

05.14.02 – Электрические станции и электроэнергетические системы

УДК 621.311

**Кононов Юрий Григорьевич, Левченко Иван Иванович,  
Сацук Евгений Иванович, Тучина Дарья Сергеевна**

## О ТОЧНОСТИ СИНХРОННОГО ВРЕМЕНИ В ЕЭС РОССИИ

*В статье представлены результаты экспериментальных исследований точности ведения синхронного времени в ЕЭС России. Приведено описание экспериментов, основанных на фиксации отклонений хода часов, тактируемых сигналом напряжения силовой сети, и на анализе данных от векторных регистраторов. Выявлено стабильное среднесуточное отставание синхронного времени от астрономического на 1 с, обусловленное систематической погрешностью датчиков частоты. Показано, что даже при использовании современных датчиков и идеальной коррекции частоты годовое отклонение синхронного времени может достигать +9 с. Обоснована целесообразность использования для контроля синхронного времени вместо измерений частоты фазовых углов напряжений, измеряемых векторными регистраторами.*

**Ключевые слова:** регулирование частоты, синхронное (электрическое) время, измерение частоты и фазы напряжения, векторный регистратор, систематическая погрешность.

**Yury Kononov, Ivan Levchenko, Evgeniy Satsuk, Daria Tuchina  
ABOUT ACCURACY OF SYNCHRONOUS TIME IN UPS OF RUSSIA**

*The article presents the results of experimental studies of the accuracy of synchronous time in the Unified Power System of Russia. A description is given of experiments based on recording deviations of the clock, clocked by the voltage signal of the power network, and on the analysis of data from phasor measuring unit. A constant average daily average lag of synchronous time from astronomical time of 1 s was revealed, this is due to the systematic error of frequency sensors. It is shown that even with the use of modern sensors and perfect frequency correction, the annual deviation of synchronous time can reach +9 s. The expediency of using synchronous time for monitoring instead of measuring the frequency of phase angles of voltages measured by phasor measuring unit is substantiated.*

**Key words:** frequency regulation, synchronous (electric) time, frequency and voltage phase measurement, phasor measuring unit, systematic error

**Введение / Introduction.** Согласно отраслевому стандарту РАО «ЕЭС России» [1], под синхронным временем понимают такое время, измерение которого производится путем подсчета количества периодов изменения напряжений или токов в электроэнергетической системе (ЭЭС). Действующие национальный стандарт «ГОСТ Р 55890-2013 Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования» [2] и стандарт АО «СО ЕЭС» «Регулирование частоты и перетоков активной мощности в ЕЭС России. Нормы и требования» [3] в качестве синонима термина «синхронное время» используют понятие «электрическое время» и регламентируют способ и алгоритм его определения на основе измерений частоты. Очевидно, что синхронное время на некотором интервале будет совпадать с астрономическим, если среднее значение частоты на этом интервале равно ее номинальному значению (для ЕЭС России 50 Гц). Таким образом, вопросы регулирования частоты в ЭЭС тесно связаны с обеспечением минимального отклонения синхронного времени от астрономического.

Согласно [2–4], в 1-й синхронной зоне ЕЭС России отклонение синхронного времени от астрономического не должно превышать  $\pm 30$  с (за сутки, месяц и год). В соответствии с п. 4.4 межгосударственного стандарта «ГОСТ 34184-2017 Электроэнергетические системы. Оперативно-диспетчерское управление. Регулирование частоты и перетоков активной мощности в энерго-

объединении. Общие требования» [4], функция коррекции отклонений синхронного времени от астрономического возложена на системный оператор Единой энергетической системы России. Порядок коррекции синхронного времени устанавливается в соответствии с согласованными решениями между АО «СО ЕЭС» и организациями, осуществляющими функции оперативно-диспетчерского управления в зарубежных энергосистемах, входящих в синхронную зону. Следует отметить, что ранее в соответствии с пунктом III-3-56 ПУЭ 3-го издания [5] в течение суток допускалось среднее (результатирующее) отклонение синхронного времени  $\pm 60$  с при максимальном его значении  $\pm 120$  с.

Более жесткие требования к отклонению частоты и синхронного времени, заложенные в действующих стандартах [2–4] по сравнению с соответствующими параметрами в ранее действовавшем стандарте «Нормы качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения» [6], соответствовали плану интеграции ЕЭС России с энергосистемой Европы УСТЕ [7] и возможностям современных измерительных систем и автоматики [8].

