более 25% полезной мощности, что оказывается недостаточным.

Наилучшими энергетическими и массогабаритными показателями из трех типов генераторов — индукторного, синхронного с комбинированным возбуждением, синхронного с постоянными магнитами — обладает последний. Он имеет наибольший КПД, наименьшую массу, простую конструкцию, а значит, высоко технологичен и надежен. Его главный недостаток — невозможность регулирования выходного напряжения за счет самого генератора, поэтому для построения АМСГ на базе генератора с постоянными магнитами нужен новый подход к реализации как самого генератора, так и блока регулирования.

В дальнейшей работе по созданию АМСГ необходимо определиться с конструкцией синхронного генератора. Как показала предварительная проработка, возможны два варианта реализации конструкции: традиционный, когда ротор располагается внутри, а статор снаружи, и «специфический», когда ротор располагается снаружи, а статор внутри. Несмотря на всю «необычность» конструкции с внешним ротором, при расчетах она проявила себя лучше, чем конструкция с внутренним ротором; кроме того, применение такой конструкции позволяет в значительной степени упростить систему охлаждения генератора. В таблице представлены результаты предварительных расчетов трех разных типов генераторов.

Кроме того, немаловажным нововведением, позволившим реализовать предложенную концепцию АМСГ, стало увеличение выходного напряжения генератора до 180–240 В. Это позволило как обеспечить необходимый уровень регулирования напряжения, так и в значительной степени снизить пульсации выходного напряжения с помощью DC-DC преобразователя. Выход работы генератора

Параметры	Вид генератора, тип ротора		
	Индукторный, внутренний	Синхронный с комбинированным возбуждением, внутренний	Синхронный с постоянными магнитами, внутренний/внешний
Способ возбуждения генератора	Электромагнитное	Комбинированное	Магнитоэлектрическое
Вид охлаждения	Продув ( $t=100\text{ }^{\circ}\text{C}$ )		
Число фаз	5	3	3
Номинальная частота вращения генератора, об/мин	65000	65000	65000
Номинальная мощность, кВА	3,5	3,5	3,5
Коэффициент полезного действия, %	40	80	92/91
Класс нагревостойкости обмотки статора, $^{\circ}\text{C}$	250	250	250/250
Полный объем генератора, $\text{дм}^3$	0,90	0,79	0,22/0,12
Наружный диаметр генератора, мм	150	110	50/50
Полная масса генератора, кг	4,15	2,5	1,2/0,8
Материал статора	49К2ФА	2421	49К2ФА
Удельная мощность (по полной массе), кВА/кг	0,48	0,80	2,5/4,3

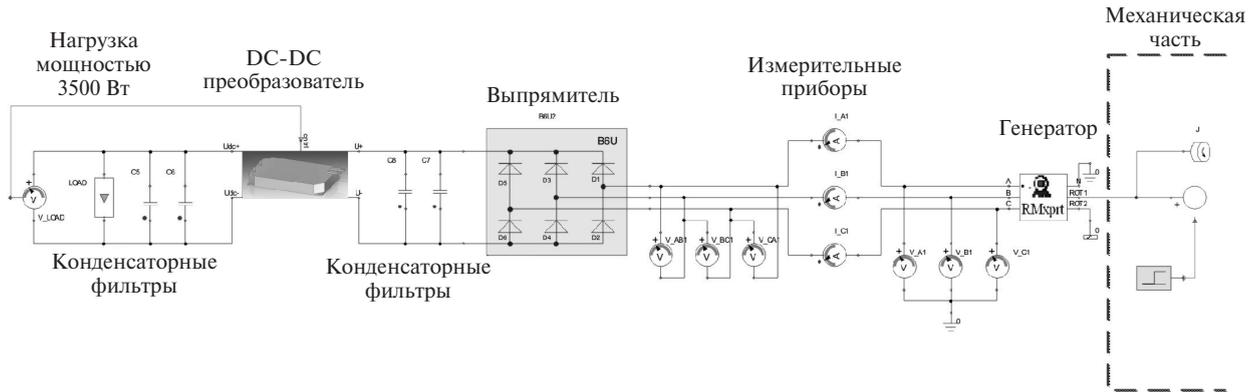


Рис. 1. Расчётная имитационная модель генератора с блоком выпрямления и стабилизации

в точку регулирования осуществляется с использованием выпрямителя и DC-DC преобразователя. При этом DC-DC преобразователь должен обеспечивать малые границы диапазона напряжения при большом диапазоне значений частоты вращения генератора.

