

УДК 621.31

АВТОНОМНАЯ СИСТЕМА ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ НА БАЗЕ ДВИГАТЕЛЯ СТИРЛИНГА И МНОГОПОЛЮСНОЙ СИНХРОННОЙ МАШИНЫ

Д.Л. Калужский¹, А.Д. Мехтиев², А.С. Харитонов¹,
А.О. Дашинимаев¹, Д.А. Филиппов¹

¹ Новосибирский государственный технический университет

² Карагандинский государственный технический университет

В представленной статье исследуется система автономного электроснабжения, выполненная на базе двигателя внешнего сгорания. Проанализированы условия ее работы, осуществлен выбор многополюсного синхронного генератора, разработана функциональная схема, обеспечивающая стабильное выходное напряжение при варьировании теплового режима и уровня нагрузки.

Ключевые слова: двигатель Стирлинга, многополюсный генератор, регулирование напряжения.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-31-43

Введение

Разработанный в КарГТУ двигатель Стирлинга предназначен для работы в комплексной системе обогрева и снабжения электроэнергией небольших жилых помещений, удаленных от тепло и электроцентралей. Ниже, на рис. 1 представлена структурная схема мини-ТЭЦ для отопления и энергоснабжения коттеджа площадью около 100 м². Основным ее элементом является двигатель с внешним сгоранием, к достоинствам которого относятся его нижеследующие характеристики.

1. Способность работать на различных видах топлива, включая газ, уголь, мазут и биоресурсы.

2. Высокий КПД, достигающий 41–43 % (без учета потерь мощности на скользящих контактах) [1].

3. Малый уровень шума и высокие экологические параметры, превосходящие, как утверждает ряд литературных источников, дизельные двигатели [2, 3].

К недостаткам двигателей следует отнести следующие.

1. Существенные нелинейности выходной мощности и частоты вращения от температуры нагрева (рис. 2 и 3).

2. Низкую скорость вращения (500–2500 об/мин), что резко ухудшает энергетические и массогабаритные параметры в системе генерирования.

3. Наличие «мертвой зоны», препятствующей пуску даже многоцилиндрового двигателя Стирлинга.

Для устранения вышеперечисленных недостатков было проведено комплексное исследование патентно-информационного массива. Анализ современных технических решений позволил установить, что представленным выше требованиям в наибольшей мере удовлетворяют синхронная многополюсная машина с постоянными магнитами на роторе и дискретно-распределенной обмоткой

Вышеприведенные исследования и разработка генератора проводились по гранту МОН РК и договора, в рамках этого гранта, № 198 от 16.03.18.

© 2019 Д.Л. Калужский, А.Д. Мехтиев, А.С. Харитонов,
А.О. Дашинимаев, Д.А. Филиппов

