Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34, phone: +7 (347) 228-32-13, e-mail: negovora@bsau.ru.

2. **Ishat Akhmetyanov**, Candidate of technical Sciences, Associate Professor of the chair of automobiles and tractor complexes, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34, phone: +7 (347) 252-57-93, e-mail: ahmetir09@rambler.ru.

3. **Dmitry Gusev**, Candidate of technical Sciences, Associate Professor of the chair of automobiles and tractor complexes, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Oktyabrya St., 34, phone: +7 (347) 252-57-93, e-mail: d-a-gusev@yandex.ru.

Among alternative fuels, the leading position is occupied by gas-engine fuel due to its economy and environmental friendliness. The most promising, due to the low cost and availability, are compressed natural gases (CNG). The main problem is the placement and storage of gaseous fuel in cars. There are various versions of compressed natural gas cylinders. It is proposed to use cylinders of complex

shape to solve the problem of placing the fuel reserve on Board the car. The properties of gas cylinders of various shapes are analyzed, and the most loaded elements are calculated in the COMPASS APM-FEM software package. The strength characteristics of gas cylinders of various shapes are determined by calculation and the possibility of their practical implementation is considered.

© Неговора А.В., Ахметьянов И.Р., Гусев Д.А.

УДК 62-881:51-74

DOI: 10.31563/1684-7628-2020-56-4-124-130

М.Ф. Туктаров, В.Г. Байназаров, С.В. Фефелова, К.А. Ишкинин

УСТРОЙСТВО ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ АВТОНОМНОЙ СИСТЕМЫ ОСВЕЩЕНИЯ НА СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЯХ

Ключевые слова: автономная система освещения; солнечная батарея; эффективность работы солнечной электростанции; поток магнитной индукции; явление электромагнитной индукции.

Введение. В последние годы, несмотря на высокую стоимость и длительный срок окупаемости, растет количество автономных систем освещения (далее – АСО) на основе солнечных батарей, применяемых для освещения дорог общего пользования, парков, скверов и дворов многоквартирных домов [3]. Принцип работы солнечной кремниевой батареи основан на том, что в двух кремниевых пластинах, покрытых бором и фосфором, под действием солнечного излучения возникает электрический ток [2].

Основным недостатком солнечных батарей является низкая эффективность преобразования солнечной энергии в электрическую. Наряду с этим существует и ряд других недостатков: применение аккумуляторных батарей, имеющих большие массогабаритные показатели; малоэффективное использование энергии солнца из-за ограниченности емкости аккумуляторных батарей (у большинства существующих солнечных электростанций при полном заряде аккумуляторных батарей в дневное время солнечные батареи простаивают [1]); необходимость вращать солнечные батареи в течение светового дня таким

образом, чтобы лучи солнца падали перпендикулярно к их поверхности (для повышения эффективности использования солнечной энергии).

Также известно совместное (комбинированное) использование ветрогенератора и солнечной батареи в АСО, однако такая гибридная система малоэффективна в лесостепной местности, занимающей около 50 % от общей территории Республики Башкортостан [5, 9]. В соответствии с вышесказанным повышение эффективности работы АСО на основе солнечных батарей является актуальным вопросом, требующим дальнейшего изучения.

Материалы исследований. В настоящее время для получения электрической энергии (наряду с солнечными батареями) в большинстве случаев применяются синхронные генераторы переменного тока, используемые в ветряных, тепловых, атомных и гидравлических электростанциях, принцип работы которых основан на явлении электромагнитной индукции [8, 9]. В них механическая энергия используется для преобразования энергии постоянного магнитного поля в энергию переменного магнитного

поля. При этом основным недостатком рассматриваемых генераторов является появление электромагнитной силы при подключении нагрузки, оказывающей сопротивление вращению якоря генератора [6, 9], что в итоге приводит к необходимости увеличения механической энергии, затрачиваемой на вращение вала якоря генератора.

Проведенные М. Фарадеем опыты по изучению явления электромагнитной индукции показали, что значение индуцированного тока не зависит от способа изменения потока магнитной индукции B , а определяется лишь скоростью его изменения [4, 8]. С учетом этого предлагается использовать альтернативный способ изменения потока магнитной индукции B постоянного магнита, при котором на магнитное поле последнего воздействует пульсирующее магнитное поле электромагнита. Для этого на электромагнит будет подаваться импульсный ток, а с обмотки, намотанной на постоянный магнит, сниматься индуцированный электрический ток [7, 8]. На рисунке 1 представлен общий вид предлагаемого устройства. По аналогии с синхронным генератором обмотки электромагнита названы как обмотки возбуждения, а обмотка, намотанная на постоянный магнит, – обмоткой статора.

