

A. M. Belov, Noel Ntawuhorakomeye
Saint Petersburg Electrotechnical University

DESIGN OF A BOOST DC CONVERTER FOR MPPT SOLAR CHARGE CONTROLLER

In the presented article, a step-up converter with pulse-width modulation (PWM) with two capacitors was mathematically modeled and designed (unlike most converters found in the literature), which allows using the maximum power point tracking control (MPPT) to determine the maximum power of a photovoltaic panel in any moment of time.

The basic parameters of the converter were calculated, such as the duty cycle, inductance value, maximum current, capacitance values of the input and output capacitors, and a diode and a MOS transistor were chosen for it, representing a contribution to the better design of the boost converter. The designed converter was tested on the SP75 solar panel, the results of the simulation carried out with the PSIM software package made it possible to optimize the production of the solar module and find out the fact that it can operate at its maximum power point if it is connected to a converter that is constantly looking for maximum power

Modeling, photoelectric generator, maximum power point, boost converter, energy

УДК 621.3

С. А. Трембач
Череповецкий государственный университет (ЧГУ)

Система генерации электрической энергии с электромагнитной стимуляцией движения физического маятника

Рассмотрен способ преобразования энергии маятниковых колебаний в электрическую, а также рассчитаны выработка и потребление системы генерации энергии через маятниковые колебания. Система для преобразования энергии гравитации в электрическую состоит из физического маятника, каркаса, на котором он закреплен на подшипниках, минимум одной ведомой и одной ведущей шестерен передаточного механизма, самого генератора, присоединяющегося к маятнику через этот передаточный механизм, аккумулятора, куда вся вырабатываемая энергия поступает и из которого черпается энергия на поддержание системы, двух электромагнитов, поддерживающих колебания маятника незатухающими, и двух реле времени, оптимизирующих энергопотребление электромагнитов и задающих им режим работы согласно периоду полного колебания маятника. По результатам расчетов было начато изготовление прототипа данного генератора электрической энергии, ввод в эксплуатацию которого может положительно повлиять на энергетическую обстановку во всем мире, так как он не имеет привязок к географическому положению, времени суток, времени года и другим факторам, затрудняющим работу известных источников возобновляемой энергии.

Возобновляемые источники энергии, энергия гравитации, физический маятник, генерация электрической энергии

Среди существующих возобновляемых видов энергии выделяют энергию ветра, гидроэнергию, энергию приливов и отливов, волн, температурного градиента морской воды, солнечного света, геотермальную энергию и биоэнергию. У всех вышеперечисленных видов энергии есть свои недостатки [1], основные из которых – зависимость генератора от его географического положе-

ния и от таких факторов, как наличие и скорость ветра, время суток и наличие волн, наличие геотермальных источников. Биоэнергетика же использует биотопливо, которое можно было бы использовать в других областях. Также в большинстве своем генераторы на возобновляемых источниках энергии в той или иной степени наносят ущерб окружающей среде.

Преобразование маятниковых колебаний в электрическую энергию. Рассмотрим еще один возобновляемый источник энергии – гравитацию. Использовать силу гравитации для превращения ее энергии в электрическую можно при помощи маятникового механизма.

Для подтверждения работоспособности системы были проведены расчет генерируемой электрической мощности генератора и сравнение ее с общей мощностью всех затрачивающих энергию на поддержание работоспособности системы элементов. Результаты расчетов следующие: генерируется 2.7 Вт, в то время как потребляется элементами системы 2.45 Вт.