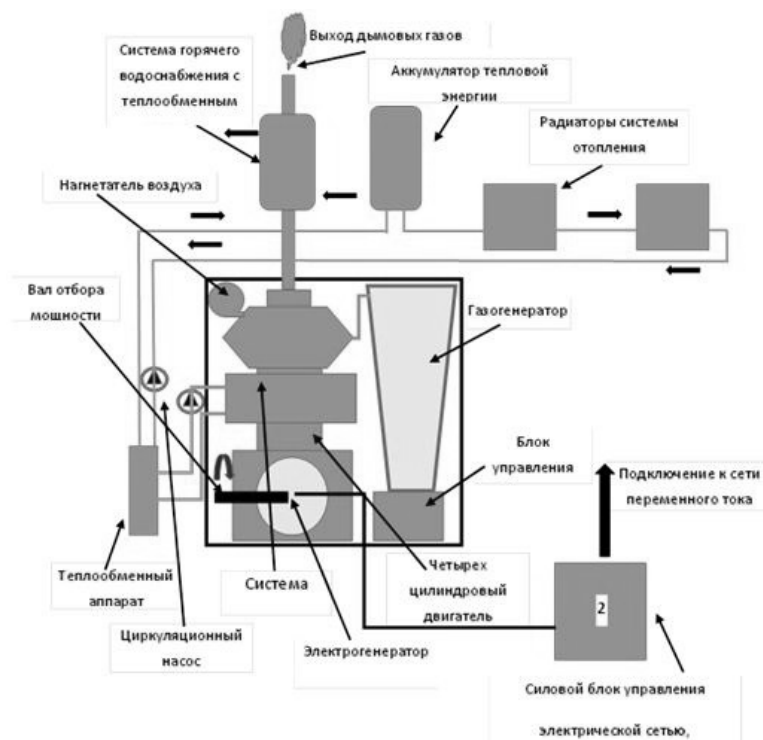


Рис. 1 – Структурная схема мини-ТЭЦ

Fig. 1 – Mini CHP block diagram

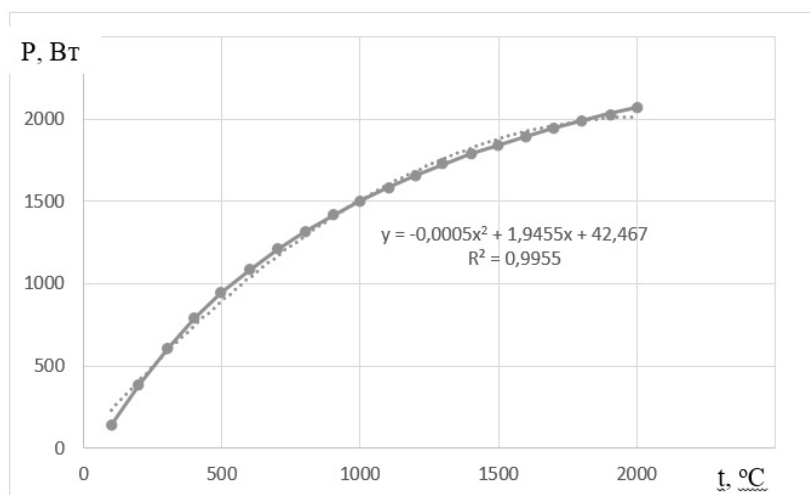


Рис. 2 – Зависимость выходной мощности от температуры нагрева

Fig. 2 – Dependence of output power on heating temperature

на статоре [4, 5], а также электрическая машина с комбинированным возбуждением [6, 7]. Первая из них, в многополюсном исполнении, обеспечивает высокий уровень электромагнитных нагрузок, существенно превышающий уровень,

достигнутый при использовании электрической машины с распределенными обмотками. Вторая – создавая опорный поток (60–85 % от максимального значения) за счет постоянных магнитов, обеспечивает широкий диапазон регулирования ЭДС (потока), за счет варьирования постоянного тока различной полярности в обмотке возбуждения. Отметим, даже если диапазон регулирования ЭДС достигает трех относительных единиц, затраты мощности в контуре возбуждения невелики и, как правило, не превышают 25–30 % от всех тепловых потерь в машине.

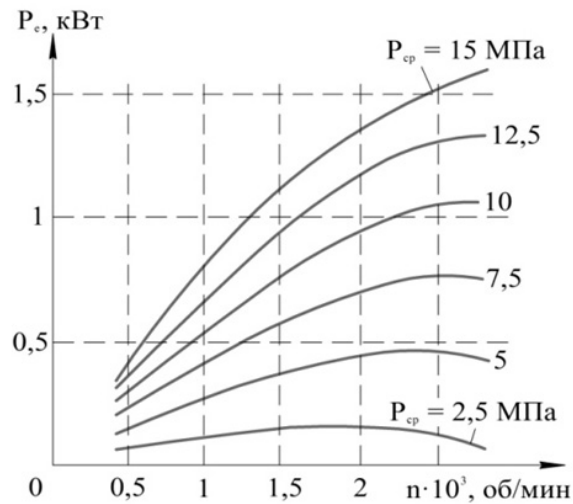


Рис. 3 – Зависимость выходной мощности от частоты вращения

Fig. 3 – Output power versus speed

Чтобы воспользоваться всеми преимуществами вышеуказанных электрических машин, была разработана конструкция [8], разрез которой представлен на рис. 4.

Машина выполнена двухпакетной. Трехфазная обмотка ($m = 3$) состоит из девяти катушек, каждая из которых имеет шаг, равный зубцовому делению, и охватывает зубцы, принадлежащие разным пакетам. Число фазных зон в конструкции принято равным $p_1 = 1$, число согласно включенных катушек в каждой фазной зоне равно $s = 3$. На статоре между пакетами размещается кольцевая обмотка возбуждения. Источником для ее питания является регулируемый выпрямитель на выходе трехфазной обмотки, позволяющий варьировать постоянный ток в диапазоне значений $-i_{\max} < i_b < +i_{\max}$. На каждом пакете ротора установлены постоянные магниты одной полярности; на левом пакете магниты обращены к статору своим северным полюсом, а на правом – южным. Между магнитами на каждом пакете выполнены пассивные ферромагнитные полюсы, обеспечивающие (вместе с ферромагнитным валом) контур для замыкания потока от обмотки возбуждения.

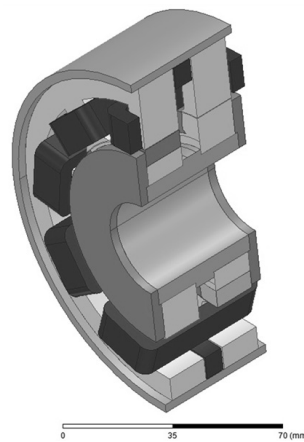


Рис. 4 – Разрез электрической машины

Fig. 4 – Section of an electric machine

1. Вывод уравнений

При протекании по трехфазной обмотке переменного тока каждая катушка создает МДС – $F_1(\alpha, t)$, для представления которой пространственными рядами Фурье требуется большое число гармоник. Чтобы повысить точность расчетов и упростить вывод конечных уравнений, воспользуемся модифицированными функциями Радемахера [9, 10], представленными на рис. 5 и имеющими следующее аналитическое описание:

$$r(\beta, p) = 1; \quad \beta + \frac{2\pi}{p}(k-1) \leq \alpha \leq \beta + \frac{\pi}{p} + \frac{2\pi}{p}(k-1);$$

$$r(\beta, p) = -1; \quad \beta + \frac{\pi}{p} + \frac{2\pi}{p}(k-1) \leq \alpha \leq \beta + \frac{2\pi}{p}(k-1).$$

где $k = 1, 2, \dots, p$.

