

УДК 621.315.1  
doi:10.21685/2307-5538-2022-2-7

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА РАБОТЫ ПРОВОДОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ПРОЦЕССА НАГРЕВА

И. В. Игнатенко<sup>1</sup>, С. А. Власенко<sup>2</sup>, Е. Ю. Тряпкин<sup>3</sup>, А. И. Пухова<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск, Россия  
<sup>1</sup> systel@festu.khv.ru, <sup>2</sup> vsa\_ens@mail.ru, <sup>3</sup> evgenmehanik@mail.ru, <sup>4</sup> pu.shoc@mail.ru

**Аннотация.** *Актуальность и цели.* Рассматривается возможность использования автоматизации процесса сбора и обработки результатов процесса проведения экспериментальных исследований при нагреве проводов линии электропередачи. Целью работы является разработка технических средств измерений и программной среды, которая на основе получаемой информации от технических средств измерений позволит проводить обработку и систематизацию экспериментальных данных. *Материалы и методы.* Для решения поставленной задачи применяемые датчики и средства сбора/обработки данных были прокалиброваны в соответствии с другими средствами измерений. *Результаты.* Предложена схема реализации проведения автоматического измерения температуры во время проведения нагрева проводов. *Выводы.* В ходе работы проведена разработка специальной системы проведения измерений температуры испытуемого провода и разработан алгоритм контроля.

**Ключевые слова:** линия электропередачи, температура, ток, датчик

**Финансирование:** договор с АО «ДРСК» НИР «Разработка методики для определения аварийно-допустимых токов для ВЛ 110 кВ» № 46/620/21 от 02.02.2021.

**Для цитирования:** Игнатенко И. В., Власенко С. А., Тряпкин Е. Ю., Пухова А. И. Автоматизация измерений параметров режима работы проводов линий электропередачи при исследовании процесса нагрева // Измерения. Мониторинг. Управление. Контроль. 2022. № 2. С. 53–60. doi:10.21685/2307-5538-2022-2-7

## AUTOMATION OF MEASURING PARAMETERS OF THE OPERATING MODE OF POWER LINE WIRES WHEN STUDYING THE HEATING PROCESS

I.V. Ignatenko<sup>1</sup>, S.A. Vlasenko<sup>2</sup>, E.Yu. Tryapkin<sup>3</sup>, A.I. Pukhova<sup>4</sup>

<sup>1,2,3,4</sup> Far Eastern State University of Railway Transport, Khabarovsk, Russia  
<sup>1</sup> systel@festu.khv.ru, <sup>2</sup> vsa\_ens@mail.ru, <sup>3</sup> evgenmehanik@mail.ru, <sup>4</sup> pu.shoc@mail.ru

**Abstract.** *Background.* The work is devoted to the study of the possibility of using the automation of the process of collecting and processing the results of the process of conducting experimental research when heating the wires of the power transmission line. The aim of the work is to develop technical measuring instruments and a software environment, which, based on the information received from technical measuring instruments, will allow processing and systematization of experimental data. *Materials and methods.* To solve this problem, the used sensors and data collection / processing tools were calibrated in accordance with other measuring instruments. *Results.* A scheme for the implementation of automatic temperature measurement during the heating of wires is proposed. *Conclusions.* In the course of the work, a special system for measuring the temperature of the tested wire was developed and a control algorithm was developed.

**Keywords:** power line, temperature, current, sensor

**Financing:** contract with JSC "DRSK" R&D "Development of a methodology for determining emergency permissible currents for 110 kV overhead lines" No. 46/620/21 dated 02.02.2021.

**For citation:** Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Tryapkin E.Yu., Pukhova A.I. Automation of measuring parameters of the operating mode of power line wires when studying the heating process. *Izmereniya. Monitoring. Upravlenie. Kontrol' = Measurements. Monitoring. Management. Control.* 2022;(2):53–60. (In Russ.). doi:10.21685/2307-5538-2022-2-7

Рост потребляемой электроэнергии во всем мире постоянно увеличивается. Увеличение размеров электроэнергетической системы связано с рядом технических ограничений, а строительство новых генераторных мощностей и линий электропередачи (ЛЭП) требует значительных капитальных вложений. Поэтому использование возможностей существующей инфраструктуры на период проведения ремонтных и аварийных работ является важным фактором в определении эффективности деятельности электроснабжающей организации.

Так, в АО «ДРСК» находится в эксплуатации оборудование с большим износом (более 40 %), хотя и ниже, чем в среднем по России. Увеличение износа каждый год будет только увеличиваться, поэтому возникает потребность в отслеживании нормальной работы существующих ЛЭП, определении режима работы, а также проверки нормативно-технической документации по объектам и формированию новых требований.