Особенность работы генератора на выпрямительную нагрузку — в непрерывных повторяющихся несимметричных переходных процессах. Нелинейная нагрузка генератора — выпрямленная нагрузка — приводит к несинусоидальности кривых

напряжений и токов. По мере увеличения нагрузки кривые напряжений искажаются больше.

С помощью имитационной модели (рис. 1) оцениваются качество работы генератора на выпрямительную нагрузку, а также выход системы «генератор—блок выпрямления и стабилизации» на заданную выходную мощность.

Основные параметры электронной части имитационной модели:

падение напряжение на диоде, В	1,7
частота преобразования DC-DC преобразователя, кГц	550
уровень стабилизованного напряжения, В	27
мощность нагрузки, кВт	3,5
номиналы конденсаторов в фильтрах, мкФ	1; 100; 22; 0,47

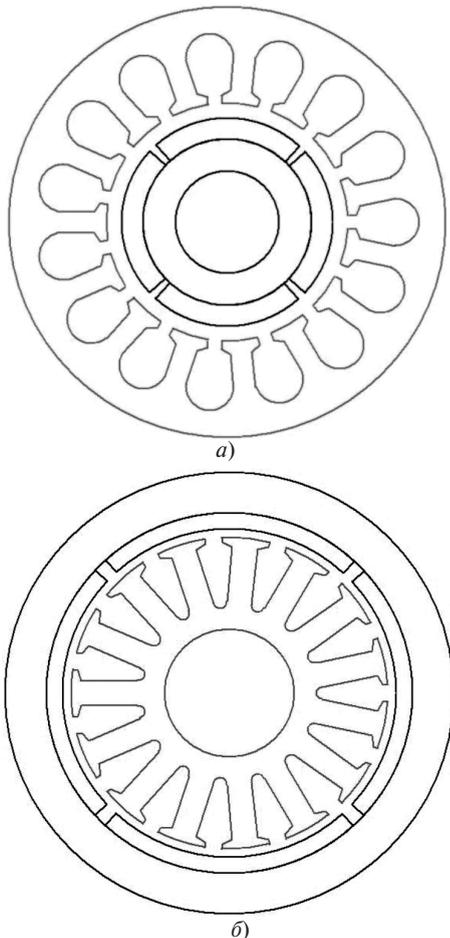


Рис. 2. Варианты конструкции генераторов: а — с внутренним ротором; б — с внешним ротором

