

N. I. Tatarintsev, D. S. Karasyov
Saint Petersburg Electrotechnical University

ENERGY-SAVING MODE APPLICATION IN THE VARIABLE-FREQUENCY INDUCTION ELECTRIC DRIVE

Considers ways to reduce the industrial units' electric drives energy consumption, in particular, variable-frequency induction drives. The economic potential assessment of energy conservation in the drives under consideration. The need for reducing energy consumption in the units under consideration is shown. The possible implementing method an energy-saving mode operation under scalar control with a proportional control law is described in detail. An application analysis of the scalar control principles is made, as well as the presented reducing energy consumption method in industrial frequency invertors. An electric drive operation temporary diagram during the entering to the energy-saving mode and exiting from it is presented, demonstrating the energy-saving parameters influence to the drive operation in the presented energy-saving mode. Also, it considers energy-saving mode drawback and the possible consequences of its use are revealed.

Variable-frequency AC electric drive, energy-saving electric drive, V/f control, energy-saving mode in the frequency inverter

УДК 620.92

Н. Нтавухоракомейе
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Л. Ндайрагиже
Государственный университет Бурунди

Проектирование и разработка экономически эффективного контроллера заряда автономной солнечной электростанции

Спроектирован и разработан экономичный и эффективный контроллер солнечной электростанции с автоматическим выключателем и индикатором при учете климатических условий Республики Бурунди. Этот контроллер заряда работает с топологией DC-DC-преобразователя для зарядки аккумулятора. Система реализована с использованием недорогих и распространенных аппаратных компонентов. Разработанный контроллер заряда в сочетании с регулируемым напряжением и током подходит для автоматического включения-выключения электростанции. Для увеличения срока службы аккумуляторной батареи циклы ее перезарядки оптимизируются. В системе использована регулируемая интегральная микросхема (IC – integrated circuit), для управления напряжением преобразователя постоянного тока. Описана архитектура системы для регулируемого источника питания с выходом 14 В, 3 А. В представленной системе применяется резистивное управление для ограничения выходного сигнала ППТ, а также для ограничения напряжения или тока.

Результаты испытаний подтверждают, что применение предложенного метода приводит к лучшему использованию доступной солнечной энергии.

Контроллер заряда, аккумуляторная батарея, преобразователя постоянного тока, микроконтролер, резистивное управление

В настоящее время растет спрос на использование солнечной энергии в связи с повышенной потребностью в электричестве и истощением невоз-

обновляемых источников энергии. Поскольку солнечная энергия не постоянна, а зависит от погодных условий – солнечного излучения и температуры

окружающей среды, аккумуляторная батарея (АкБ) всегда подключена между солнечной панелью и нагрузкой через контроллер заряда для защиты аккумулятора от перегрузки и глубокого разряда.

В автономных фотоэлектрических системах АкБ широко используются для питания нагрузок при отсутствии солнечного излучения. Эти АкБ чувствительны к явлениям перегрузки, глубокого разряда, а также температурных и токовых дрейфов, поэтому они должны быть связаны с контроллером, чтобы обеспечить их защиту, т. е. чтобы поддерживать АкБ на максимально возможном уровне заряда. Тем не менее, это должно быть сделано с большой осторожностью, чтобы соответствовать требованиям стоимости, простоты и надежности [1]. По мере развития технологии управление зарядом может выполняться в ряде схем различных типов.

АкБ с чрезмерным зарядом имеют гораздо более короткий срок службы, так как электролит испаряется в виде газа и теряется. Контроллер заряда используется для отключения любой нагрузки, когда АкБ разряжается до безопасного напряжения отключения, поскольку чрезмерно разряженные свинцово-кислотные АкБ необратимо повреждаются [2].

Основными целями создания контроллера являются компактность и в основном аппаратная конструкция, эффективная работа для обеспечения регулируемого выходного напряжения и возможность автоматического отключения в случае полной зарядки батареи.

Модель и система солнечного элемента. Фотоэлектрические панели преобразуют солнечный свет в электрическую энергию, что является одним из лучших подходов для получения электроэнергии в течение длительного времени. Преобразование солнечного света в электроэнергию в значительной степени зависит от уровня инсоляции и эффективности элемента.