Основным элементом ЛЭП, передающим электрическую энергию на большие расстояния, является электрический провод, имеющий различные конструктивные исполнения, выполняемый из различных материалов. Определяющим в его работе является соблюдение температурного режима во время передачи мощности от генерации к потребителю. Однако существуют технологические сложности в определении всех составляющих в процессе его нагрева. Поэтому необходимо провести серию экспериментальных исследований для различных марок проводов, при этом объем проводимых измерений и получаемой информации требует значительных ресурсов для обработки.

В качестве измерительного устройства температуры провода используется датчик Далласа, установленный на внешнюю сторону кабеля. Сам процесс нагрева производится источником тока и трансформатором питания, ток от которых протекает по тросу к объекту нагрева, создавая при этом замкнутый контур. По мере нагрева необходимо поддерживать с помощью регулировки ручки ЛАТРа уровень заданного значения тока постоянным в течении всего процесса эксперимента.

Сама схема лабораторного стенда изображена на рис. 1.

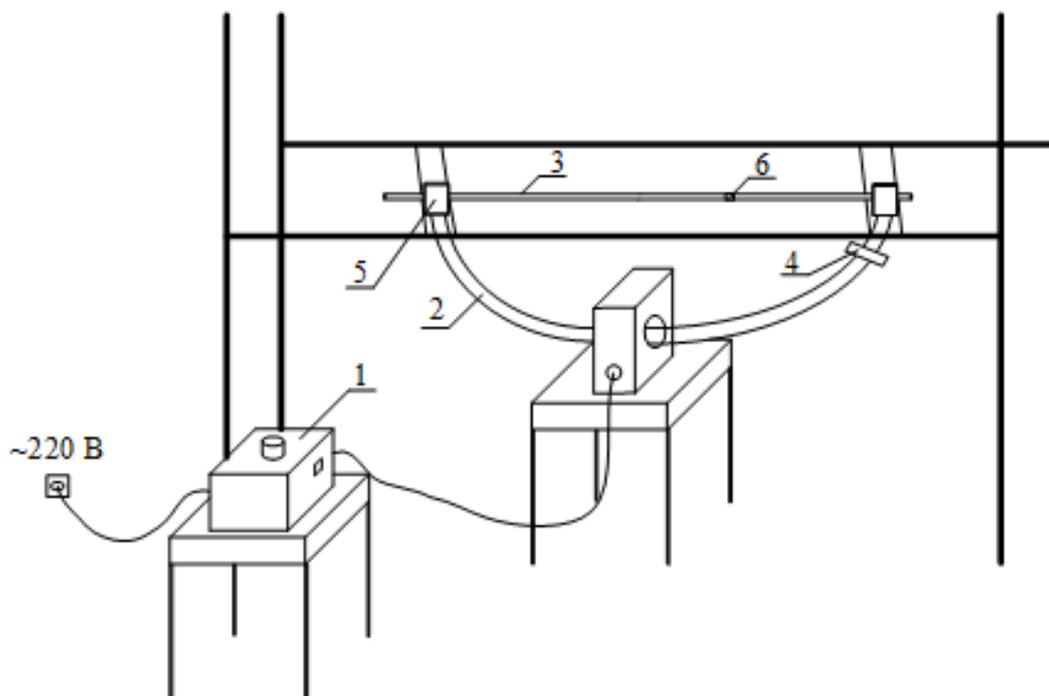


Рис. 1. Схема лабораторного стенда нагрева провода ЛЭП с возможностью регулировки по току:  
 1 – источник тока; 2 – провод для создание замкнутого контура; 3 – сталеалюминевый провода ЛЭП;  
 4 – токовые клещи для замеров; 5 – зажимы для соединения проводников; 6 – датчик температуры провода

Провод ЛЭП фиксируется с помощью зажимов. На контактах между проводами использовались медные кольца для лучшей проводимости.

ЛАТР и трансформатор питания поставляются в комплекте регулируемого источника тока РИТ-3000. Прибор предназначен для питания первичных цепей поверяемого и эталонного трансформаторов тока при проведении поверки.

Эксперимент проводился в два этапа.

На первом этапе производился нагрев испытуемого провода с последующим его охлаждением. Следует отметить, что, во-первых, провод ранее находился в эксплуатации, во-вторых, длина всего провода была 2 м, тогда как ток протекал только по одному метру, из-за этого в два раза увеличилась теплоемкость. Значение ток задавали равным 800, 900 и 1000 А. Время нагрева составляло 40 мин, охлаждение – 60 мин. Общее время замера составляло 100 мин.