В соответствии «Основными техническими требованиями к параллельно работающим энергосистемам стран СНГ и Балтии» [9] коррекция отклонения синхронного времени выполняется путем согласованного смещения уставки по частоте во всех центральных регуляторах систем автоматики регулирования частоты и перетоков активной мощности (АРЧМ) в заданный момент времени на заданную величину в течение заданного интервала времени. Контролером синхронного времени в синхронной зоне стран СНГ и Балтии является главный диспетчерский центр АО «СО ЕЭС», который непрерывно рассчитывает синхронное время путем интегрирования фактического значения частоты и определяет его отклонение от астрономического времени. Считается, что нормально допустимый диапазон ошибки синхронного времени равен  $\pm 20$  с, а максимально допустимый диапазон ошибки синхронного времени равен  $\pm 30$  с. Если временная ошибка не превышает нормально допустимого диапазона, то коррекция времени не производится. Иначе изменяется уставка регулирования частоты в центральной координирующей системе (ЦКС) АРЧМ [10].

Для определения отклонения синхронного времени от астрономического в ЕЭС России АО «СО ЕЭС» применяет программное обеспечение (ПО) «Контроль качества частоты» (ККЧ), являющееся приложением оперативно-информационного комплекса (ОИК) СК-2007 [11] и реализующее изложенный в [2] алгоритм, базирующийся на использовании поступающей в ОИК информации от датчика частоты. Для данных целей используют датчики, фиксирующие среднее за 1 с значение частоты основной гармоники напряжения в сети с дискретностью 0,001 Гц (1 мГц). Абсолютная точность измерения частоты должна быть не хуже 0,001 Гц (1 мГц). Из-за того что частотомеры имеют конечную точность, может возникнуть погрешность измерения (разряд 10<sup>-4</sup> Гц). В результате этого рассчитываемые в ОИК величины отклонений синхронного времени от астрономического имеют погрешности (в том числе систематические), что приводит к погрешностям в регулировании частоты и к снижению точности управляющих воздействий при корректировке синхронного времени.

В энергосистемах Европы, Северной Америки, Японии, Австралии принято вести постоянную корректировку синхронного времени [12]. Так, в энергосистеме Европы отклонения синхронного времени от астрономического (на основе международного атомного времени) рассчитывается в 08:00 каждый день в диспетчерском центре управления энергосистемой в Швейцарии, где с точностью до  $\pm 0,01$  Гц ( $\pm 0,02$  % от 50 Гц) регулируется частота, для обеспечения долгосрочно среднего значения частоты 50 Гц. В США коррекция  $\pm 0,02$  Гц от 60 Гц происходит, когда расхождение превышает 6–10 с. Данные требования регламентированы стандартами для корректировки отклонения синхронного времени от астрономического WEQ-006 [13] и BAL-004 [14]. В одной из энергосистем США (WWECS) с 2003 г. осуществляется автоматическая корректировка синхронного времени с целью более качественного выдерживания запланированных перетоков мощности. В Азии и Южной Америке энергосистемы многих стран не ведут корректировки синхронного времени, следовательно, электрические часы, установленные в этих странах, могут требовать более частой корректировки времени.

Актуальность высокоточного ведения синхронного времени связана не столько с необходимостью регулирования частоты и обеспечения запланированных перетоков мощности между связанными ЭЭС, сколько с использованием сигнала напряжения сети энергосистем в качестве тактовых генераторов часов программируемых бытовых приборов (электроплитки, микроволновые печи и т. п.), светофоров [12]. Кроме того, обеспечение гарантированного максимального отклонения синхронного времени в пределах  $\pm 30$  с в соответствии с требованиями [2–4] открывает перспективы создания дешевых и достаточно точных часов реального времени для интеллектуальных приборов учета электроэнергии [15].

Цель настоящей работы заключается в экспериментальном исследовании точности синхронного времени в ЭЭС России и обосновании целесообразности использования для его контроля вместо измерений частоты фазовых углов напряжений, измеряемых векторными регистраторами.

