УДК 004.71:621.311

УСТРОЙСТВО УДАЛЕННОГО МОНИТОРИНГА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

¹Кузнецов П.Н., ¹Лавренчук А.А., ²Юферев Л.Ю.

¹ΦΓΑΟУ ВО «Севастопольский государственный университет», Севастополь, e-mail: PNKuznetsov@sevsu.ru; ²ΦΓБНУ «Федеральный государственный агроинженерный центр ВИМ», Москва, e-mail: leouf@ya.ru

Статья посвящена актуальному вопросу – разработке устройства удаленного мониторинга электрических параметров и работоспособности фотоэлектрических преобразователей посредством сети Интернет. Обоснована необходимость его применения на солнечных энергоустановках на примере проблем, возникших в результате эксплуатации Севастопольской солнечной электростанции (ООО «С. Энерджи Севастополь»). Представлена структурная схема устройства, показывающая связь и назначение его основных функциональных элементов. Изложена информация об использованных в устройстве датчиках, имеющих гальваническую изоляцию, – датчика тока, выполненного на основе интегрального датчика тока фирмы Allegro – ACS712, и напряжения, имеющего в основе транзисторную оптопару, приведен анализ их работы. Предоставлены результаты работы устройства, иллюстрирующие суточную работу фотоэлектрической установки в солнечный осенний день. Описанное в статье устройство позволяет производить постоянный мониторинг работы фотоэлектрических преобразователей с долгосрочным хранением измеренных данных в графической и числовой форме, что дает возможность наглядно производить аналитику работы солнечной энергоустановки, отслеживать её работоспособность, сравнивать ключевые индикаторы производительности различных участков, получать отчетность о произведенной электроэнергии по периодам с построением графиков, а также получать сигналы тревог.

Ключевые слова: удаленный мониторинг, фотоэлектричество, контроль параметров, солнечная электростанция

REMOTE MONITORING DEVICE OF ELECTRICAL PARAMETERS AND PERFORMANCE OF SOLAR POWER STATION

¹Kuznetsov P.N., ¹Lavrenchuk A.A., ²Yuferev L.Yu.

¹Sevastopol State University, Sevastopol, e-mail: PNKuznetsov@sevsu.ru; ²Federal Scientific Agroengineering Centre VIM, Moscow, e-mail: leouf@ya.ru

The article is devoted to the topical issue – the development of a device for remote monitoring of electrical parameters and operability of photoelectric converters via the Internet. The necessity of its use in solar power plants as an example of problems arising from the operation of solar power Sevastopol (LLC «S. Energy Sevastopol»). A block diagram of the device is shown showing the connection and purpose of its main functional elements. The information about the sensors used in the device, which have galvanic isolation, – the current sensor, made on the basis of the integrated current sensor from Allegro – ACS712, and the voltage, which is based on a transistor optocoupler, are analyzed. Presented results of the device operation illustrating the daily operation of the photovoltaic system on a sunny autumn day. The described device allows for continuous monitoring of photovoltaic cells, long-term storage of measurement data in graphical and numerical form. This makes it possible to visually analyze the operation of a solar power plant, monitor its efficiency, compare key performance indicators of various sites, obtain reports on the electricity produced by periods with the construction of graphs, and receive alarm signals.

Keywords: remote monitoring, photovoltaic, parameter control, solar power plant

Одной из важных задач развития электроэнергетики Крыма, являющегося одновременно регионом военного и рекреационного значения, является повышение его энергетической безопасности посредством создания собственных рассредоточенных энергогенерирующих установок, не наносящих вреда экосистеме полуострова. Это возможно достигнуть за счет использования экологически чистых возобновляемых источников энергии – энергии солнца и ветра, энергетический потенциал которых в данном регионе один из наибольших в стране. В настоящее время в Крыму уже построены солнечные и ветроэлектростанции с установленной мощностью 227,3 и 87 МВт соответственно, покрывающие более 5% потребности электроэнергии [1].

При проведении исследовательской работы на Севастопольской солнечной электростанции (ООО «С. Энерджи-Севастополь») была обнаружена проблема, связанная с тем, что часть групп фотоэлектрических преобразователей была отключена и, как следствие, не передавала электрическую энергию в сеть [2, 3]. Причинами этого явления послужили выход из строя части предохранителей, установленных в коммутационных коробках, частичное затенение фотоэлектрических модулей, обрывы соединительных проводов и заводской брак разъемов МС4 [4]. Причем каждая из этих

причин приводила к отключению не одной фотоэлектрической панели, а всей последовательно соединенной группы, состоящей из 18 панелей. Проблема также усугублялась тем фактом, что обслуживающий персонал не имел возможности оперативного обнаружения данных неисправностей ввиду большого количества групп панелей (около 550 штук) и отсутствия специальных средств диагностики. Таким образом, возник вопрос организации удаленного мониторинга работы солнечной электростанции, позволяющего отслеживать работоспособность групп фотоэлектрических панелей, а также осуществлять аналитику основных электрических параметров.