Все эксперименты проводились при температуре окружающего воздуха +26 °С, ток поддерживался в процессе испытания неизменным с погрешностью 3–5 %. В процессе нагрева температура окружающего воздуха внутри помещения увеличивалась до 27 °С, что можно считать не влияющим фактором.

На втором этапе требовалось построить кривые зависимости температуры провода от времени в цикле «нагрев-охлаждение», проанализировать полученные кривые, сравнить их с математической моделью и произвести уточнение математической модели нагрева провода.

Полученные значения температур заносились в программный пакет Microsoft Excel, где строились зависимости температур от времени.

Для производства автоматизированного процесса контроля температурных и таковых параметров исследуемых проводов ЛЭП на стенде был составлен алгоритм работы программы в программном пакете National Instruments LabVIEW 19.0. производства контроля измеряемых параметров было использовано следующее оборудование: персональный компьютер (ПК) с предустановленной операционной системой Windows 7 и программным пакетом National Instruments LabVIEW 19.0; система сбора данных National Instruments cDAQ 9178; модуль сбора данных National Instruments 9205; контроллер National Instruments MYRIO 1900; маршрутизатор NETIS WF2409E; контроллер WEMOS D1 mini с источником питания; АКБ 12В; датчик тока LEM HOP 1000-SB; датчик температуры NTC 3950 100 К; датчик температуры DS18D20; термометр цифровой ТК-5; анализатор качества электрической энергии FLUKE 435.

Блок-диаграмма работы программы представлена на рис. 2.

В схеме блок диаграммы (рис. 2) программный код может быть поделен на блоки, имеющие цифровое обозначение (от 1 до 21).

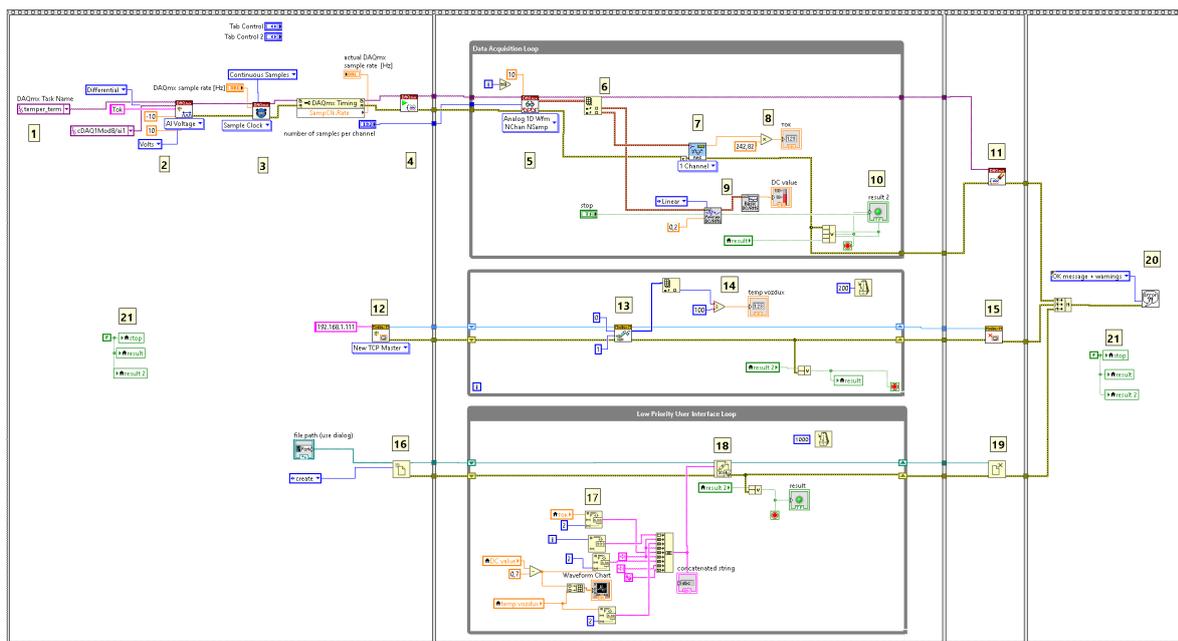


Рис. 2. Блок диаграмма работы программы автоматизированного контроля нагрева провода на испытательном стенде

В блоке 1 производится добавление в проект измерительного сигнала температуры. Температурный датчик выполнен на основе термистора NTC 3950 100 К. Диапазон измерений термистора  $-50 \dots 260$  °С, значение сопротивления термистора при 25 °С 100 кОм. Схема подключения датчика температуры приведена на рис. 3.