Солнечные фотоэлектрические системы используются сегодня для освещения, зарядки ак-

кумулятора, откачки воды, спутниковых систем питания и т. п.

Модель фотоэлектрического генератора используется для расчета выходной мощности фотоэлектрических панелей при любых условиях температуры и освещенности. Идеальный фотоэлемент может быть представлен источником тока с параллельно подключенным диодом. В этом случае последовательные и шунтирующие сопротивления считаются равными нулю и бесконечности соответственно. Тем не менее, в реальной системе как последовательные, так и шунтирующие сопротивления имеют определенные значения и должны учитываться. На рис. 1 представлены эквивалентные схемы солнечного элемента: *a* – идеальная, *b* – реальная [3].

На рис. 1, *b* генерируемый ток *I* фотоэлементом определяется как

$$I = I_{к.з} - I_d - I_{sh}; \tag{1}$$

$$I = I_{к.з} - I_0 \left(e^{\frac{U+IR_s}{nU_T}} - 1 \right) - \left(\frac{U+IR_s}{R_{sh}} \right), \tag{2}$$

где U_T – тепловое напряжение; R_s и R_{sh} – внутренние последовательное и параллельное сопротивления соответственно; $I_{к.з}$ – ток короткого замыкания; I_0 – ток обратного насыщения; U – выходное напряжение; I – выходной ток; n – коэффициент идеальности диода (1~2); I_d – ток диода, I_{sh} – шунтирующий ток.

Так как параллельное сопротивление одного фотоэлектрического модуля намного менее значимо по сравнению с последовательным, пренебрегнув им, получим уравнение выходного тока в следующем виде:

$$I = I_{к.з} - I_0 \left(e^{\frac{U+IR_s}{nU_T}} - 1 \right); \tag{3}$$

Выходное напряжение фотоэлемента может быть найдено с учетом того, что тепловое напряжение зависит от абсолютной температуры T

$$U_T = \frac{KT}{q} \text{ в (3), как}$$

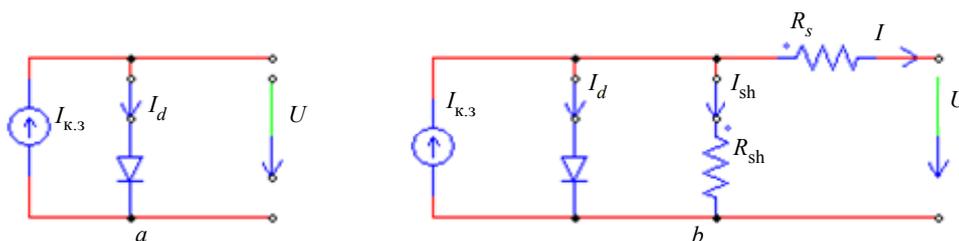


Рис. 1

$$U = -IR_s + \frac{AKT}{q} \ln \frac{(I_{к.з} + I_0 - I)}{I_0}, \quad (4)$$

где q – заряд электрона ($1.6021 \cdot 10^{-19}$ С); K – константа Больцмана ($1.3854 \cdot 10^{-23}$ Дж · К⁻¹); T – температура, К.

Преобразователь напряжения. Преобразователь регулирует солнечное (фотоэлектрическое) напряжение: мгновенное изменение солнечного излучения приводит к изменению фотоэлектрического тока, фотоэлектрическое напряжение остается неизменным. Рис. 2 показывает характеристики преобразователя и солнечного элемента [4]. Существует только одна точка пересечения этих величин – точка В на рисунке. При написании дифференциального уравнения для индуктора можно сделать вывод, что эта рабочая точка стабильна. Таким образом, контроллер выходного напряжения может сделать систему стабильной, контроллер заряда напряжения обеспечивает стабильную работу в любых условиях [5].