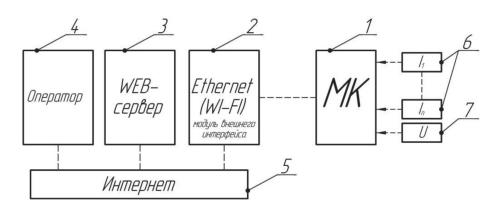
На рис. 1 изображена структурная схема устройства удаленного мониторинга электрических параметров солнечной электростанции. Основным вычислительным элементом устройства является микроконтроллер (1), на вход которого поступают сигналы от датчиков тока (6) и напряжения (7), измеряющих электрические параметры батарей фотоэлектрических преобразователей. Для передачи данных от микроконтроллера на сервер (3) используется модуль внешнего интерфейса (2). Сервер принимает данные, производит их запись и конечную обработку, для удобного восприятия оператором (4), затем формирует обратный ответ и передает его обратно микроконтроллеру. Передача данных между модулем внешнего интерфейса, сервером и оператором производится посредством коммуникационной системы Интернет.

Сравнительный анализ показал, что наиболее целесообразным представляется использование в устройстве микроконтроллеров фирмы Atmel – Atmega 328р. Это связано с тем, что такой контроллер имеет встроенный десятиразрядный аналогоцифровой преобразователь (АЦП), расши-

ренную систему команд и периферийных устройств, а также низкую стоимость [5]. Данный контроллер установлен на аппаратных платформах Arduino (Uno, Mini и др.), имеющих необходимый набор элементной обвязки, для интеграции с платами расширения, а также встроенный линейный стабилизатор напряжения и кварцевый резонатор с частотой 16 МГц. Кроме того, разработку программного обеспечения для контроллера, при использовании платформы Arduino, можно производить в бесплатной среде разработки Arduino IDE, имеющей множество библиотек, упрощающих работу с внешними устройствами.

Для контроля работы и измерения тока в батареях фотоэлектрических преобразователей использован интегральный датчик тока фирмы Allegro - ACS712. Главными достоинствами этого датчика являются гальваническая развязка между силовой цепью и контроллером и отсутствие температурной зависимости. Принцип работы датчика основан на эффекте Холла – протекающий через проводник электрический ток создает магнитное поле, воспринимаемое встроенным в кристалл элементом Холла. Величина магнитного поля линейно зависит от силы проходящего тока. Встроенный в микросхему формирователь сигнала фильтрует создаваемое чувствительным элементом напряжение и усиливает его до уровня, достаточного для АЦП [6].

Выбор данного датчика также обусловлен высокой точностью измерений, выполненных посредством его использования. Причем результаты калибровок показывают, что погрешность составляет не более 9 мА, что существенно меньше данных, указанных в паспорте [7]. На рис. 2 изображена схема включения и общий вид датчика тока ACS712:



Puc. 1. Структурная схема устройства удаленного мониторинга электрических параметров солнечной электростанции

Для улучшения соотношения сигналшум на выходе в датчике предусмотрен RC фильтр. ACS712 содержит встроенный резистор, доступный на 6 выводе микросхемы, в связи с этим включен только внешний конденсатор C_F . При анализе выходных параметров датчика наблюдался большой разброс выходных значений, связанных с его чувствительностью. Исследования показали, что для получения наиболее оптимального значения необходимо повторить цикл измерения не менее 500 раз с нахождением среднего арифметического значения. Программный код выглядит следующим образом:

```
for (int i=0; i<500; i++) { //оператор повторения цикла (500 раз) x = 0.0264*(analogRead(z)-510); //измерение мгновенного значения тока y += x; }//суммирование мгновенных значений тока I = y/500; // нахождение среднего арифметического lcd.print(I); // вывод значения тока
```

Для контроля напряжения и нахождения мощности фотоэлектрических преобразователей разрабатываемое устройство включает датчик напряжения, функциональная схема которого изображена на рис. 3.