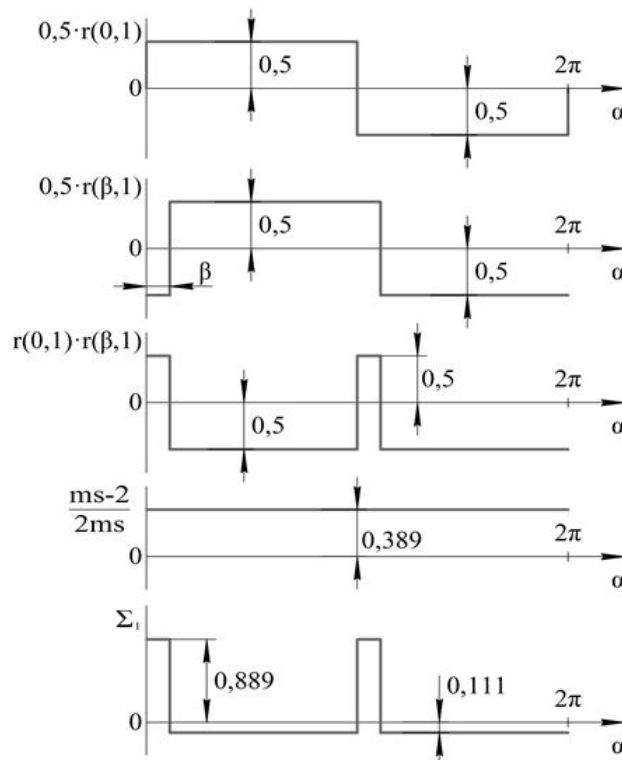


Рис. 5 – Модифицированные функции Радемахера:

p_1 – число фазных зон; s – число согласно включенных катушек в фазной зоне; m – число фаз; α – угол вдоль внутренней поверхности статора; $p = p_1/2 = 1$ – число периодов изменения функции Радемахера; θ – угловое положение ротора; β – начальная фаза

Fig. 5 – Modified Rademacher functions:

p_1 – the number of phase zones; s – the number according to the included coils in the phase zone; m – the number of phases; α – angle along the inner surface of the stator; $p = p_1/2 = 1$ – the number of periods of change of the Rademacher function; θ – the angular position of the rotor; β – the initial phase

Если число фаз и число катушек в фазной зоне – нечетные, то пространственно-временной закон изменения МДС одной фазы можно представить как

$$F_k(\alpha, t) = 0,5 \cdot F_k(t) \sum_{i=0}^{s-1} \{ r[\beta_1 i + \beta_1 s(k-1), p_1] \times \rightarrow \\ \rightarrow r[\beta_1(i+1) + \beta_1 s(k-1), p_1] \} \times (-1)^{i+1} + (ms-2) \frac{F_k(t)}{2ms}.$$

Причем, если число фазных зон нечетное, то $F_k(\alpha, t)$ рассматривается в интервале $0 \leq \alpha \leq \pi$.

Здесь

$$F_k(t) = I_m w_k \cos \left[\omega t - \frac{2\pi}{3}(k-1) \right]$$

– временная функция МДС, создаваемой одной катушкой; w_k – число витков в одной катушке трехфазной обмотки; ω – угловая частота напряжения;

$$\beta_1 = \frac{\pi}{ms p_1}.$$

Выше, на рис. 5, показано, как формируется МДС первой катушки в фазе A .

Поле обмотки возбуждения и поле, создаваемое магнитами, с достаточной точностью можно представить в виде:

$$B_{OB}(\theta) = 0,5 \times B_{m1} [r(\theta, p_2) + r(\theta + b_2, p_2)];$$

$$B_{\text{маг}}(\theta) = 0,5 \times B_{m2} [r(\theta, p_2) + r(\theta + b_2, p_2)].$$

Здесь θ – угловое положение ротора;

$$B_{m2} = \lambda i_b w_b$$

– максимальное значение магнитной индукции поля возбуждения, обусловленной током i_b , числом витков в обмотке возбуждения w_b и удельной магнитной проводимостью λ на пути потока возбуждения; B_{m2} – максимальное значение индукции, обусловленной потоком, созданным постоянными магнитами; p – число пар полюсов на роторе; b_2 – ширина немагнитной вставки между пассивным полюсом и магнитом.