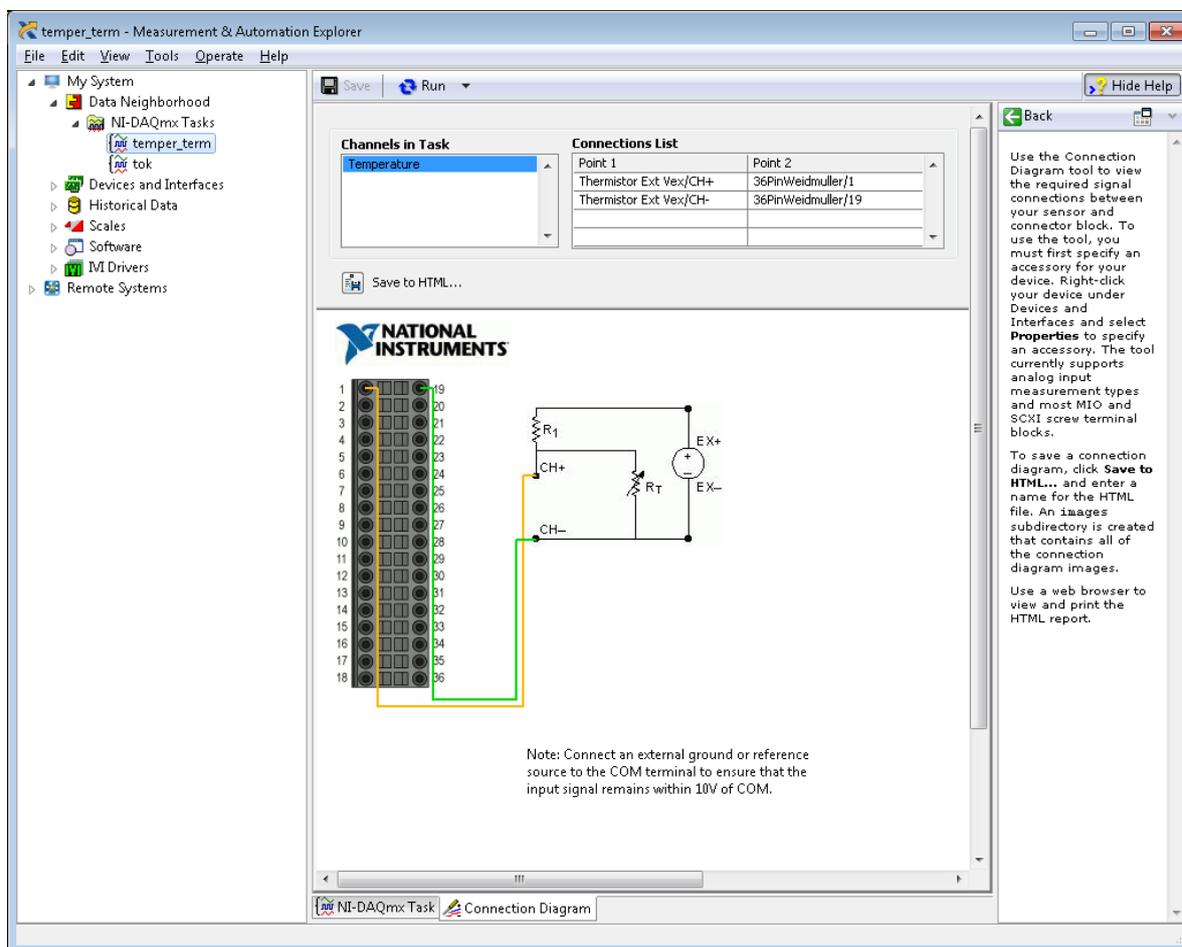


Рис. 3. Схема подключения термистора к измерительной системе

В качестве внешнего источника питания использован источник постоянного тока Tectronix PWS 4323. Для сопротивления  $R_1$  использован резистор МЛТ 4,7 кОм 0,5 Вт. Значение сопротивления резистора было измерено при температуре 25 °С и составило 4796 Ом.

Настройка измерений заключается в задании параметров элементов схемы измерения, а также кривой преобразования сопротивления термистора в температуру. Кривая задается на основании измерения его сопротивления при трех значениях температуры (взяты из паспортных значений термистора) и рассчитаны в виде коэффициентов  $A$ ,  $B$ ,  $C$ .

На рис. 4 отображены параметры настройки измерительной системы.

В блоке 2 приведены параметры настройки системы контроля значений тока. Ток измеряется модулем NI 9205.