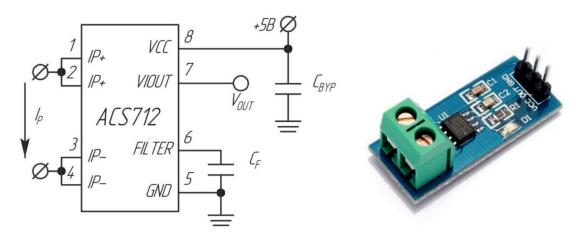


Рис. 2. Схема включения и общий вид датчика тока ACS712

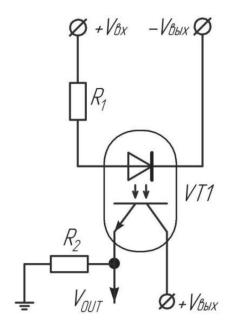


Рис. 3. Схема датчика напряжения

Датчик состоит из двух гальванически изолированных цепей: измерительной, состоящей из ограничительного резистора R1 и светодиода транзисторной оптопары, и информационной, состоящей из ограничительного резистора R2 и фототранзистора оптопары. Принцип работы датчика заключается в преобразовании входного напряжения в диапазоне от 0 до 800 В, в соответствующее выходное напряжение, находящееся в диапазоне удовлетворяющего входные параметры АЦП контроллера (от 0 до 5 В). Датчик, обладает высокой точностью измерений с погрешностью, не превышающей 0,05%, в реальном времени снабжает систему о параметрах, необходимых микроконтроллеру в широком диапазоне измерений.

На рис. 4 представлен график зависимости выходного напряжения датчика от входного, полученный в результате экспериментального исследования его работы.

Из рисунка видно, что изменение выходного напряжения происходит по линейной зависимости от входного по закону, описываемого уравнением

$$U_{\text{BMX}} = 0.06 \cdot U_{\text{BX}} - 0.73,$$

где $U_{_{\rm BX}}$ – выходное напряжение датчика, B; $U_{_{\rm BX}}$ – входное (измеряемое) напряжение датчика, B.

Учитывая разрядность АЦП контроллера, программный код для работы датчика выглядит следующим образом:

```
x = analogRead(z2); // измерение мгновенного значения напряжения U = (x+149)/12.24; // нахождение истинного значения delay (500); // пауза 0,5 с lcd.print(x); // вывод значения напряжения
```

Передача данных от микроконтроллера на сервер производится посредством отправки GET-запроса, который содержит обработанные значения параметров от датчиков. Реализация этой задачи осуществляется при помощи контроллера фирмы Wiznet – W5100, являющаяся функционально законченным 10/100 Ethernet-контроллером. Аппаратная реализация стека протоколов TCP/IP позволяет получать высокую скорость передачи данных – до 25 Мбит/с – и обеспечивает простую стыковку с Internet без участия операционных систем и внешних компьютеров.

Для взаимодействия с микроконтроллером ATmega 328р, принимающим сигналы от датчиков, целесообразно использовать Ethernet-shield, собранный на основе контроллера W5100, так как он имеет уже готовый необходимый набор элементной обвязки и упрощает программную и физическую коммутацию с платой микроконтроллера [8]. Связь контроллеров осуществляется посредством SPI интерфейса. Wiznet W5100 выступает в качестве ведомого устройства SPI, а микроконтроллер ATmega 328р в качестве ведущего. На рис. 5 изображена структурная схема их связи.

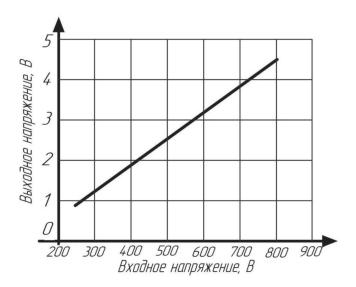
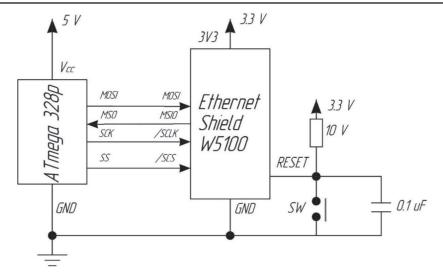


Рис. 4. График зависимости выходного напряжения датчика от входного



Puc. 5. Связь ATmega327p и W5100 no SPI

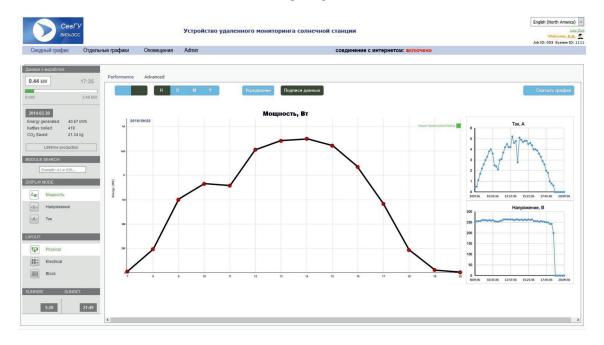


Рис. 6. Снимок экрана работы устройства удаленного мониторинга работы электрической станции