Для расчета взаимных индуктивностей, или потокоцеплений, создающих ЭДС в трехфазной обмотке, воспользуемся выражением для магнитной энергии:

$$W_{\text{эм}} = \frac{1}{2} \times \int_{R_1}^{R_1 + \delta_1 k_\delta} \int_0^{L_a} \int_0^{2\pi} B_2(\theta, \alpha) \times H_1(\alpha, t) r dr dy d\alpha,$$

где $H_1(\alpha, t) = F_k(\alpha, t) / (\delta_1 k_\delta)$ – зависимость напряженности магнитного поля от времени и угла вдоль поверхности статора α ; R_1 – радиус статора; $\delta_1 k_\delta$ – приведенный воздушный зазор; L_a – длина двух пакетов статора.

Выполнив необходимые операции и вынося константы, получим несколько интегральных выражений, с модифицированными функциями Радемахера, отличающихся начальными фазами:

$$A(\theta, p) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} r(\theta, p_1') r(\beta_1, p') r(\theta, p_2) d\alpha. \quad (1)$$

Их исследование, проведенное в [4], показало, что при выполнении соответствующих требований $A(\theta, p)$ представляет собой «пилообразные» функции $PL(\beta + \theta, p)$ (рис. 6), подчиняющиеся условию:

$$PL(0, 1) = 1 - 2\theta / \pi, \quad 0 \leq \theta \leq \pi;$$

$$PL(0, 1) = -1 + 2\theta / \pi, \quad \pi \leq \theta \leq 2\pi.$$

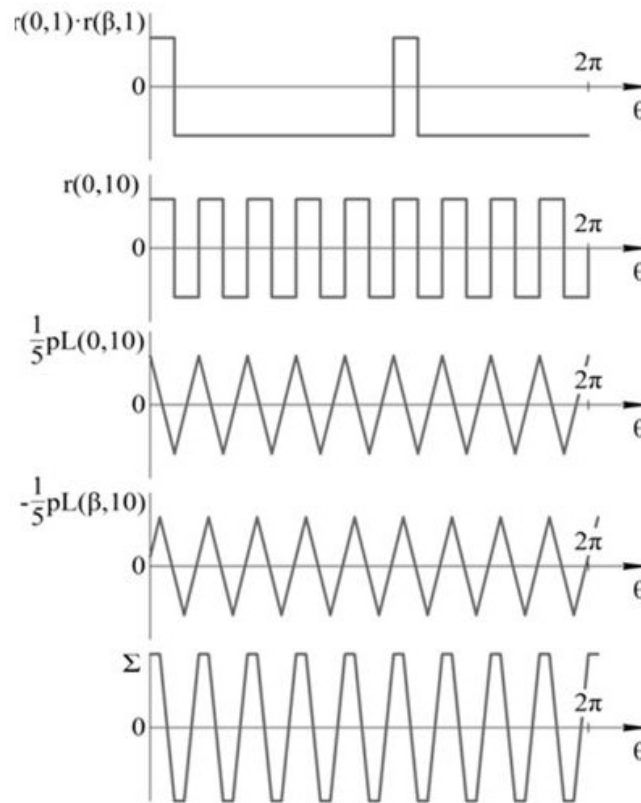


Рис. 6 – Результат графического суммирования $PL(\theta, p_2)$ функций, описывающих взаимную индуктивность между обмоткой возбуждения и первой катушкой в фазе A трехфазной обмотки

Fig. 6 – The result of a graphical summation of the $PL(\theta, p_2)$ functions describing the mutual inductance between the excitation winding and the first coil in phase A of the three-phase winding

Каждая «пилообразная» функция представляет собой быстросходящийся ряд Фурье, в котором высшие гармоники уменьшаются обратно пропорционально квадрату их порядкового номера:

$$PL(\theta, p) = \sum_{k=1}^{\infty} [a_{2k-1} \cos(2k-1)p\theta + b_{2k-1} \sin(2k-1)p\theta].$$

Здесь

$$a_{2k-1} = \frac{8 \cos(2k-1)\gamma}{(2k-1)^2}; \quad b_{2k-1} = \frac{8 \sin(2k-1)\gamma}{(2k-1)^2};$$

γ – начальная фаза (угол между максимумом функции и началом координат).

Исследуя различные соотношения между числом пар полюсов на роторе p_2 и числом фазных зон p_1 , было выяснено, что при нечетных значениях m и s функции $A(\theta, p)$ принимают ненулевые значения, например, когда $p_2 = 5p_1$.