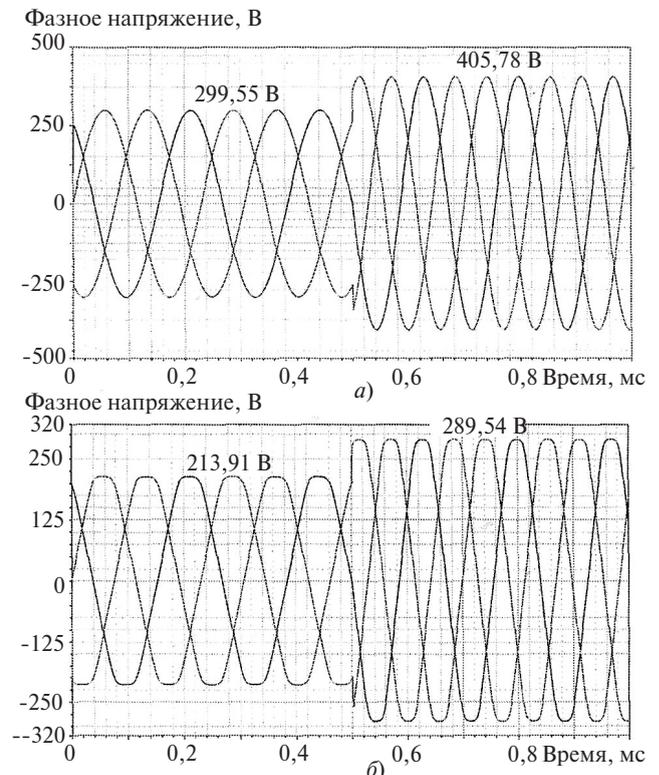


Рис. 3. Форма фазного напряжения генератора: а — с внутренним ротором; б — с внешним ротором

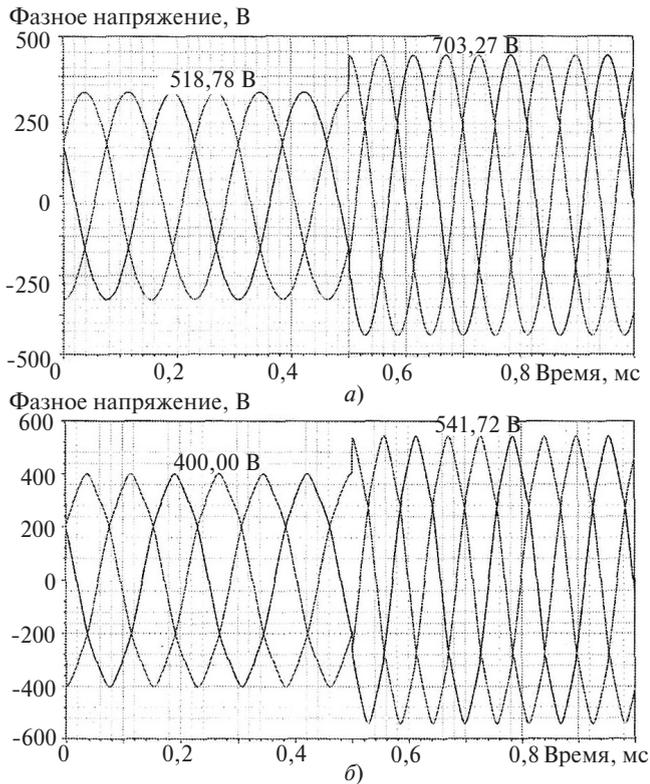


Рис. 4. Форма линейного напряжения генератора: *a* — с внутренним ротором; *b* — с внешним ротором

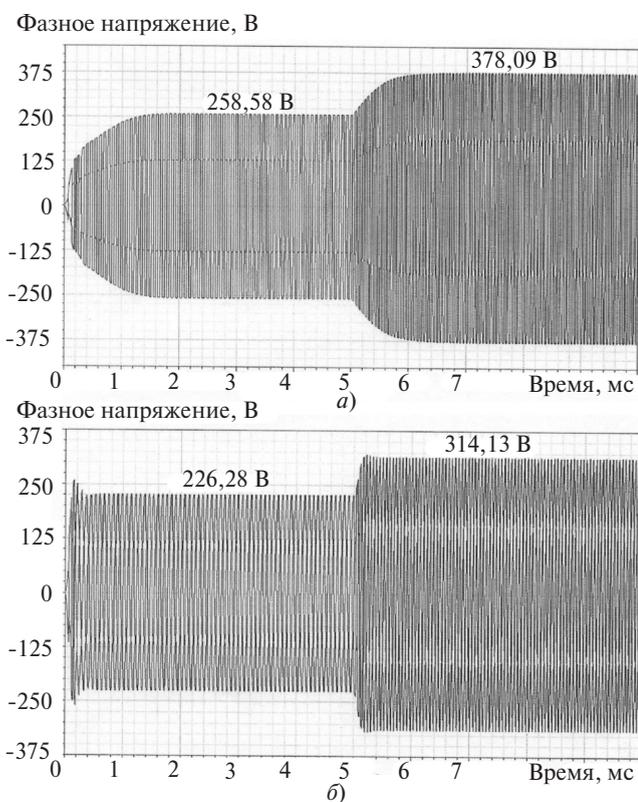


Рис. 5. Форма фазных напряжений генератора при работе на выпрямительную нагрузку: *a* — с внутренним ротором; *b* — с внешним ротором