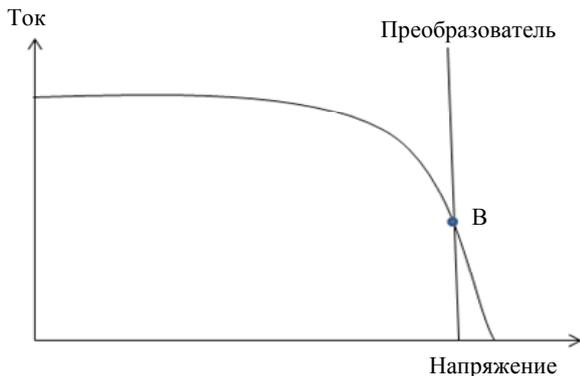


Рис. 2

Проектирование предлагаемого преобразователя напряжения. Управление зарядкой от солнечной энергии объединяет несколько функций в единую конструкцию: при низком падении напряжения LDO¹-регуляторы должны обеспечивать стабилизацию напряжения при минимально возможной разнице между входным и выходным напряжениями [6], номинальный ток 3 А, диапазон регулировки напряжения (свинцово-кислотные батареи 12 В) и защиту от обратной полярности. Высокая эффективность объясняется применением обычного операционного усилителя (орамп) LM358 и стабилитрона в качестве шунтирующего регулятора напряжения.

¹ LDO – low dropout voltage.

Среди преимуществ LDO-регуляторов напряжения по сравнению с другими регуляторами постоянного тока – отсутствие шума переключения (поскольку переключения не происходит), меньший размер устройства и большая простота конструкции [6].

Другие характеристики разработанного контроллера заряда представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметр	Значение
Солнечный зарядный ток	от 0 до 3 А
Номинальное напряжение аккумулятора	12 В
Номинальное напряжение солнечной панели	от 14 до 20 В (50 Вт)
Тип батареи	Свинцово-кислотный (проверено при 12 В, 15 А · ч)
Защита от перезаряда и разряда путем сравнения тока в форме напряжения	√
Выравнивание заряда	√
Регулируемое выходное напряжение	√
3 светодиодных индикатора для отображения состояния контроллера заряда: – красный светодиод включен; – зеленый светодиод включен	Показывает вывод с панели Зарядка аккумулятора Показывает вывод с панели

Упрощенная аппаратная блок-схема солнечной зарядной системы, спроектированной с учетом низкой стоимости и низкого энергопотребления при сохранении методологии управления зарядки, показана на рис. 3.

Алгоритм управления зарядом. Сначала выясняется, превышает ли напряжение 14.1 В. Если да, то нагрузка включена, а солнечная батарея выключена. Таким образом, напряжение будет уменьшаться. Если напряжение АКБ опускается ниже 13.5 В, начинается нормальная зарядка. Если напряжение все еще выше 13.5 В, солнечная панель отключается для предотвращения гистерезиса. Если же напряжение АКБ меньше 10.3 В, тогда нагрузка отключается и подключается солнечная панель. Нагрузка будет отключена до 11.3 В – точки низкого напряжения повторного подключения. При напряжении выше 11.3 В нагрузка и солнечная батарея подключены нормально. На рис. 4 показана блок-схема цепи контроллера заряда.