Суммирование «пилообразных» функций с учетом их начальных фаз происходит аналогично сложению пространственных МДС отдельных катушек в распределенных обмотках, в результате чего в уравнениях индуктивностей появляются коэффициенты укорочения и распределения. В рассматриваемом случае взаимная индуктивность между обмоткой возбуждения и k -й фазой трехфазной обмотки будет равна

$$L_{kv}^{sr}(\theta) = \frac{16 \cdot D_a L_a \mu_0 w_k s k_{pv} k_{\beta v} w_b}{\pi v^2 \delta_1 k_\delta (ms \pm 1)} \cos v \left[p_2 \theta + \frac{m-1}{m} \pi(k-1) \right], \quad (2)$$

где v – порядковый номер гармоники;

$$k_{\beta v} = \cos \left(\frac{v\pi}{2ms} \right) \cos \left(\frac{v\pi b_2}{2\tau} \right);$$

$$k_{pv} = \frac{\sin \left(\frac{v\pi}{2m} \right)}{s \sin \left(\frac{v\pi}{2ms} \right)}.$$

В свою очередь, потокоцепление, обусловленное наличием на роторе магнитов и наводящее ЭДС в k -й фазе, будет равно

$$\Psi_{kv}^{sr}(\theta) = \frac{16 D_a L_a w_k s k_{pv} k_{\beta v} B_0}{\pi v^2 \delta_1 k_\delta (ms \pm 1)} \cos v \left[p_2 \theta + \frac{m-1}{m} \pi(k-1) \right]. \quad (3)$$

Здесь B_0 – амплитуда магнитной индукции, созданной магнитами; знак «плюс» в (2), (3) ставится в том случае, когда $2p_2 > msp_1$.

Выше, на рис. 6, представлен результат графического суммирования $PL(\theta, p_2)$ функций, описывающих взаимную индуктивность между обмоткой возбуждения и первой катушкой в фазе A трехфазной обмотки. Как видно, зависимость $L_{k1}^{sr}(\theta)$ близка к синусоиде, поэтому при дальнейшем анализе ограничимся только основной гармоникой.

Записав уравнения напряжений для прямой и обратной последовательности в осях, синхронно вращающихся с угловой частотой ω , а затем, выполнив преобразования к осям d , q , 0, получим выражения:

$$u_d = p \frac{\sqrt{m}}{2} (\Psi^{sr} \pm L^{sr} i_b) + (r^s + pL^s) i_d - \omega L^s i_q,$$

$$u_q = \omega \frac{\sqrt{m}}{2} (\Psi^{sr} \pm L^{sr} i_b) + (r^s + pL^s) i_q + \omega L^s i_d.$$

позволяющие в линейной постановке задачи проводить инженерные расчеты и сравнивать различные типы электрических машин с единых позиций. Отметим, что для подтверждения адекватности полученных уравнений был проведен поверочный расчет с использованием программного продукта ANSYS, в ходе которого было получено значение потокоцепления, обусловленное магнитами, на уровне 0,028 Вб. При использовании «пилообразных» функций и модифицированных функций Радемахера вычисленное значение потокоцепления составило 0,029 Вб, что говорит о высокой точности разрабатываемого метода.

Ниже, на рис. 7, представлена структурная схема с микропроцессорной системой управления (МПСУ) силовой части для прохождения «мертвой» зоны при пуске двигателя Стирлинга и для регулирования величины ЭДС при варьировании частоты вращения и нагрузки.

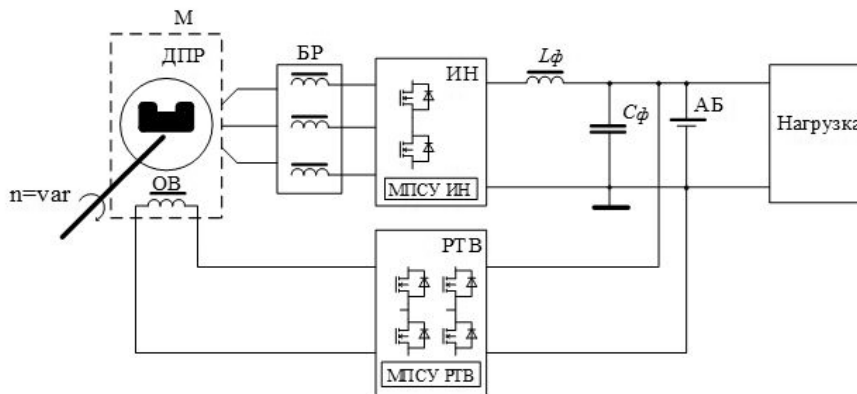


Рис. 7 – Структурная схема с микропроцессорной системой управления:

М – двигатель Стирлинга; ДПР – датчик положения ротора двигателя; ОВ – обмотка возбуждения двигателя; БР – блок реакторов; ИН – инвертор напряжения; МПСУ ИН – микропроцессорная система управления ИН; РТВ – регулятор тока возбуждения; МПСУ РТВ – микропроцессорная система управления РТВ; L_ϕ и C_ϕ – индуктивность и емкость выходного LC-фильтра; АБ – аккумуляторная батарея

Fig. 7 – Block diagram with microprocessor control system:

М – Stirling engine; DPR – motor rotor position sensor; OB – motor excitation winding; BR – reactor block; IN – voltage inverter; MPSU IN – microprocessor control system IN; RTV – excitation current regulator; MPSU RTV – microprocessor control system RTV; L_f and C_f – inductance and capacitance of the output LC filter; AB – rechargeable battery

Система управления работает в двух режимах, а именно в режиме электростартерного запуска и в режиме генерирования. В режиме электростартерного запуска обеспечивается двигательный режим работы, управление и электропитание осуществляются с помощью инвертора напряжения и аккумуляторной батареи.