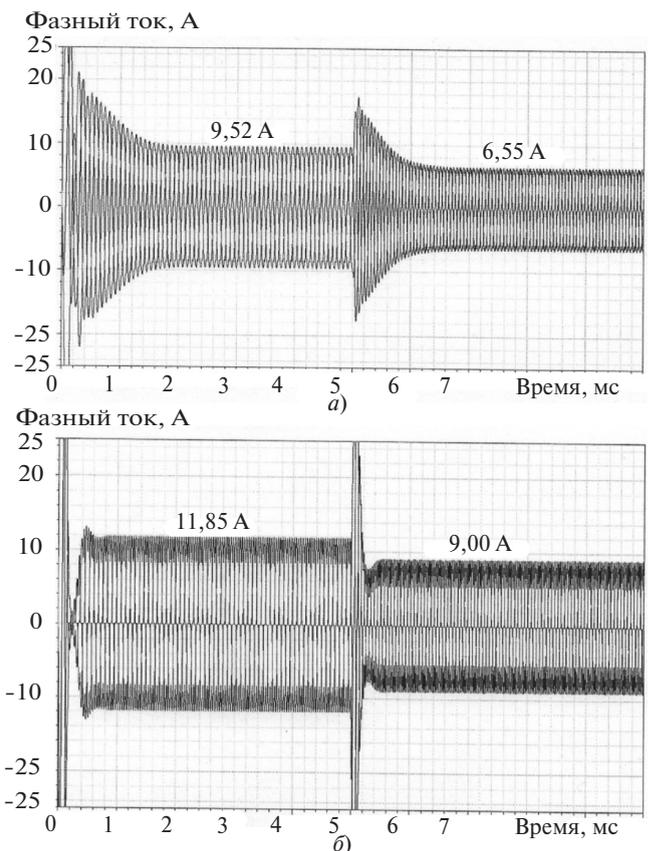


Рис. 6. Форма токов в фазах генератора: *a* — с внутренним ротором; *b* — с внешним ротором

При расчёте имитационной модели рассматривалось два варианта генератора и их работа на выпрямительную нагрузку (рис. 2, *a* и *b*).

На рис. 3 и 4 изображены кривые фазного и линейного напряжения генератора при частотах вращения 65000 и 88000 об/мин на холостом ходу.

Рисунки показывают, что кривые линейных и фазных напряжений у генератора с внутренним ротором менее искажены, чем у генератора с внешним ротором.

На рис. 5 показана форма фазных напряжений генератора при работе на выпрямительную нагрузку.

На рис. 6 изображена форма токов генератора при работе на выпрямительную нагрузку.

Кривые выходного напряжения системы генерирования показали, что оно стабилизируется при значении 27 В, а в момент скачкообразного изменения частоты вращения отклонение значения выходного напряжения не превышает 10% (согласно техническим условиям на DC-DC преобразователь).

Таким образом, обе конструкции генератора при выбранной схеме выпрямления и стабилизации напряжения позволяют получить выходную мощность 3500 Вт при стабилизированном значении напряжения 27 В.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **В.А. Балагуров.** Проектирование специальных электрических машин. М.: Высшая школа, 1982, 272 с.
2. **Постников И.М.** Проектирование электрических машин. Киев: Гос. изд-во техн. лит-ры УССР, 1960, 736 с.
3. **Зиновьев Г.С.** Основы силовой электроники: Учебник. Ч.1. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1999, 199 с.
4. **Основы преобразовательной техники:** Учебное пос. для вузов, 2-е изд./Под ред. О.З.Попкова. М.: Издат. дом МЭИ, 2007, 200 с.
5. **Хоровиц П., Хилл У.** Искусство схемотехники. Т. 1/Пер. с англ. М.: Мир, 1993, 413 с.