Выставленные параметры: тип конфигурации входного тракта измерений – дифференциальный; диапазон измерений:  $-10 \dots +10$  В; измеряемая величина – вольты. В качестве измерительного датчика тока использован датчик тока LEM HOP 1000-SB. Измерительный диапазон действующего значения тока – RMS 1000А. Измерительный диапазон мгновенного значения тока –  $\pm 2000$ А. Полная погрешность измерений при температуре  $-25$  °С, напряжении питания  $\pm 12 \dots 15$  В  $\leq 2$  %. Нелинейность  $\leq 2$  %. Выходной сигнал –  $\pm 4$ В.

В качестве источника питания  $\pm 15$  В применен контроллер NI MYRIO. Питание контроллера осуществлялось от АКБ 12В в целях уменьшения гальванически связанных цепей.

Схема подключения датчика тока приведена на рис. 5.

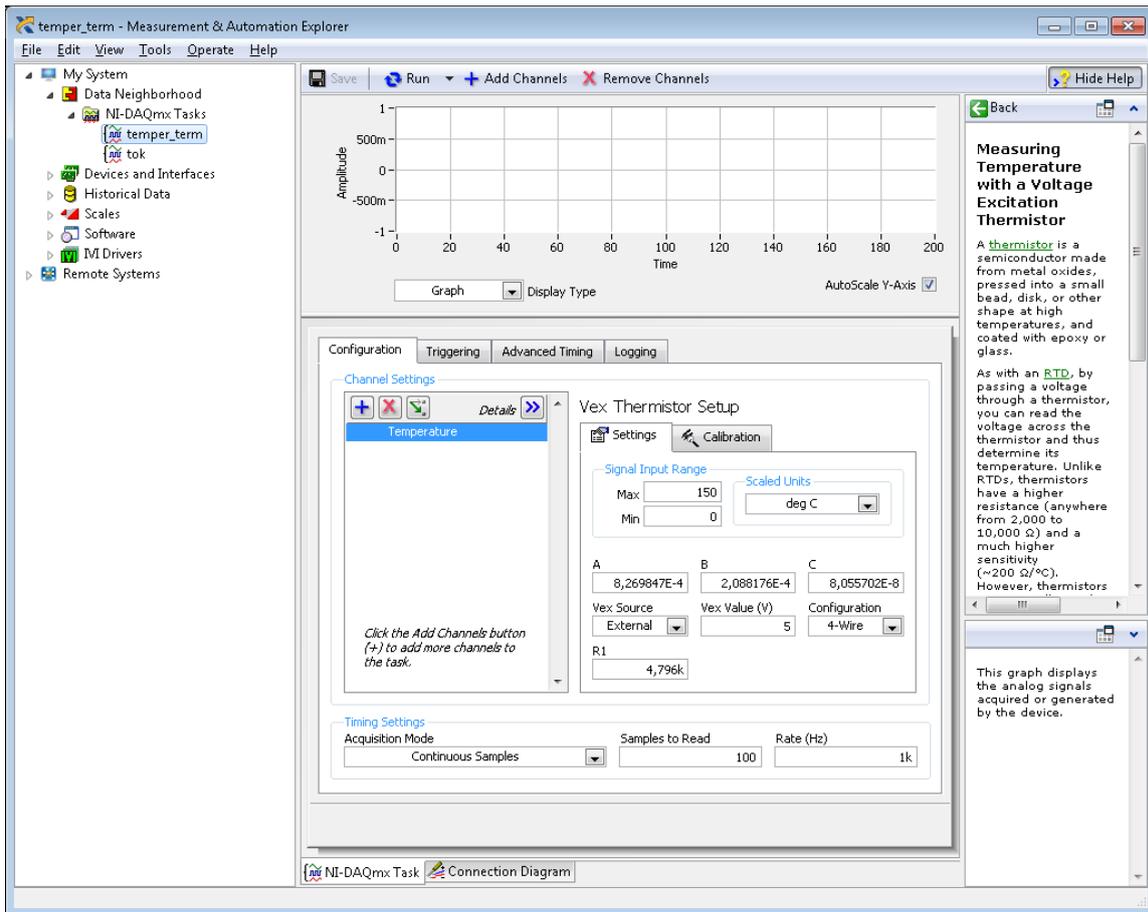


Рис. 4. Параметры настройки измерительной системы контроля температуры провода

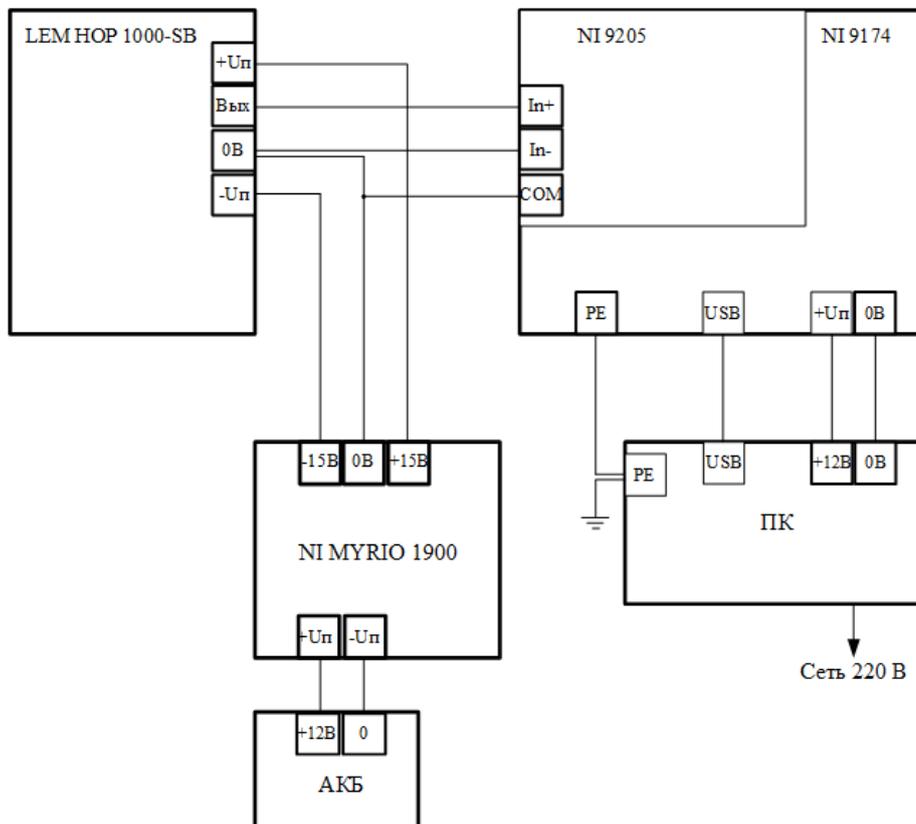


Рис. 5. Схема автоматизации контроля тока

В блоке 3 производится конфигурирование и настройка системы сбора данных. Частота считывания сигнала составила 50 000 слов/с на канал, что эквивалентно 1000 точек измерений на один период основной частоты измеряемого тока. В блоке 4 производится запуск устройства NI 9174. Количество точек в пакете для расчета сигнала равняется 10 000 на канал, что эквивалентно 0,2 с или 10 периодам основной частоты. В блоке 5 производится считывание измеряемых величин. В блоке 6 формируется в два массива измерения – массив данных температуры и массив данных тока. В блоке 7 производится расчет действующий величины значения тока за период 0,2 с.

Расчет производится стандартной библиотекой NI The Electrical Power Toolkit (EPT), процедура расчета библиотеки EPT соответствует следующим стандартам ГОСТ 30804.4.7-2013 и ГОСТ 30804.4.30-2013.