На основании вышеописанного способа получения индуцированного тока предлагается разработать устройство, которое будет использоваться совместно с солнечной батареей в АСО

и позволит повысить эффективность работы последней.

Рисунок 1

Общий вид предлагаемого устройства: 1 – сердечник электромагнита; 2, 6 – обмотка возбуждения; 3 – обмотка статора; 4 – постоянный магнит; 5 – немагнитный материал

Электрическая схема АСО с предлагаемым устройством представлена на рисунке 2. В отличие от существующих схем АСО в предлагаемой схеме используется дополнительное устройство 1 – импульсный генератор, позволяющий улучшить выходные характеристики солнечной электростанции.

Предлагаемое устройство состоит из трех частей (два электромагнита и один постоянный магнит), которые конструктивно соединены между собой через немагнитный материал (медная пластина) 5.

Рисунок 2

Схема электрическая принципиальная АСО с предлагаемым устройством (1): A1 – микроконтроллер; SE1 – солнечная батарея; VD1...VD5 – диод; G1 – аккумулятор; VT1, VT2 – транзистор; R1 – фоторезистор; L1, L3 – обмотка возбуждения; L2 – обмотка статора предлагаемого устройства; C1 – конденсатор электролитический; HL1 – светильник

Принцип работы предлагаемого устройства следующий. На электромагниты подаются чередующиеся импульсные сигналы (вначале на 1-ый электромагнит, затем на 2-ой электромагнит), что в свою очередь приводит к синусоидальному изменению магнитного потока постоянного магнита. Изменяющийся магнитный поток индуцирует в обмотке статора ЭДС.

Обмотки возбуждения L1, L3 генератора запитываются от аккумуляторной батареи G1, которая в свою очередь заряжается от солнечной батареи SE1. В схеме применяется диод шоттки VD1 для обеспечения односторонней передачи энергии (от солнечной батареи к аккумуляторной). Поочередно к каждой обмотке возбуждения приходят импульсные сигналы, что обеспе-

чивается электронными ключами $VT1$, $VT2$. Электронными ключами управляет микроконтроллер $A1$. Микроконтроллер также следит за освещенностью на улице с помощью фоторезистора $R1$. Статорная обмотка $L2$ намотана на стороне одного из полюсов постоянного магнита. Постоянный магнит представляет собой набор цилиндрических неодимовых магнитов, соединенных между собой противоположными полюсами и обладающих общим магнитным потоком. Выходной сигнал далее выпрямляется диодами $VD2...VD5$ и стабилизированный конденсатором $C1$ сигнал идет к светильнику $HL1$.

Каждая из обмоток возбуждения $L1$ и $L3$ генератора намотана на сердечник из ферромагнитного материала, что в итоге образует электромагнит. Ферромагнитный материал обладает не только большими значениями магнитной проницаемости μ , но и имеет нелинейную зависимость магнитной проницаемости μ от напряженности магнитного поля H (рисунок 3) [8]. Как видно по рисунку 3, в начале μ растет с увеличением H , затем, достигая максимума, начинает уменьшаться, стремясь в случае сильных полей к 1.

Наличие у ферромагнитного материала такой зависимости магнитной проницаемости μ от напряженности магнитного поля H позволяет получить большой магнитный поток Φ (энергию

постоянного магнитного поля), используя катушку с ферромагнитным сердечником, при этом затрачивая на это небольшую электрическую энергию.

Рисунок 3

Зависимость магнитной проницаемости μ от напряженности магнитного поля H

Результаты исследований. С целью исследования магнитного потока (индукции) постоянного магнита для подтверждения работоспособности предложенного устройства проведем в программе Elcut 6.3 численное моделирование его магнитного поля. Численное моделирование поля возможно лишь для конкретного объекта (импульсный генератор) с заданными геометрическими и физическими свойствами. Поэтому предварительно зададимся основными параметрами устройства (таблица 1).