Рис. 3

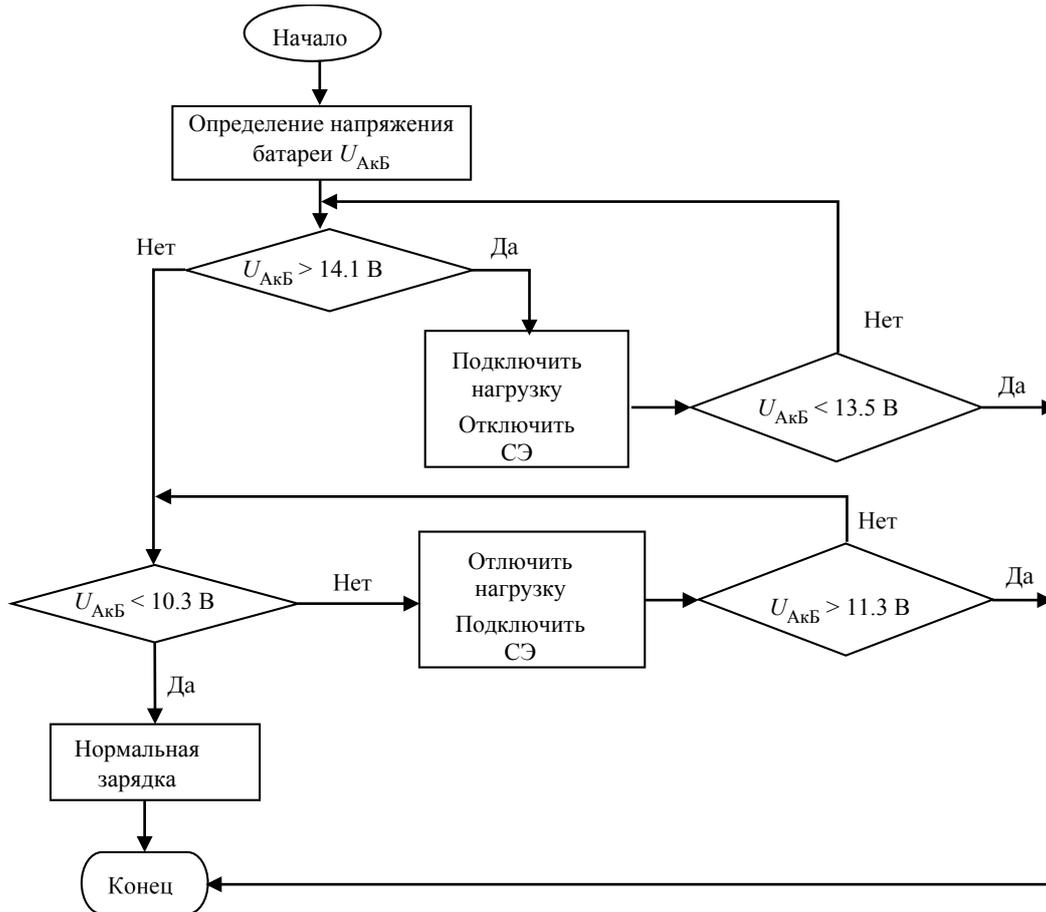


Рис. 4

Схема работы. На схеме представлен понижающий преобразователь (Buck Converter 3A) с регулятором IC LM2596, имеющим регулируемый диапазон выходного напряжения 1.23–37 В, гарантированный выходной ток нагрузки 3 А, диапазон входного напряжения до 40 В. Полная принципиальная схема LM2596 показана на рис. 5 (1.2–37 В; регулируемый источник питания 3.0 А с низкой выходной пульсацией (схема включения LM2596)).

Полная схема разработанного солнечного контроллера заряда представлена на рис. 6.

Описанный контроллер заряда был создан в соответствии с точными характеристиками про-

цесса зарядки аккумулятора, которая может производиться при постоянном напряжении или постоянном токе. В данном случае процесс зарядки выполняется методом постоянного напряжения. При этом методе в начале зарядки напряжение АКБ увеличивалось с низкого до высокого уровня, а ток уменьшался с высокого до низкого уровня. Например, начальный уровень разряженной батареи составляет 10.3 В для 12-вольтовой батареи, и когда происходит зарядка, уровень напряжения сначала увеличивается до номинального зарядного напряжения 14.1 В. По мере того как начальный зарядный ток 1 А подается на батарею, в процессе зарядки он будет понижаться.