В блоке 8 производится масштабирование сигнала тока. Коэффициент масштабирования определялся в результате калибровки по значениям FLUKE 435 для токов 100 А, 200 А, 500 А, 1000 А. В результате расхождение приборов составляло не более 0,1 % от измеряемой величины в диапазоне токов 100–1000 А, и составляло менее 1 А во всем диапазоне подаваемых токов.

В блоке 9 производится расчет постоянной составляющей сигнала, вычисленный за время усреднения 0,2 с, соответствующее 10000 замерам. Последующий расчет объединяет полученные значения за период времени 1 с. Данные выводятся в виде столбчатого и цифрового индикаторов. Данные температуры соответствуют результатам периодических замеров ТК-5, расхождения не превышают 0,5 °С.

Блок 10 реализован для остановки процесса измерения от действий пользователя или при возникновении ошибки в работе программы.

Блок 11 останавливает работу измерительного оборудования в случае остановки цикла измерений.

Для контроля температуры окружающего воздуха реализована отдельная измерительная система, основанная на работе цифровых датчиков температуры Dallas DS18B20. Температурный диапазон измерений составляет  $-55 +125$  °С. Напряжение питания 3,0–5,5 В. Погрешность 0,5 °С в диапазоне  $-10 +85$  °С. Размещение датчика осуществлялось на высоте подвеса провода на расстоянии 0,5 м. Для приема/передачи результатов измерений был запрограммирован контроллер WEMOS D1 mini на базе процессора ESP 8266. Для исключения взаимного влияния гальванически связанных цепей передача данных от контроллера WEMOS D1 mini до ПК производилась посредством сети WIFI по протоколу MODBUS TCP. Связь осуществлялась через точку доступа NETIS WF2409E. Схема измерительной системы температуры воздуха показана на рис. 6.