**Материалы и методы / Materials and methods.** Для исследования точности синхронного времени в ЭЭС России (а точнее 1-й ее синхронной зоны) использовались следующие технические и программные средства:

- 1) специально разработанные авторами на базе платформы Arduino UNO часы, синхронизируемые от однофазной сети с номинальным напряжением 230 В;
- 2) промышленно выпускаемые электронные часы, встроенные в кухонную плиту GORENIE (Словения) отображающие время при помощи светодиодных индикаторов в формате «ЧЧ:ММ»;
- 3) специально разработанная программа (автор Зеленский Евгений Геннадьевич) для сбора данных от векторных регистраторов, участвующих в online-проекте ООО «Инженерный центр Энергосервис» [16];
- 4) имеющийся в открытом доступе в сети Интернет сервис [17], позволяющий периодически отображать астрономическое локальное время с разрешением 1 мс на экране iPhone при помощи браузера;
- 5) цифровая камера iPhone 6P (операционная система IOS 13.2.1) с программой «Камера», работающая в режиме «Замедленная съемка».

Укрупненная структурная схема часов на базе платформы Arduino в составе экспериментальной установки представлена на рис. 1.

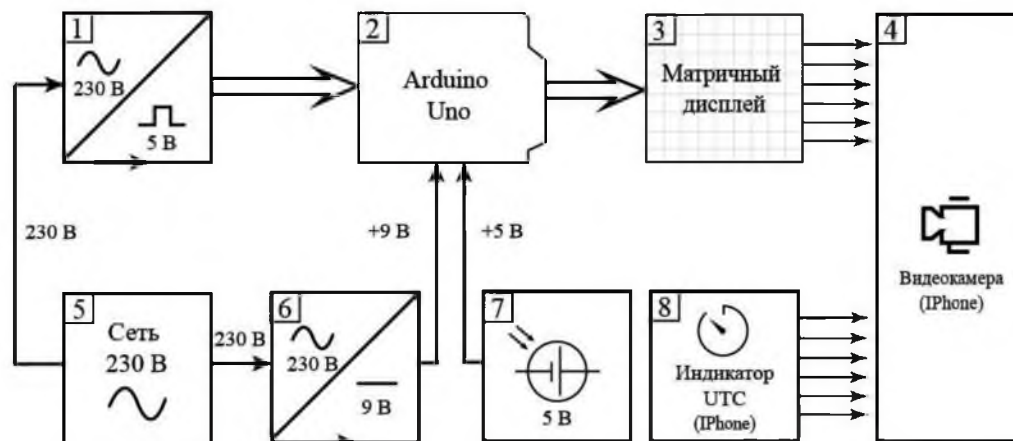


Рис. 1. Структурная схема часов, синхронизируемых от сети 230 В

Сигнал напряжения от однофазной сети переменного напряжения 230 В (5) поступает на вход преобразователя (1), осуществляющего гальваническую развязку платы и силовой сети и выдачу прямоугольных импульсов на цифровой ввод платы Arduino Uno (2). Для питания платы

используются два источника питания: основной (6), обеспечивающий на выходе +9 В, и резервный (7), представляющий собой Power Box емкостью 2500 мА·ч с литиевым аккумулятором и выходным напряжением +5 В. Резервный источник служит для функционирования часов при кратковременных провалах напряжения в питающей сети. Кроме часов, в состав экспериментальной установки входят два смартфона (4 и 8).

Принципиальная схема преобразователя (рис. 2) взята из [18] и для исключения ложного срабатывания счетчика импульсов при многократном переходе сигнала напряжения через нулевое значение дополнена триггером Шмита, выполненным на микросхеме 74НС14Н и подключенным между выходом преобразователя и цифровым входом платы Arduino Uno.

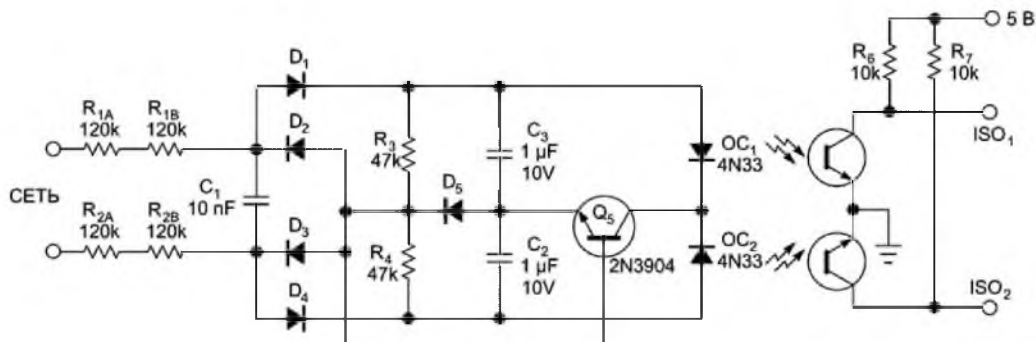


Рис. 2. Принципиальная схема преобразователя напряжения сети в прямоугольные импульсы

В качестве матричного дисплея (3) использовался двухстрочный текстовый жидкокристаллический дисплей МТ-16S2 российской фирмы МЭЛТ. Схема часов была собрана на макетной плате, общий вид которой с установленными на ней элементами представлен на рис. 3.