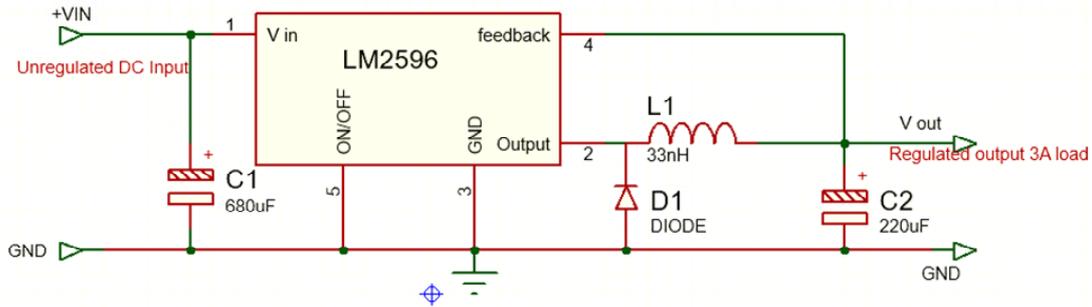


Рис. 5

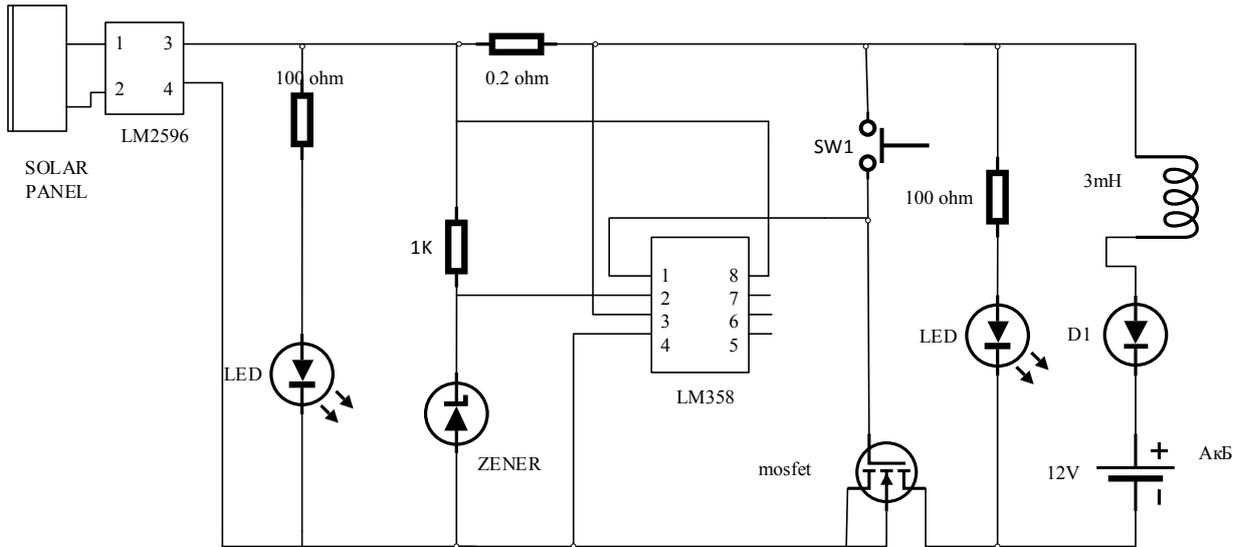


Рис. 6

Когда напряжение батареи достигнет 14.1 В, ток на батарее будет резко уменьшен до 50 мА, и эта схема будет автоматически отключена от панели с АкБ. В качестве переключателя используется MOSFET (МОП-транзистор, металлоокисный полупроводник). Переключение MOSFET контролируется операционным усилителем (ОПУ), который используется в качестве компаратора. ОПУ сравнивает два входа, один из которых – опорное напряжение, которое генерируется стабилитроном (Zener diod), а второй – ток АкБ в виде переменного напряжения.

Результаты эксперимента и обсуждения. Экспериментальное тестирование зарядки при помощи разработанного контроллера заряда было проведено на свинцово-кислотной АкБ 12В–15А · ч. Табл. 2 показывает результаты тестирования солнечной панели с этим аккумулятором.

Технические параметры используемой панели: максимальная мощность = 40 Вт; оптимальное напряжение или напряжение при пиковой мощности $U_{\text{опт}} = 17.35$ В; Оптимальный рабочий ток $I_{\text{опт}} = 2.31$ А; разрыв в цепи напряжения пита-

ния или напряжение холостого хода $U_{\text{х.х}} = 21.16$ В; ток короткого замыкания $I_{\text{к.з}} = 2.53$ А.

Напряжение зарядки солнечной панели было отмечено и зарегистрировано в начале эксперимента, который проводился с 11:30 до 16:00. Значения напряжения и тока были записаны через каждые 30 мин. Эксперимент продолжался, пока батарея не зарядилась полностью. Результаты экспериментального тестирования зарядки с аккумулятором 12 В, 15 А · ч показаны в табл. 2.