Таблица 1 Параметры предложенного импульсного генератора

№	Параметр, ед. изм.	Значение
1	Номинальная мощность, Вт	115
2	Количество фаз	1
3	Статор	Постоянный магнит N38N
4	Ток в обмотке возбуждения, А	5

Исследуемыми параметрами являются магнитная индукция B и магнитный поток Φ предлагаемого устройства, изменения которых будут говорить о работоспособности импульсного генератора. Проведем его сравнение с магнитным полем существующего генератора и применим в АСО.

Программа Elcut 6.3 имеет ограничение количества расчетных сеток (255 шт.), поэтому модель генератора упрощена (один из двух электромагнитов не изображен в графической модели и медная пластина (немагнитный материал) между электромагнитом и постоянным магнитом заменен воздухом, так как их магнитная проницаемость $\mu \approx 1$ и поэтому не влияет на картину магнитного поля). С учетом этого предлагаемое устройство в программе Elcut 6.3 имеет вид и размеры, показанные на рисунке 4. Геометрическая модель в программе является осесимметричной (на рабочем окне программы отображается часть симметричного импульсного генератора, разрез которого проходит через ось).

Между электромагнитом и постоянным магнитом зазор $r = 0,5$ мм. Геометрическая модель

устройства в программе Elcut 6.3 представлена на рисунке 5. Физические свойства постоянных магнитов в модели были заданы кривой размагничивания с учетом направления вектора намагниченности ортогонально к рабочей поверхности магнитов. На рисунке 5 зеленым цветом обозначены расчетные сетки конечных элементов.

Граничные условия в виде нулевого магнитного потенциала на внешней поверхности устройства и условий симметрии были заданы на соответствующих гранях геометрической модели (большие кружки на рисунке 5).

Далее мы рассмотрим полученные результаты исследования предлагаемого импульсного генератора. Случай (1), когда по обмотке возбуждения не протекает электрический ток, обозначим как холостой ход, а случай, когда по обмотке возбуждения протекает электрический ток, обозначим как рабочий режим (2). Полученная в ходе решения картина поля при режимах 1 и 2 показана на рисунках 6, 7. Стрелками на рисунках показано направление магнитного потока.

и электромагнита при режимах 1 и 2 представлена на рисунках 8...11.

Размеры предлагаемого устройства (импульсного генератора): 1 – обмотка возбуждения; 2 – магнитопровод (ферромагнит); 3 – постоянный магнит; 4 – видимая область (рабочее окно программы)

Геометрическая модель предлагаемого устройства:
1 – воздушное пространство; 2 – обмотка возбуждения;
3 – магнитопровод (ферромагнит);
4 – постоянный магнит

Магнитный поток генератора в режиме 1:
1 – воздушное пространство; 2 – обмотка возбуждения;
3 – магнитопровод (ферромагнит); 4 – постоянный магнит

Магнитный поток генератора в режиме 2:
1 – воздушное пространство; 2 – обмотка возбуждения;
3 – магнитопровод (ферромагнит); 4 – постоянный магнит

Картина поля (магнитная индукция B) в режиме 1:
1 – воздушное пространство; 2 – обмотка возбуждения; 3 – магнитопровод (ферромагнит); 4 – постоянный магнит

Картина поля (магнитная индукция B) в режиме 2:
1 – воздушное пространство; 2 – обмотка возбуждения; 3 – магнитопровод (ферромагнит); 4 – постоянный магнит

Рисунок 10

Картина поля (магнитный поток Φ) в режиме 1:

1 – воздушное пространство; 2 – обмотка возбуждения; 3 – магнитопровод (ферромагнит); 4 – постоянный магнит

Рисунок 11

Картина поля (магнитный поток Φ) в режиме 2:

1 – воздушное пространство; 2 – обмотка возбуждения; 3 – магнитопровод (ферромагнит); 4 – постоянный магнит

Как видно из представленных картин поля, поток магнитной индукции B изменяется при воздействии на постоянный магнит электромагнитом. Магнитная индукция на одном из концов постоянного магнита меняется от значений $B = 0,72$ Тл до $B = 1,03$ Тл. В соответствии с этим можно говорить о работоспособности предложенного устройства.

Далее проведем сравнительный анализ зависимости мощности предлагаемого устройства (1) с существующим автомобильным генератором GP9901 (2) от тока возбуждения $I_{\text{возб}}$, при этом частота вращения вала автомобильного генератора $n = \text{const}$. На рисунке 12 представлен график изменения выходной мощности от тока возбуждения $I_{\text{возб}}$.