Рассмотрим механизм, состоящий из физического маятника в форме морского якоря (рис. 1, *а* – вид спереди, *б* – вид сбоку), на котором 1 – кольцо крепления маятника к валу передаточного редуктора, 2 – часть маятника с меньшей массой, 3 – часть маятника с большей массой, 4 – сердечник втягивающего электромагнита. Центр тяжести маятника сильно смещен к нижней его части. Возьмем для примера маятник массой 20 кг и общей длиной около 20 см. Период колебания такого маятника с амплитудой 130° равен 1.12 с [2], [3]. Через повышающий редуктор с коэффициентом повышения 4 присоединим к точке опоры физического маятника синхронный генератор постоянного тока на постоянных магнитах [4]. Данному генератору необходима доработка под

систему, так как изначально он спроектирован с ручным приводом, т. е. его вал имеет изогнутую форму, напоминающую велосипедную педаль. Необходимо удалить часть с изгибом для придания валу прямой формы. Производителем заявлены характеристики данного генератора: генерируемые ток 0.3 А и напряжение 9 В при скорости вращения вала 150 об/мин. Рассчитаем возможную выработку системы.

На рис. 2 схематично представлена 3D-модель системы для преобразования энергии гравитации в электроэнергию (1 – синхронные генераторы (статор показан с разрезом); 2 – маятник; 3 – поддерживающие колебания электромагниты; 4 – ведомая шестерня передаточного механизма, закрепленная на роторе генератора; 5 – ведущая шестерня, закрепленная на оси маятника). При колебательных движениях маятника крутящий момент через повышающий редуктор (он же – передаточный механизм) будет передаваться на вал синхронного генератора, характеристики которого указаны выше, вследствие чего будет вырабатываться электрический ток. На рисунке схематично показано присоединение четырех синхронных генераторов к маятнику, в статье же рассматривается присоединение одного такого генератора. Вырабатываемый синхронным генератором электрический ток далее поступает в аккумулятор через трехфазный выпрямитель [5].