[29.03.2018]

*А в т о р ы:* **Ишутин Вячеслав Владимирович** окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) в 2009 г. по специальности «Электромеханика» В 2015 г. защитил кандидатскую диссертацию «Анализ и оптимизация вентильного электродвигателя для высокочастотного электропривода». Доцент кафедры электрических машин и аппаратов ВятГУ, руководитель проекта АО «ЛЕПСЕ».

**Савин Андрей Александрович** окончил ВятГУ в 2011 г. Инженер-конструктор 3 категории АО «ЛЕПСЕ».

**Шилов Андрей Владимирович** окончил ВятГУ в 2011 г. Инженер-конструктор 2 категории АО «ЛЕПСЕ».

Elektrichestvo, 2018, No. 9, pp. 39–43

DOI:10.24160/0013-5380-2018-9-39-43

## Specific Features of Designing a Compact Standalone DC Power-Generating System

**ISHUTINOV Vyacheslav V.** (JSC «LEPSE»; Vyatka State University (VyatGU), Kirov, Russia) – Head of the Project; Associate Professor of the Department, Cand. Sci. (Eng.)

**SAVIN Andrei A.** (JSC «LEPSE», Kirov, Russia) – 3-rd category engineer-designer

**SHILOV Andrei V.** (JSC «LEPSE», Kirov, Russia) – 2-nd category engineer-designer

*The requirements posed to standalone compact DC power-generating systems are presented, and the main specific features of such systems are considered. A few concepts of constructing such systems are considered, including those on the basis of an induction generator, a synchronous generator with combined excitation, and a permanent-magnet synchronous generator. An analysis of the considered systems was carried out, which made it possible to reveal advantages and drawbacks of each of them, and a concept involving the use of a permanent-magnet synchronous generator with an external rotor and an increased voltage level has been selected. A DC–DC converter is one of the control unit key constituent parts. Owing to this converter, it becomes possible to adjust the voltage in a wide generator frequency variation range and to obtain a significantly lower output voltage ripple. For determining the specific features of modeling a standalone compact power-generating system using the ANSYS software package, two generator design versions, one with an internal and the other with an external rotor, were considered. Based on the simulation results, the performance quality of each generator design has been estimated, and the generating system power output has been confirmed.*

**Key words:** standalone power-generating system, direct current, synchronous generator, permanent magnets, high rotation frequency values, generating system simulation

## REFERENCES

1. **Balagurov V.A.** *Proyektirovaniye spetsial'nykh elektricheskikh mashin* (Design of the special electrical machines). Moscow, Publ. «Vysshayashkola», 1982, 272 p.
2. **Postnikov I.M.** *Proyektirovaniye elektricheskikh mashin* (Design of the electrical machines). Kiyev, Ukraine State Publishing of Technical Literature, 1960, 736 p.
3. **Zinov'yev G.S.** *Osnovy silovoi elektroniki. Ch. 1* (Fundamentals of power electronics. Part 1). Novosibirsk, Publ. of the Novosibirsk State Technical University, 1999, 199 p.

4. **Popkov O.Z.** *Osnovy preobrazovatel'noi tekhniki, 2-ye izd.* (Fundamentals of Converter technology, 2nd ed.). Moscow, Publ. House of the Moscow Power Engineering Institute, 2007, 200 p.

5. **Khorovits P., Khill U.** *Iskissstvo skhemo-tekhniki, tom 1/Per. s angl.* (The art of circuit design, vol. 1/Ed. From English). Moscow, Publ. «Mir», 1993, 413p.

[29.03.2018]