Регулирование тока возбуждения осуществляется с заданием на ток возбуждения равным нулю.

После перехода электрической машины в режим генерирования инвертор напряжения работает как активный выпрямитель (АВ), осуществляя по определенному закону преобразование переменного напряжения в постоянное, с последующей передачей его в нагрузку. Так как синхронный генератор имеет смешанный тип возбуждения, часть потока возбуждения создается постоянными магнитами, остальная часть – током возбуждения. Соотношение составляет примерно 70 и 30 % соответственно. Регулирование величины выходного напряжения, отдаваемого в нагрузку, может осуществляться как АВ, так и током возбуждения. Наиболее оптимальным регулирование величины выходного напряжения становится при совместном управлении АВ и РТВ.

2. Анализ

Проанализируем полученные результаты.

1. Метод расчета синхронных электрических машин с использованием «пилообразных» функций и модифицированных функций Радемахера, позволяет в аналитическом виде и с высокой точностью записать уравнения электрического равновесия, момента и мощности.

2. Разрабатываемый метод позволяет исследовать и предлагать новые конструкции и схемы дискретно-распределенных обмоток. Так, например, идея изобретения [8] появилась в результате непосредственного анализа уравнений (1). В ходе этих же исследований наметились конструктивные варианты синхронной машины, у которой частота вращения $n = 60f(p)^{-1}$ зависит не от числа пар полюсов на роторе p_2 , а от целых чисел, определяемых как $p = np_2$, $p = p_1p_2$ и т. д. Время для решения данного вопроса связано с детальной проработкой патентно-информационного массива, а также с запросами промышленности.

3. Система управления генератором минимизирована по элементной базе. Так, после экспериментальных исследований было выявлено, что для стартерного запуска достаточно повернуть вал двигателя Стирлинга в нужном направлении на угол 25–30°. Это позволило устранить систему охлаждения силовых транзисторов в ИН. Остальные блоки системы управления также спроектированы в соответствии с критериями: минимум массы; простота реализации; низкая себестоимость.

3. Результаты

По результатам исследований спроектирован и изготовлен многополюсный генератор, технические параметры которого представлены ниже.

Технические параметры многополюсного генератора
Technical parameters of a multi-pole generator

Полезная мощность, Вт	300
Максимальная частота вращения, об/мин	1500
Минимальная частота вращения, об/мин	700
Максимальный момент по S1, Нм	4,3
Ток номинальный, не более, А	7,2
Напряжение в звене постоянного тока, В	36
Число фаз	3
Число пар полюсов	5
Электрические потери в обмотке статора, Вт	60
Электрические потери в обмотке возбуждения, Вт	17
Потери в стали статора, не более, Вт	8

4. Выводы

В статье приведены теоретические исследования, ставящие своей целью получение уравнений специального многополюсного генератора с комбинированным возбуждением, работающем в автономной системе электроснабжения. В качестве движителя в системе используется двигатель Стирлинга с улучшенными технико-экономическими характеристиками. Для запуска электромеханизма и преодоления «мертвой зоны» разработана структурная схема с микропроцессорной системой управления