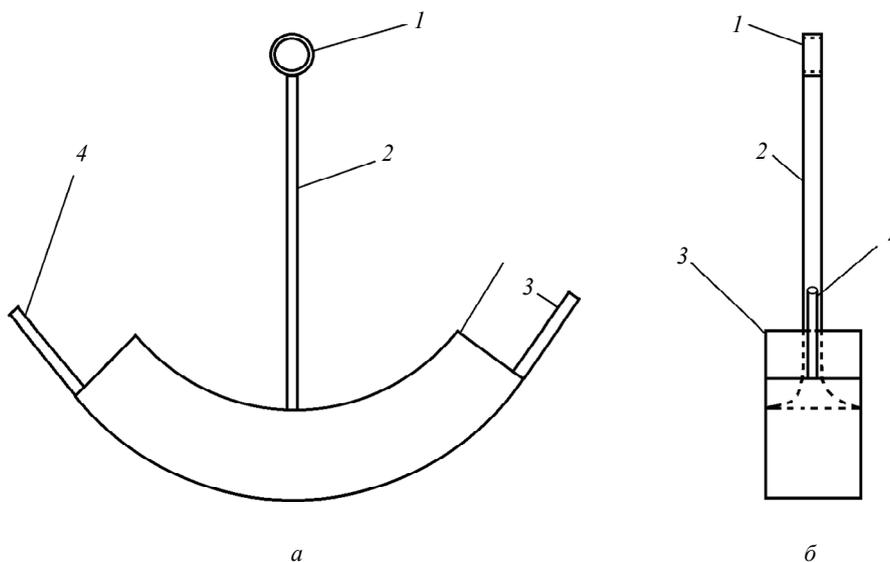


Рис. 1

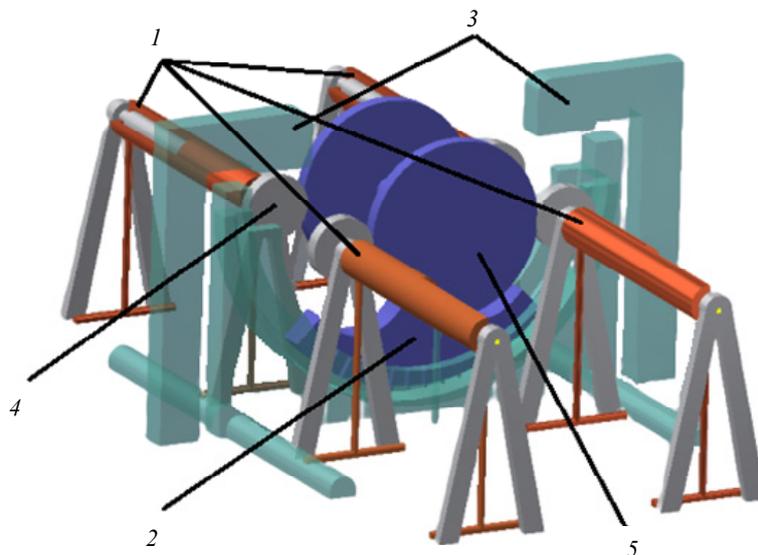


Рис. 2

Для генерации электрической энергии в системе будет использован ранее указанный синхронный генератор постоянного тока, выполненный на постоянных магнитах [4], с заявленными производителем характеристиками. Шестерни редуктора, исходя из колебательных движений физического маятника, будут вращаться поочередно сначала в одном, затем в другом направлении с постоянно меняющейся скоростью. Однако поскольку весь генерируемый ток будет постоянным, скорость и направление вращения ротора синхронного генератора не повлияют на эффективность его зарядки [6]–[7].

Расчет эффективности системы. Для расчетов выбран физический маятник массой $m = 20$ кг, длиной $l = 20$ см = 0.2 м с расстоянием от точки подвеса до центра тяжести маятника $h = 16$ см = 0.16 м.

Период колебания физического маятника рассчитывается по формуле [8]

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgl}}$$

Здесь $g = 9.8$ м/с²; J – момент инерции, рассчитываемый следующим образом [9]–[10]:

$$J = m(r^2 + h^2),$$

где r – радиус инерции относительно оси, проходящей через центр тяжести.

В маятнике рассматриваемой формы $r \approx h \approx 0.16$ м. Тогда

$$J = 1.024 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Период полного колебания маятника $T = 1.12$ с.

Амплитуда колебания физического маятника за полупериод $A = 130^\circ$. Ее мы задаем самостоятельно, отклонив маятник на угол $A/2$, т. е. на 65° от положения равновесия.

Передаточный коэффициент редуктора $Z = 4$.

Для расчета скорости вращения вала генератора необходимо амплитуду полного колебания маятника $A_{\text{полн}}$, состоящую из двух амплитуд колебания за полупериод A , разделить на период одного полного колебания T . Таким образом получим V_m – количество градусов, которое проходит физический маятник генератора за 1 с. Для получения значения скорости вращения ротора генератора W , необходимо V_m умножить на передаточный коэффициент редуктора Z и на 60, а затем поделить на 360, чтобы получить количество оборотов за одну минуту.

W рассчитывается по следующей формуле:

$$W = \frac{V_m Z \cdot 60}{360}, \text{ где } V_m = \frac{A_{\text{полн}}}{T}, \text{ } A_{\text{полн}} = 2 \cdot A.$$

Подставляя известные значения величин в данную формулу, получаем: $W = 154.76$ об/мин. Для удобства дальнейших расчетов округлим это значение до 150 об/мин.

Необходимо уточнить, что 150 об/мин – это средняя скорость вращения вала генератора. Из-за особенности движения маятника, постоянно увеличивающегося, а затем уменьшающегося до 0 скорость своего движения, скорость вращения вала генератора также будет изменяться во времени, образуя усредненное значение в 150 об/мин.

Имеем данные генератора, указанные производителем на сайте [4]: вырабатываемый ток $I = 0.3$ А; вырабатываемое при 150 об/мин напряжение $U = 9$ В.