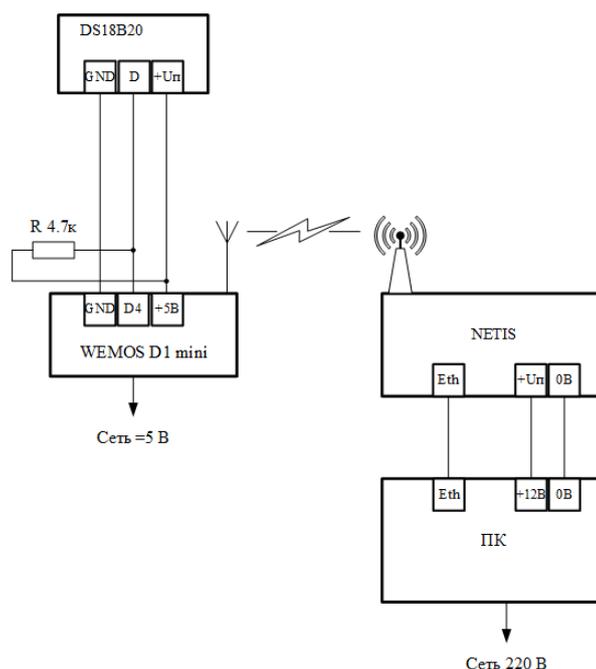


Рис. 6. Схема автоматизации измерения температуры окружающего воздуха

В блоке 12 производится конфигурирование программы опроса Master Modbus TCP. В блоке 13 производится опрос регистра хранения данных температуры. Так как переменные температуры имеют формат DBL (переменные с плавающей запятой), то в контроллере происходит их умножение на 100 (приведение к целочисленному виду) и передача в виде переменных Integer 16 бит. В блоке 14 происходит их обратное преобразование. Период обновления переменных составляет 0,2 с.

В блоке 15 происходит закрытие сессии MODBUS TCP после остановки работы программы.

В блоке 16 происходит открытие уникального файла в формате .txt для записи результатов эксперимента на жесткий диск ПК или съемный Flash-накопитель.

В блоке 17 происходит конфигурирование строки записи данных в формате таблицы, состоящей из параметров: порядковый номер замера, с; температура провода, °C; ток, А; температура воздуха, °C.

Непосредственно сама запись производится в блоке 19, период записи результатов измерений соответствует 1 с и регулируется блоком «Wait Until Next ms Multiple».

В блоке 19 производится окончание записи и обращения к записываемому файлу.

В блоке 20 реализован обработчик ошибок. В блоке 21 производится обнуление служебных переменных для синхронизации команд остановки циклов программы.

Реализованная программа позволяет автоматизировать процесс контроля измеряемых параметров, а также производить автоматическую запись результатов. Применяемые датчики и средства сбора/обработки данных были прокалиброваны в соответствии с другими средствами измерений и показали сходимость: для средств измерений тока  $\pm 0,1\%$ , для средств измерения температуры  $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Использование разработанной системы позволит сократить объем выполняемых операций и получать структурированные экспериментальные данные о проведении нагрева проводов различных марок.

#### Список литературы

1. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Пазенко Н. П. [и др.]. Обеспечение работоспособности воздушных линий электропередачи путем сохранения габарита при пропуске токов повышенной величины // Вестник Приамурского государственного университета им. Шолом-Алейхема. 2019. № 4. С. 25–34.
2. Бигун А. Я. Анализ нестационарных тепловых режимов воздушных линий электропередачи с учетом нелинейности процессов теплообмена и климатических факторов // Омский научный вестник. 2018. № 1. 157 с.
3. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Пазенко Н. П. [и др.]. Определение предельных токовых нагрузок воздушных линий электропередачи с учетом сохранения их габарита // III Международный научно-образовательный форум «Хэйлунцзян-Приамурье»: сб. материалов Междунар. науч. конф. (Биробиджан, 3 октября 2019 г.) Биробиджан: Приамурский государственный университет им. Шолом-Алейхема, 2019. С. 663–672.
4. Шишкина А. С., Сугоровский М. А., Пухова А. И., Игнатенко И. В. Особенности определения аварийно допустимых токов в линиях электропередачи // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке: тр. Всерос. науч.-практ. конф. Хабаровск, 2021. Т. 2. С. 9–13.
5. Игнатенко И. В., Власенко С. А., Пухова А. И. [и др.]. Алгоритм контроля токов в ЛЭП в заданных эксплуатационных условиях // Энергия единой сети. 2021. № 3. С. 44–53.
6. Ignatenko I. V., Vlasenko S. A. Health assessment of the electrical contact-line connections in view of the operational traction load pattern of the electric rolling stock // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Novosibirsk, 22–27 мая 2020 г.). Novosibirsk, 2020. P. 012154. doi:10.1088/1757-899X/918/1/012154