ЛИТЕРАТУРА

1. Уокер Г. Машины, работающие по циклу Стирлинга: пер. с англ. – М.: Энергия, 1978. – 151 с.
2. Разработка системы водоподготовки котельных агрегатов ТОО "Караганда Энергоцентр" на основе наукоемких технологий / А.Д. Мехтиев, А.Б. Белтаев, Б.Т. Бекбаева, А.Ж. Жуматаева, Е.С. Рымханов, А.Ж. Кенжебаев, И.Ж. Маханов, Р.К. Салимов, А.Д. Алькина // Wykształcenie i nauka bez granic – 2017: materiały XIII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji, 07–15 grudnia 2017 roku. – Przemyśl: Nauka i studia, 2017. – Vol. 12: Techniczne nauki. – P. 71–74.
3. Кызыров К.Б., Жакина Н.Б., Жуматаева А.Ж. Биотопливо – один из кандидатов на роль энергетики будущего // Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации (Сагиновские чтения № 9): труды Международной научно-практической конференции, 22–23 июня 2017 г. – Караганды: КарГТУ, 2017. – Ч. 2. – С. 51–52.
4. Веселовский О.Н., Калужский Д.Л. Уравнения электрического равновесия и момента синхронных и асинхронных двигателей с дискретно-распределенными обмотками // Электричество. – 2000. – № 5. – С. 31–36.
5. Калужский Д.Л. Электрические машины с дискретно-распределенными обмотками для низкоскоростных электроприводов // Электротехника. – 1997. – № 9. – С. 10–13.
6. Патент 107418 Российская Федерация. Индукторная машина переменного тока комбинированного возбуждения / Д.В. Левин, Э.Я. Лившиц, М.М. Юхнин. – № 2010146046/07; заявл. 12.11.2010; опубл. 10.08.2011, Бюл. № 22.
7. Патент 2439770 Российская Федерация. Генератор переменного тока с комбинированным возбуждением / С.Г. Воронин, А.И. Согрин, Б.А. Мурдасов, В.И. Кислицын. – № 2010141252/07; заявл. 07.10.2010; опубл. 10.01.2012, Бюл. № 1.
8. Калужский Д.Л., Мехтиев А.Д., Югай В.В. Электрическая машина с комбинированным возбуждением. Заявление о выдаче патента Республики Казахстан на изобретение № 2018/0906.1.
9. Rademacher H. Einige sätze über reihen von allgemeinen orthogonalfunktionen // Mathematische Annalen. – 1922. – Vol. 87. – P. 112–138.
10. Голубов В.И., Ефимов А.В., Скворцов В.А. Ряды и преобразования Уолша: теория и применение. – М.: Наука, 1987. – 344 с.

AN AUTONOMOUS SYSTEM OF POWER GENERATION BASED ON THE STIRLING ENGINE AND A MULTI-POLE SYNCHRONOUS MACHINE

**Kaluzhskii D.L.¹, Mekhtiyev A.D.², Kharitonov A.S.¹,
Dashinimaev A.O.¹, Filippov D.A.¹**

¹ *Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

² *Karaganda State Technical University, Karaganda, Kazakhstan*

In the present paper, we investigate an autonomous power supply system based on an external combustion engine. The conditions of its operation were analyzed, a multi-pole synchronous generator was selected, a functional circuit that provides a stable output voltage under varying thermal conditions and load levels was developed.

Keywords: The Stirling engine, a multi-pole generator, voltage regulation.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-31-43

REFERENCES

1. Walker G. *Stirling-cycle machines*. Oxford, Clarendon Press, 1973 (Russ. ed.: Uoker G. *Mashiny, rabotayushchie po tsiklu Stirlinga*. Moscow, Energiya Publ., 1978. 151 p.).
2. Mekhtiev A.D., Beltaev A.B., Bekbaeva B.T., Zhumataeva A.Zh., Rymkhanov E.S., Kenzhebaev A.Zh., Makhanov I.Zh., Salimov R.K., Al'kina A.D. [Development of a water treatment system for boiler units of Karaganda Energy Center LLP on the basis of high technologies]. *Wykształcenie i nauka bez granic – 2017: materiały XIII Międzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji* [Education and science without borders – 2017: materials of the XIII International Scientific and Practical Conference, 07–15 grudnia 2017 roku]. *Przemysł, Nauka i studia*, 2017, vol. 12, pp. 71–74. (In Russian).
3. Kyzzyrov K.B., Zhakina N.B., Zhumataeva A.Zh. [Biofuels – one of the candidates for the energy of the future]. *Integratsiya nauki, obrazovaniya i proizvodstva – osnova realizatsii Plana natsii (Saginovskie chteniya № 9)* [Proceedings of the International scientific conference “Science integration, education and production – basis of the implementation of the Plan of the nation” (Saginov readings N 9)], Karagandy, June 23–24, 2017, pt. 2, pp. 51–52. (In Russian).
4. Veselovskii O.N., Kaluzhskii D.L. Uravneniya elektricheskogo ravnovesiya i momenta sinkhronnykh i asinkhronnykh dvigatelei s diskretno-raspredelennymi obmotkami [Equations of electric equilibrium and moment of synchronous and asynchronous motors with discrete-distributed windings]. *Elektrichestvo – Electrical Technology Russia*, 2000, no. 5, pp. 31–36.
5. Kaluzhskii D.L. Elektricheskie mashiny s diskretno-raspredelennymi obmotkami dlya nizkoskorostnykh elektroprivodov [Electrical machines with discrete-distributed windings for low-speed electric drives]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 1997, no. 9, pp. 10–13. (In Russian).
6. Levin D.V., Livshits E.Ya., Yukhnin M.M. *Induktornaya mashina peremennogo toka kombinirovannogo vzbuzhdeniya* [Inductor AC machine combined excitation]. Patent RF, no. 107418, 2011.
7. Voronin S.G., Sogrin A.I., Murdasov B.A., Kislitsyn V.I. *Generator peremennogo toka s kombinirovannym vzbuzhdeniem* [Alternator with combined excitation]. Patent RF, no. 2439770, 2012.
8. Kaluzhskii D.L., Mekhtiev A.D., Yugai V.V. *Elektricheskaya mashina s kombinirovannym vzbuzhdeniem* [Electric machine with a combined excitation]. Application for the grant of a patent of the Republic of Kazakhstan for the invention no. 2018/0906.1.
9. Rademacher H. Einige sätze über reihen von allgemeinen orthogonalfunktionen. *Mathematische Annalen*, 1922, vol. 87, pp. 112–138.
10. Golubov V.I., Efimov A.V., Skvortsov V.A. *Ryady i preobrazovaniya Uolsha: teoriya i primeneniye* [Walsh series and transforms: theory and application]. Moscow, 1987. 344 p.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Калужский Дмитрий Леонидович – д-р техн. наук, профессор кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Работает в НГТУ с 1980 года. Область научных интересов – бесщеточные электрические двигатели, системы управления бесщеточными электрическими двигателями. Имеет более 40 научных публикаций. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20. E-mail: verp307@mail.ru).