Рассчитаем вырабатываемую маятниковым генератором мощность P [11]–[12]:

$$P = UI = 9 \cdot 0.3 = 2.7 \text{ Вт.}$$

Далее рассчитаем общее потребление $P_{\text{эм. общ}}$ двух электромагнитов, поддерживающих незатухающими колебания физического маятника (3 на рис. 2), количество которых не зависит от количества присоединенных генераторов. Мощность, $P_{\text{эм}} = 7$ Вт, но так как их в системе два, то количество энергии, затрачиваемой на их поддержание, возрастает вдвое:

$$P_{\text{эм. общ}} = P_{\text{эм}} \cdot 2 = 7 \cdot 2 = 14 \text{ Вт.}$$

Как видим из расчетов, потребляемая мощность данных электромагнитов при генерируемой мощности в 2.7 Вт составляет целых 14 Вт. Исходя из этого, генератор не может работать при таком большом энергопотреблении электромагнитов.

Для оптимизации потребления электромагнитов были использованы два реле времени [13], имеющие следующие электрические характеристики: напряжение 12 В, $I_{\text{р.в}1} = 10$ мА = 0.01 А в режиме ожидания, $I_{\text{р.в}2} = 50$ мА = 0.05 А при срабатывании. Время срабатывания равно 0.1 с за полный период колебания маятника в 1.12 с, из чего следует, что потребляемая мощность двух реле $P_{\text{р.в. общ}}$ в системе будет равна

$$P_{\text{р.в. общ}} = 2 \left(\frac{U_{\text{р.в}} I_{\text{р.в}1} \cdot 1.02 + U_{\text{р.в}} I_{\text{р.в}2} \cdot 0.1}{1.12} \right),$$

$$P_{\text{р.в. общ}} = 2 \left(\frac{12 \cdot 0.01 \cdot 1.02 + 12 \cdot 0.05 \cdot 0.1}{1.12} \right) = 0.326 \text{ Вт,}$$

где $U_{\text{р.в}}$ – напряжение реле времени, равное 12 В.

Исходя из изменений:

$$P_{\text{потр}} = 1.25 + 0.326 = 1.576 \text{ Вт,}$$

откуда финальное сравнение изменится на

$$P > P_{\text{потр}} \cdot 1.1 = 2.7 > 1.576 \cdot 1.1 = 2.7 > 1.734 \text{ Вт.}$$

Из-за особенностей реле времени его включение можно настроить на $t_1 = 0.1$ с один раз за $t_2 = 1.12$ с – время, идеально подходящее под пери-

од колебания маятника для включения электромагнита в нужный момент, чтобы добавить энергии маятнику. Данный процесс снизит потребление электромагнита в n раз:

$$n = \frac{t_2}{t_1} = \frac{1.12}{0.1} = 11.2.$$

Исходя из этого, потребление $P_{\text{эм. общ}2}$ составит

$$P_{\text{эм. общ}2} = \frac{P_{\text{эм. общ}}}{n},$$

$$P_{\text{эм. общ}2} = \frac{14}{11.2} = 1.25 \text{ Вт.}$$

Из расчетов потребляемой мощности видно, что два электромагнита после оптимизации их работы при помощи реле времени уменьшают потребление до 0.625 Вт каждый (до 1.25 Вт в совокупности), что выражается в том, что электромагниты включаются на непродолжительный срок в течение определенного временного промежутка.

Общее потребление мощности системы маятникового генератора $P_{\text{потр}}$ рассчитывается сложением потребления обеих катушек $P_{\text{эм. общ}2}$ и обоих реле времени $P_{\text{р.в. общ}}$:

$$P_{\text{потр}} = P_{\text{эм. общ}2} + P_{\text{р.в. общ}},$$

$$P_{\text{потр}} = 1.25 + 0.326 = 1.576 \text{ Вт.}$$

Для того чтобы, исходя из расчетов, сделать вывод о работоспособности системы, необходимо сравнить показатели выработки системы $P = 2.7$ Вт и общее потребление системы $P_{\text{потр}} = 1.734$ Вт:

$$P > P_{\text{потр}}.$$

Поскольку генерируемая мощность системы превосходит потребляемую, можно сделать вывод, что данная система работоспособна.