График зависимости напряжения аккумуляторной батареи от времени зарядки показан на рис. 7.

Из табл. 2 видно, что в начале тестирования напряжение на панели было 19 В, а на АкБ – 11 В, что обеспечивает разность потенциалов, необходимую для протекания тока от солнечной панели к АкБ. В это время АкБ заряжается. Можно отметить, что напряжение солнечной панели стабильно увеличивалось с 11:30 до 12:30, со значениями от 19 до 20 В соответственно (пик в 12:30), затем постепенно снижалось до 18.6 В в 14:00. Солнечное излучение в Республике Бурунди в это время

Таблица 2

Время	Выходные значения солнечной панели		Состояние зарядки АКБ	
	Выходное напряжение U , В	Выходной ток I , А	Выходное напряжение U , В	Выходной ток I , А
11:30	19.0	1.20	11	1.00
12:00	19.8	1.40	11.8	0.90
12:30	20.0	1.50	12.2	0.70
13:00	20.0	1.80	13	0.60
13:30	19.8	2.00	13.2	0.50
14:00	18.6	1.60	13.5	0.35
14:30	17.0	1.40	13.9	0.20
15:00	16.4	1.30	14.0	0.15
15:30	16.0	1.20	14.0	0.10
16:00	15.0	1.00	14.10	0.05

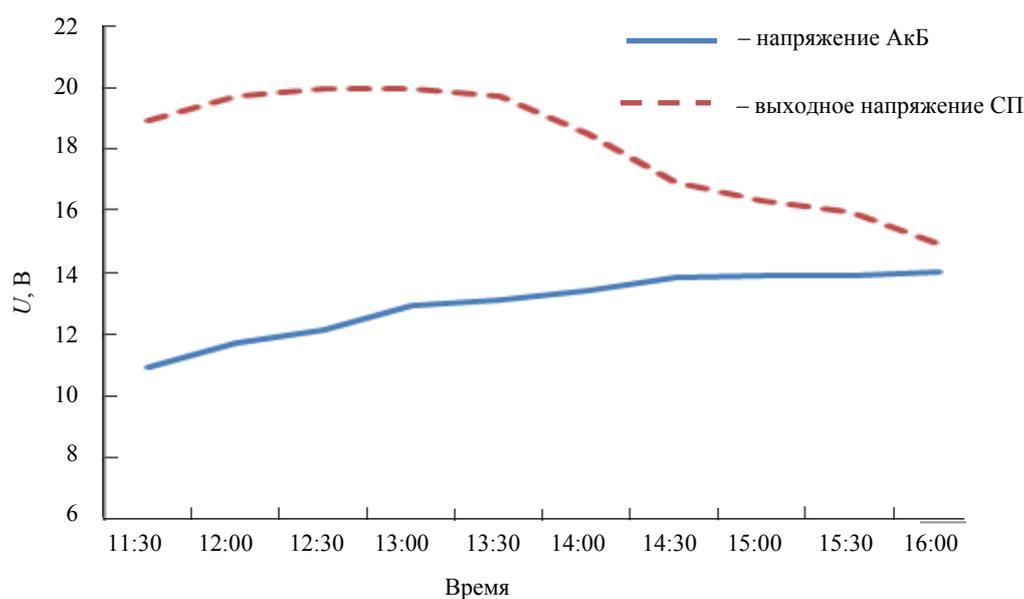


Рис. 7

достигает максимума, и видно, что и ток солнечной панели повышается от 1.20 А в 11:30 до 2.00 А в 13:30, а потом немного падает.

Разработан контроллер, позволяющий управлять зарядом батареи с оптимальными значениями тока и напряжения.

Контроллер для зарядки аккумулятора работает с топологией DC-DC-преобразователя. Система была реализована с использованием недорогих компонентов, разработанный контроллер заряда в сочетании с регулируемым напряжением и током подходит для автоматического включения-выключения режима заряда.