Kaluzhskii Dmitry Leonidovich, Doctor of Sciences (Eng.), Professor of department “Electronics and Electrical Engineering”, NSTU graduated from Novosibirsk Institute of Electrical Engineering (NIEE) in 1980. He works in NSTU (NIEE) from 1980. His area of scientific research is brushless electric motors and their control systems. Prof. Kaluzhskii has more than 40 papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: verp307@mail.ru)



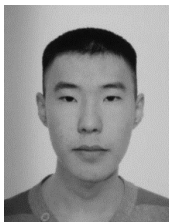
Мехтиев Али Джаванширович – канд. техн. наук, зав. кафедрой технологии и системы связи Карагандинского государственного технического университета (КГТУ). Окончил КГТУ в 1999 году. Работает в КГТУ с 1999 года. Область научных интересов: электродвигатели, электротехника, механика. Имеет более 106 научных публикаций. (Адрес: 100027, Республика Казахстан, г. Караганда, пр. Нурсултана Назарбаева, 56. E-mail: barton.kz@mail.ru).

Mekhtiyev Ali Dzhavanshirovich – Candidate of sciences (Eng.), the Head of the “Technology and communication systems” Department of Karaganda State Technical University (KSTU). Graduated from KSTU in 1999. He works in KSTU from 1999. His area of scientific research is gearless energy, electric motors, electrical engineering, mechanics. Has more than 106 papers. (Address: 56, Nursultan Nazarbayev Av., Karaganda, 100027, Republic Kazakhstan. E-mail: barton.kz@mail.ru).



Харитонов Андрей Сергеевич – ведущий инженер, ИНОЦ «Силовая электроника», кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета (НГТУ). Область научных интересов: управляемый электропривод с синхронным двигателем с постоянными магнитами, управляемые системы генерирования энергии с синхронным магнитоэлектрическим генератором (МЭГ), авиационные стартер-генераторные системы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: andrekh@yandex.ru).

Kharitonov Andrey Sergeevich – Lead engineer, Institute of Power Electronics, Novosibirsk State Technical University, NSTU. His research interests are currently focused on control motor drive based on PMSM, systems of generating electrical energy based on synchronous generator, starter generator based on synchronous generator with permanent magnets for aircrafts and helicopters. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: andrekh@yandex.ru).



Алдар Ойдопович Дашинамаев – родился в 1998 году. В 2015 году поступил в бакалавриат. В 2019 году получил степень бакалавра наук по электронике и наноэлектронике на кафедре электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета, НГТУ. Область научных исследований: электродвигатели и их системы управления. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: 10041998123@mail.ru).

Dashinimaev Aldar Oydopovich (b. 1998) – he was enrolled in bachelor's degree in 2015. He received B.S. degree in Electronics and Nanoelectronics from Department of Electronics and Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University, NSTU, in 2019. His area of scientific research is gearless electric motors and their control systems. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: 10041998123@mail.ru).



Филиппов Дмитрий Андреевич родился в 1998 году. В 2015 году поступил в бакалавриат. Получил степень бакалавра в области электроники и наноэлектроники на кафедре электроники и электротехники в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) в 2019 году. Область научных исследований: безредукторные электродвигатели и их системы управления. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20. E-mail: fda000@mail.ru).

Filippov Dmitry Andreevich (b. 1998) – he was enrolled in bachelor's degree in 2015. He received B.S. degree in Electronics and Nanoelectronics from Department of Electronics and Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University, NSTU, in 2019. His area of scientific research is gearless electric motors and their control systems. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: fda000@mail.ru).

*Статья поступила 08 февраля 2019 г.
Received February 08, 2019*

To references:

Kaluzhskii D.L., Mekhtiyev A.D., Kharitonov A.S., Dashinimaev A.O., Filippov D.A. Avtonomnaya sistema generirovaniya elektroenergii na baze dvigatelya Stirlinga i mnogopolyusnoi sinkhronnoi mashiny [An autonomous system of power generation based on the Stirling engine and a multi-pole synchronous machine]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 1 (42), pp. 31–43. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-31-43.