Исходя из расчетов, данная установка может производить 2.7 Вт мощности, 1.576 Вт из них затрачивая на поддержание своей работоспособности. Даже при потерях в редукторе, а также при трении маятника о воздух, увеличивающих мощность, затрачиваемую на поддержание системы, в 1.1 раза, она все равно имеет запас по вырабатываемой мощности:

$$P > P_{\text{потр}} \cdot 1.1 = 2.7 > 1.576 \cdot 1.1 = 2.7 > 1.734 \text{ Вт.}$$

Заключение по расчетам. Разница в генерируемой и потребляемой мощностях системы равна 0.966 Вт (с учетом потерь в редукторе и при трении маятника о воздух). Из расчетов следует, что система производит положительную мощность даже при одном присоединенном генераторе. Количество присоединяемых генераторов зависит от многих факторов – от силы трения во всех подшипниках, силы сопротивления ротора при генерации электрической энергии, потерь в редукторе и даже от трения маятника о воздух. Приемлемым будет количество генераторов, оказывающих останавливающее воздействие на маятник менее того значения, при котором маятник не сможет быть притянут электромагнитами к положению своей максимальной амплитуды, т. е. при том значении, при котором маятник продолжит свои колебания без остановки.

Для проверки расчетных результатов и дальнейшей оптимизации системы принято решение по изготовлению прототипа данного генератора.

У всех возобновляемых источников энергии имеются свои недостатки, препятствующие в той

или иной степени выработке энергии или негативно влияющие на окружающую среду.

Ввод данного генератора в эксплуатацию может положительно повлиять на глобальную энергетику, так как этот генератор электрической энергии не имеет привязок к географическому положению, времени суток, временам года и другим проблемам известных источников возобновляемой энергии.

Он может не только применяться как стационарная установка, но и устанавливаться на различные виды транспорта для частичного или полного питания внутренних электрических систем.

В данной статье представлен расчет, позволяющий судить о целесообразности продолжения исследований системы, разработке прототипа, и, при его работоспособности, улучшении энергетической обстановки в будущем.

Рассмотрен способ преобразования энергии гравитации в электроэнергию.

Рассмотрен пример такого способа генерации с рассчитанными параметрами потребляемой (1.734 Вт) и генерируемой мощности (2.7 Вт), подтверждающий работоспособность генератора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров О. А., Барбашина Е. А. Возобновляемые источники энергии: анализ состояния, основные проблемы и перспективы развития в России // Вестн. современных исследований. 2018. № 4. С. 163–165.
2. Определение периода больших колебаний маятника (до 90°) / В. В. Талалай, А. В. Кочетков, П. В. Федотов, М. В. Талалай // Интернет-журн. «Научноеведение». 2016. Т. 8, № 5. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/73TVN516.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. яз. рус., англ.
3. Аппель П. Теоретическая механика; в 2 т. Т. 1. М.: Физматгиз, 1960.
4. AliExpress. URL: https://ru.aliexpress.com/item/32761636793.html?spm=a2g0v.search0302.3.120.859e5dbenW8ofp&ws_ab_test=searchweb0_0,searchweb201602_0,searchweb201603_0,ppcSwitch_0&algo_pvid=8c0b2a5d-d8e9-4683-a607-6a3b1be9ffd7&algo_expid=8c0b2a5d-d8e9-4683-a607-6a3b1be9ffd7-17 (дата обращения 14.01.2020).
5. Брылина О. Г., Гельман М. В. Исследование трехфазного активного выпрямителя напряжения // Электротехнические системы и комплексы. 2014. № 1. С. 47–50.
6. Исследование зависимости мощности синхронных электрических машин от главных размеров и частоты вращения ротора / Я. М. Кашин, А. Я. Кашин, А. С. Князев, А. В. Ракло // Вестн. Адыгейского гос. ун-та. Сер. 4: Естественно-математические и технические науки. 2016. № 3. С. 99–108.
7. Goldberg O. D., Sviridenko I. S. Designing of electrical machines. М.: Vyssh. Shk., 2006. P. 18.
8. Лельчук Л. Ю. Физический маятник М.: Изд-во Томского политехн. ун-та. 2012.
9. Горбатый И. Зависимость периода колебания маятника от амплитуды // Квант. 2005. № 2. С. 27–29.
10. Пилипосян С. Е. Измерение момента инерции произвольного твердого тела // Тр. НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2010. № 4. С. 100–110.
11. Пахомин С. А. Проектирование синхронных генераторов: учеб. пособие к курсовому проекту по электромеханике / ЮРГТУ. Новочеркасск, 2007.
12. Балагуров В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. М.: Высш. шк., 1982.
13. Elemag. URL: <https://elemag.dp.ua/p548674810-rele-zaderzhki-12v.html> (дата обращения 15.01.2020)