Как видно из представленного графика, с увеличением тока возбуждения $I_{\text{возб}}$ выходная мощность автомобильного генератора растет быстрее, чем мощность импульсного генератора. Если при токе возбуждения $I_{\text{возб}} = 1,5$ А выходная мощность генератора GP9901 $P = 97$ Вт, то мощность импульсного генератора $P = 53$ Вт (это связано со слабым влиянием поля электромагнита на поле постоянного магнита). Однако при токе возбуждения более $I_{\text{возб}} = 4,5$ А мощности генераторов становятся одинаковыми, так как происходит насыщение сердечника электромагнита.

Предлагается использовать предложенное устройство в АСО для повышения эффективно-

сти работы последней за счет увеличения количества светильников, устанавливаемых на разных опорах без необходимости увеличения общего количества солнечных электростанций. В предлагаемом АСО с импульсным генератором применяется одна солнечная батарея TopRay Solar 100M, которая выдает максимальную мощность $P = 100$ Вт. Также используются 3 светодиодных светильника с суммарной мощностью $P = 105$ Вт и аккумуляторная батарея емкостью 60 А/ч с контроллером заряда Epsolar LS 1024E (рисунок 13).

Рисунок 12

Зависимость выходной мощности предлагаемого устройства (1) и существующего автомобильного генератора GP9901 (2) от тока возбуждения $I_{\text{возб}}$

Рисунок 13
Автономная система освещения
с импульсным генератором

В этом случае автономная система освещения будет оснащаться импульсным генератором, имеющим следующие характеристики:

- ток возбуждения $I_{\text{возб}} = 3,75 \text{ А}$;
- затрачиваемая на возбуждение магнитного поля мощность $P = 45 \text{ Вт}$;
- выходная мощность $P = 117 \text{ Вт}$;
- длина $\times$ ширина $\times$ высота ($274,5 \times 60 \times 60$) мм.

Проведенные расчеты по реализации предлагаемой АСО с импульсным генератором для электроснабжения трех светильников показали, что в среднем капиталовложение на реализацию предлагаемого АСО с одной солнечной электростанцией оказалось на 20...30 % ниже, чем при использовании трех солнечных электростанций.

При этом общая потребляемая мощность светильников для двух вариантов оставалась неизменной.

Выводы. Проведенные исследования показали, что с увеличением тока в обмотке возбуждения электромагнита уменьшается магнитная индукция постоянного магнита. Точка максимальной индукции начинает смещаться со стороны постоянного магнита в сторону электромагнита. Это говорит о том, что магнитное поле, создаваемое электромагнитом, оказывает значительное влияние на поле постоянного магнита. Установлено, что в одном из полюсов постоянного магнита, где имеется обмотка статора, магнитная индукция меняется от значений $B = 0,72 \text{ Тл}$ до $B = 1,03 \text{ Тл}$. При этом меняется и направление магнитного потока Φ . Следовательно, происходит индуктирование ЭДС в обмотке статора. Проведено сравнение предлагаемого устройства с существующим генератором GP9901. Определено, что в среднем капиталовложение на реализацию предлагаемого АСО с одной солнечной электростанцией на 20...30 % ниже, чем при использовании трех солнечных электростанций, при этом общая потребляемая мощность светильников для двух вариантов оставалась неизменной. Исходя из вышесказанного можно сделать вывод о том, что предложенное устройство позволяет повысить эффективность работы автономной системы освещения на солнечных батареях.