Отправка данных на WEB-сервер осуществляется с разной периодичностью. Это необходимо для уменьшения объема базы данных MySQL. Данные о напряжении и токе отправляются с периодичностью – 1 в минуту, а о мощности — каждый час. Для идентификации сервером устройства мониторинга, отправляемый GET-запрос содержит специальный ключ.

Электрическое питание всех элементов схемы осуществлялось посредством DC-DC преобразователя, выполненного по схеме бак (buck) преобразователя, получившего в последнее время широкое распростране-

ние в энергетических установках различного назначения, включающих источники постоянного напряжения, например аккумуляторные или солнечные батареи. В качестве основного ключевого элемента использовался IGBT транзистор APT45GP120. Разработанный преобразователь снижает напряжение с 550–700 В до 9 В и при этом выполняет его стабилизацию.

Для иллюстрации работы устройства на рис. 6 представлен снимок экрана окна браузера, в котором отображаются данные с WEB-сервера, полученные от разработанного устройства удаленного мониторинга.

Представленные данные отображают информацию о суточной мощности действующей установки ФЭП, измеряемой каждый час, а также значениях напряжения и тока. Благодаря тому, что измеренные электрические параметры отображаются в удобном графическом виде, система позволяет производить не только их наблюдение, но и получать рекомендации по оптимизации отдельных участков станции: установке оптимального угла, устранению частичного затенения (или минимизации его влияния), использованию различных вариантов коммутации фотоэлектрических модулей, применению дополнительных способов повышения эффективности [4, 9].

Разработанное устройство позволяет производить постоянный мониторинг работы ФЭП с долгосрочным хранением измеренных данных в графической форме, что дает возможность наглядно производить аналитику работы солнечной установки, отслеживать её работоспособность, сравнивать ключевые индикаторы производительности различных участков, получать отчетность о произведенной электроэнергии по периодам с построением графиков, получать сигналы тревог. К достоинствам устройства можно также отнести хорошую стабильность и наличие возможности простой настройки под различные нужды и задачи.

Список литературы

- 1. Крым располагает высоким потенциалом развития альтернативных источников энергии [Электронный ресурс]. Министерство топлива и энергетики Республики Крым. URL: http://mtop.rk.gov.ru/rus/index.htm/news/300719. htm (дата обращения: 17.03.2018).
- 2. Кузнецов П.Н. Повышение эффективности работы фотоэлектрической станции / П.Н. Кузнецов, В.А. Сафонов // Энергобезопасность и энергосбережение. -2016. -№ 3. C. 26–30.
- 3. Кузнецов П.Н. Повышение эффективности работы фотоэлектрических преобразователей при последовательном подключении / П.Н. Кузнецов, Л.Ю. Юферев // Вестник аграрной науки Дона. 2017. № 37. С. 15–25.
- 4. Кузнецов П.Н. Повышение эффективности работы фотоэлектрических преобразователей при последовательном подключении / П.Н. Кузнецов, Л.Ю. Юферев // Вестник ВИЭСХ. \sim 2017. \sim № 1 (26). \sim C. 90 \sim 97.
- 5. ATmega328 [Электронный ресурс]. Публичная информация компании Atmel Corporation. URL: http://www.atmel.com/devices/ATMEGA328.aspx (дата обращения: 17.03.2018).
- 6. Амелин С.А. Модель датчика тока на основе эффекта холла / С.А. Амелин, К.Г. Пульнова // Математическая морфология. Электронный математический и медико-биологический журнал. 2013. Т. 12, N 4.
- 7. Ошлаков В.С. Методика и результаты калибровки датчика тока acs712 / В.С. Ошлаков, А.Я. Суранов // Ползуновский альманах. -2016. -№ 2. -C. 187-189.
- 8. Immanuel R.R., Sankaranarayanan P., Sundari G. GPS and Ethernet based Real Time Train Tracking System // International Conference on Advanced Electronic Systems. 2013. P. 283–287.
- 9. Заголило С.А. Перспективы использования солнечной энергетики в децентрализованных энергорайонах Крайнего Севера / С.А. Заголило, А.С. Семёнов // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 11–3. С. 333-336.