#### References

1. Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Pazenko N.P. [et al.]. Ensuring the operability of overhead power transmission lines by maintaining the size when passing currents of increased magnitude. *Vestnik Priamurskogo gosudarstvennogo universiteta im. Sholom-Aleykhema = Bulletin of the Amur State University named after Sholom Aleichem*. 2019;(4):25–34. (In Russ.)
2. Bigun A.Ya. Analysis of non-stationary thermal modes of overhead power transmission lines taking into account the nonlinearity of heat exchange processes and climatic factors. *Omskiy nauchnyy vestnik = Omsk Scientific Bulletin*. 2018;(1):157. (In Russ.)

3. Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Pazenko N.P. [et al.]. Determination of the maximum current loads of overhead power transmission lines taking into account the preservation of their size. *III Mezhdunarodnyy nauchno-obrazovatel'nyy forum «Kheyluntszyan-Priamur'e»: sb. materialov Mezhdunar. nauch. konf. (Birobidzhan, 3 oktyabrya 2019 g.) = III International Scientific and Educational Forum "Heilongjiang-Amur region" : collection of materials of the International Scientific Conference (Birobidzhan, October 3, 2019)*. Birobidzhan: Priamurskiy gosudarstvennyy universitet im. Sholom-Aleykhema, 2019:663–672. (In Russ.)
4. Shishkina A.S., Sugorovskiy M.A., Pukhova A.I., Ignatenko I.V. Features of determining the averagely permissible currents in power transmission lines. *Nauchno-tekhnicheskoe i ekonomicheskoe sotrudnichestvo stran ATR v XXI veke: tr. Vseros. nauch.-prakt. konf. = Scientific, technical and economic cooperation of the APR countries in the XXI century : tr. Vseros. nauch.-prakt. konf.* Khabarovsk, 2021;2:9–13. (In Russ.)
5. Ignatenko I.V., Vlasenko S.A., Pukhova A.I. [et al.]. Algorithm for monitoring currents in power lines under specified operating conditions. *Energiya edinoy seti = The energy of a single network*. 2021;(3):44–53. (In Russ.)
6. Ignatenko I.V., Vlasenko S.A. Health assessment of the electrical contact-line connections in view of the operational traction load pattern of the electric rolling stock. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Novosibirsk, 22–27 May 2020)*. Novosibirsk, 2020:012154. doi:10.1088/1757-899X/918/1/012154

#### Информация об авторах / Information about the authors

##### Иван Владимирович Игнатенко

кандидат технических наук, доцент,  
заведующий кафедрой систем электроснабжения,  
Дальневосточный государственный  
университет путей сообщения  
(Россия, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47)  
E-mail: systel@festu.khv.ru

##### Ivan V. Ignatenko

Candidate of technical sciences, associate professor,  
head of the sub-department of power supply systems,  
Far Eastern State Transport University  
(47 Seryshev street, Khabarovsk, Russia)

##### Сергей Анатольевич Власенко

кандидат технических наук, доцент кафедры  
систем электроснабжения,  
Дальневосточный государственный  
университет путей сообщения  
(Россия, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47)  
E-mail: vsa\_ens@mail.ru

##### Sergey A. Vlasenko

Candidate of technical sciences, associate professor  
of the sub-department of power supply systems,  
Far Eastern State Transport University  
(47 Seryshev street, Khabarovsk, Russia)

##### Евгений Юрьевич Тряпкин

старший преподаватель  
кафедры систем электроснабжения,  
Дальневосточный государственный  
университет путей сообщения  
(Россия, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47)  
E-mail: evgenmehanik@mail.ru

##### Evgeniy Yu. Tryapkin

Senior lecturer of the sub-department  
of power supply systems,  
Far Eastern State Transport University  
(47 Seryshev street, Khabarovsk, Russia)

##### Анастасия Игоревна Пухова

аспирант,  
Дальневосточный государственный  
университет путей сообщения  
(Россия, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47)  
E-mail: pu.shoc@mail.ru

##### Anastasiya I. Pukhova

Postgraduate student,  
Far Eastern State Transport University  
(47 Seryshev street, Khabarovsk, Russia)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов /  
The authors declare no conflicts of interests.

Поступила в редакцию/Received 10.01.2022

Поступила после рецензирования/Revised 14.02.2022

Принята к публикации/Accepted 17.03.2022