Библиографический список

1. Алхасов, А.Б. Возобновляемая энергетика [Текст]: монография / А.Б. Алхасов; под ред. В.Е. Фортова. Москва: Физматлит, 2010. 255 с.
2. Сибикин, Ю.Д. Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии [Текст]: учебное пособие / Ю.Д. Сибикин, М.Ю. Сибикин. Москва: Кнорус, 2010. 227 с.
3. Об улучшении систем наружного освещения населенных пунктов Республики Башкортостан [Текст]: постановление Правительства Респ. Башкортостан от 18.01.2019 № 25 (в ред. постановления Правительства Респ. Башкортостан от 17.10.2019 № 638) // Врио Главы Респ. Башкортостан Р.Ф. Хабиров. 16 с.
4. Пат. № 2492571RU. Электрогенератор [Текст] / В.В. Масленников. № 2012100954/07, заявка 16.01.2012, опубл. 10.09.2013, бюл. № 25. 10 с.
5. Саврасов, Ф.В. Расчет эффективности использования автономных систем электроснабжения с фотоэлектростанциями в условиях Западной Сибири [Текст] / Ф.В. Саврасов, Б.В. Лукутин // Известия Томского политехнического университета. 2013. Т. 322. № 6. С. 17–21.
6. Туктаров, М.Ф. Использование преобразователя атмосферного электричества для повышения эффективности работы автономной системы освещения на солнечных батареях [Электронный ресурс] / М.Ф. Туктаров, В.Г. Байназаров, Д.А. Зиганшин, К.А. Ишкинин // Российский электронный научный журнал. 2020. № 2 (36). С. 130–138.
7. Туктаров, М.Ф. Атмосферное электричество как источник электроснабжения системы освещения [Текст] / М.Ф. Туктаров, Д.А. Зиганшин // Проблемы развития технологий создания, сервисного обслуживания и использования технических средств в АПК. Материалы международной научно-практической конференции. Уфа: Башкирский ГАУ, 2019. С. 22–26.
8. Фортов, В.Е. Энергетика в современном мире [Текст] / В.Е. Фортов, О.С. Попель. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 167 с.
9. Харитонов, В.П. Основы ветроэнергетики [Текст]: монография / В.П. Харитонов. Москва: ГНУ ВИЭСХ, 2010. 338 с.

1. **Туктаров Марат Фанисович**, кандидат технических наук, доцент кафедры электрических машин и электрооборудования, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: marat.tukzar@yandex.ru.
2. **Байназаров Валинур Галинурович**, инженер-исследователь научно-образовательного центра, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: baynazv@mail.ru.
3. **Фефелова Светлана Владимировна**, аспирант кафедры электрических машин и электрооборудования, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: Svet1k15@mail.ru.
4. **Ишкинин Кадим Аглямвич**, магистр кафедры электрических машин и электрооборудования, ФГБОУ ВО Башкирский ГАУ, г. Уфа, ул. 50-летия Октября, 34, e-mail: K_Ishkininn@mail.ru.

В последнее время в Башкирии, несмотря на высокую стоимость и длительный срок окупаемости, растет количество автономных систем освещения, в которых в качестве источника питания используется солнечная батарея. Автономные системы освещения позволяют использовать энергию солнечного излучения для питания светодиодного светильника, предварительно накопив эту энергию в аккумуляторной

батарее. Однако солнечные электростанции, используемые в автономных системах освещения, имеют малую эффективность работы. Одним из вариантов повышения эффективности работы солнечной электростанции и соответственно автономной системы освещения является использование совместно с солнечной батареей импульсного генератора, являющегося одним из разновидностей электрических машин.

M. Tuktarov, V. Baynazarov, D. Ziganshin, S. Fefelova, K. Ishkinin

DEVICE FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF THE STAND-BY-STATE LIGHTING SYSTEM ON SOLAR BATTERIES

Key words: autonomous lighting system; solar battery; solar power plant operation efficiency; magnetic induction flux; electromagnetic induction phenomenon.

Authors' personal details

1. **Marat Tuktarov**, Candidate of Engineering Sciences, associate professor of Department of Electric Machines and Electrical Equipment, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Oktiabrya Str., 34, e-mail: marat.tukzar@ya.ru.
2. **Valinur Bainazarov**, research-engineer of the Scientific and Educational Center, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Oktiabrya Str., 34, e-mail: baynazv@mail.ru.
3. **Svetlana Fefelova**, Post-graduate student of the Department of Electric Machines and Electrical Equipment, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Oktiabrya Str., 34, e-mail: Svet1k15@mail.ru.
4. **Kadim Ishkinin**, master at Department of Electrical Machines and Electrical Equipment, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Bashkir State Agrarian University», 450001, Ufa, 50-letiya Oktiabrya Str., 34, e-mail: K_Ishkininn@mail.ru.

Recently, in Bashkiria, despite the high cost and long payback period, the number of autonomous lighting systems is growing, in which a solar battery is used as a power source. Autonomous lighting systems allow using the energy of solar radiation to power an LED luminaire, having accumulated this energy in a rechargeable battery. However, solar

power plants used in stand-alone lighting systems have low operating efficiency. One of the options for increasing the efficiency of a solar power plant. Accordingly, an autonomous lighting system uses a pulse generator, one of the varieties of electric machines, together with a solar battery.

© Туктаров М.Ф., Байназаров В.Г., Фефелова С.В., Ишкинин К.А.