S. A. Trembach
Cherepovets State University (ChSU)

SYSTEM FOR GENERATING ELECTRICAL ENERGY WITH ELECTROMAGNETIC STIMULATION OF THE MOVEMENT OF A PHYSICAL PENDULUM

This article describes a method for converting the energy of pendulum oscillations into electrical energy, and also calculates the output and consumption of the energy generation system through pendulum oscillations. System for converting energy of gravity into electrical consists of a physical pendulum, the frame on which pendulum is mounted on ball bearings, at least one driven and at least one leading gear mechanism, the generator, acceding to the pendulum via the same gear mechanism, the battery, where all the generated energy is supplied and from which energy is drawn on to maintain the system, two electromagnets that keep the pendulum oscillating undisturbed, and the two relays that optimizes the energy consumption of the electromagnets and set them mode, according to the period of complete oscillation of the pendulum. Based on the results of the calculation the production of a prototype of this electric power generator was launched. Putting this generator into operation will have a positive impact on the energy situation around the world – this electric power generator does not depend on the geographical location, as well as other factors, such as the time of day, time of year, and other problems of known renewable energy sources.

Renewable energy sources, gravity energy, physical pendulum, generation of electric energy

УДК 621.365.5

С. С. Титов
ООО «Научно-производственное предприятие „Система48“» (г. Липецк)

В. Н. Мещеряков, Д. В. Безденежных
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет»

Исследование процесса нагрева металлических шаров в инновационной индукционной установке

Рассматривается исследование процесса нагрева металлических шаров в инновационной индукционной установке для поточного осесимметричного нагрева металлоизделий с дискретной площадью поперечного сечения, проанализировано время нагрева металлического шара до заданной температуры в зависимости от его параметров и режимов работы установки, представлены результаты моделирования процессов и проведенных экспериментальных исследований, а также их сопоставление и анализ. Следует отметить, что создание энергоэффективного оборудования непрерывного действия, обеспечивающего симметричный нагрев на заданную глубину под термообработку изделий шарообразной формы без окисления и обезуглероживания, исключительно актуально для ряда отраслей промышленности, в частности в массовых производствах мелющих тел для горно-обогатительных фабрик и цементных заводов, шариков для подшипников качения и клапанов в гидравлических системах, в том числе высокоизносостойких шариков в обратных клапанах глубинных насосов для нефтедобычи, и др. Рассматриваемая установка индукционного нагрева металлических шаров отличается высоким уровнем новизны, что подтверждено патентами РФ, а также интересом к разработке со стороны ряда промышленных предприятий в РФ (АО «Оскольский электрометаллургический комбинат», «Евроцемент групп» и др.) и за рубежом, в частности «TENOVA LOI Thermprocess GmbH» (Германия) и «Magnatech GmbH» (Австрия).

Установка индукционного нагрева, осесимметричный индукционный нагрев, металлоизделие шарообразной формы, токи высокой частоты, металлический шар, закалка

В последние несколько лет вышел ряд публикаций [1]–[3], в том числе на международном уровне (отчет о международном поиске международного поискового органа по процедуре Patent Cooperation Treaty – номер международной заявки

PCT/RU 2019/050223), затрагивающих вопросы симметричного индукционного нагрева под термообработку металлоизделий шарообразной формы на заданную глубину токами повышенной частоты. Прикладное назначение использования