Стоимость общей системы контроллера солнечного заряда может понижаться в зависимости

от методов управления зарядкой АКБ, обеспечивающих высокий уровень заряда и срок службы аккумуляторной батареи в изменяющихся погодных условиях, которые приводят к прерывистой работе солнечной батареи. Надлежащее регулирование контроллера заряда обеспечивает максимизацию энергии, передаваемой на батарею, и таким образом, достигается лучшая эксплуатация солнечной батареи. Так как система зарядки работает с более высоким уровнем заряда, срок службы АКБ увеличивается. Результаты испытаний подтверждают, что использование предложенного метода приводит к лучшему использованию доступной солнечной энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Solar controller design with MPPT / S. Gueye, I. Gueye, L. Thiaw, G. Sow, A. Ndiaye, M. Thiam // Online Jan. Portals of African reviews «Cames Review – Applied

Science and Engineering control». 2015. Vol. 1, № 2. P. 104–108. URL: <http://publication.lecames.org/> (дата обращения 10.07.2019).

2. Lee J. H., Bae H. S., Cho B. H. Resistive control for a micro-controller photovoltaic battery charging system // IEEE Industrial Electronics Transactions. 2008. Vol. 55, № 7. P. 2767-2775.

3. Салман С., Синь А. И., Чжоуян В. У. Разработка контроллера заряда МРРТ на основе алгоритма P – & – О для автономной фотоэлектрической системы мощностью 200 Вт. URL: <https://doi.org/10.1186/s41601-018-0099-8> (дата обращения 15.07.2019).

4. Оптимальная зарядка аккумулятора с использованием солнечной фотоэлектрической системы в автономной системе постоянного тока / С. Ананд, Р. С. Фарсван, Б. Мангу, Б. Г. Фернандес // 6-я Междунар. конф. IET по силовой электронике, машинам и приводам (2012). URL: <https://www.crossref.org/iPage?doi=10.1049%2Fсп.2012.0339> (дата обращения 19.07.2019).

5. Кумар М., Лама Д. Проектирование и разработка экономически эффективного автоматического отключения PV. Контроллер заряда с индикатором // IOSR по электротехнике и электронике (IOSR-JEEE). 2015. Т. 10, вып. 3. URL: www.iosrjournals.org (дата обращения 11.08.2019).

6. LDO-регуляторы. URL: <http://www.russianelectronics.ru/developer-r/review/micro/doc/50621/> (дата обращения 18.08.2019).

7. Экономичный контроллер солнечной зарядки / А. Рахаман, М. А. Матин, А. Саркер, Р. Уддин // IJRET: Междунар. журн. иссл. в обл. техники и технологий. 2015. № 3. URL: <http://www.ijret.org> (дата обращения 19.08.2019).

8. Регуляторы серии LM2596. URL: <https://rudatasheet.ru/datasheets/dc-dc-lm2596/> (дата обращения 20.08.2019).

N. Ntawuhorakomeye
Saint Petersburg Electrotechnical University

L. Ndayragije
Burundi State University

DESIGN AND DEVELOPMENT OF A COST-EFFECTIVE SOLAR CHARGE CONTROLLER FOR AUTONOMOUS SOLAR POWER PLANT

Currently, the use of solar energy is growing in demand due to increased energy requirements and the depletion of non-renewable sources. But the problem with solar energy is that it is not constant; and depends on weather conditions, such as solar radiation, temperature, that's why the battery is always connected between the solar panel and the load through the charge controller, to protect the battery from overload and deep discharge. In this article, an economical and efficient solar electrical controller with a circuit breaker and indicator was designed and developed, taking into account the climatic conditions of the Republic of Burundi.

This solar charge controller works with the topology of a DC-DC converter to charge the battery. The system is implemented using low-cost and limited hardware components. The developed solar charge controller, in combination with adjustable voltage and current, is suitable for automatic on-off. To increase the service life, the battery recharge cycle is optimized, and due to the reduction of the recharge cycle, the battery life is increased. An integrated IC was used in our system to regulate the voltage of the DC / DC converter. The system architecture for a regulated power supply with an output of 14 V and 3 A is described. The presented system uses resistive control to limit the output signal of a DC / DC converter, as well as to limit voltage or current.

Test results confirm that the use of the proposed method leads to a better use of available solar energy.

Charge controller, battery, DC/DC converter, microcontroller, resistive control