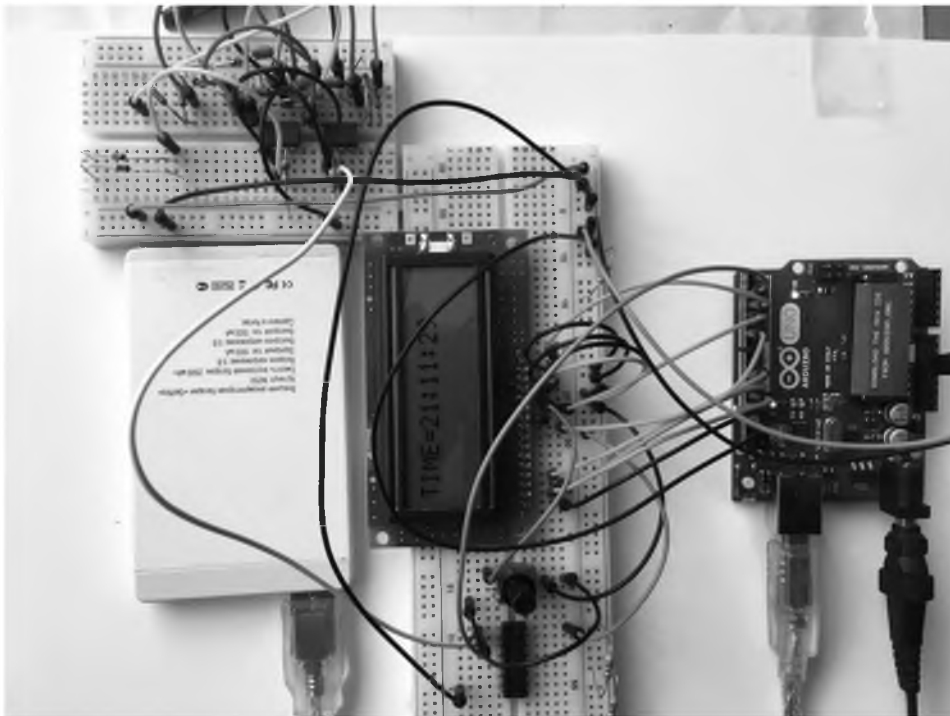


Рис. 3. Общий внешний вид часов синхронного времени на базе платы Arduino Uno



Для функционирования часов была разработана программа, алгоритм которой предусматривает следующие этапы:

- установку начального времени;
- подсчет импульсов от преобразователя и корректировку текущего значения секунд, минут и часов (если требуется), при достижении счетчиком импульсов значения 50;
- переход на работу от кварцевого генератора платы Arduino Uno при пропадании импульсов от преобразователя;
- отображение текущего времени в виде «TIME=ЧЧ:ММ:СС» на текстовом дисплее при изменении счетчика секунд.

В рамках настоящей работы были выполнены эксперименты.

1. С целью проверки корректности работы часов на базе платформы Arduino Uno было выполнено сравнение между собой зависимостей величин отклонения синхронного времени от астрономического в функции времени наблюдения (с 24.09.2019 г. по 01.11.2019 г.), определяемых по часам на базе платформы Arduino Uno и по часам плиты GORENIE.
2. Для анализа точности ведения синхронного времени в ЕЭС России построена зависимость величины отклонения синхронного времени от времени наблюдения (с 11.09.2019 г. по 09.11.2019 г.) на основе периодического сопоставления показаний часов на базе платы Arduino Uno и показаний часов, синхронизированных ntp-сервером.
3. Для двух суток (2 и 3 ноября 2019 г.) рассчитаны отклонения синхронного времени от астрономического с начала суток и с начала каждого часа по данным фазы векторного регистратора и выполнено сравнение данных отклонений с отклонениями с начала суток, определенными путем сопоставления показаний часов на базе платы Arduino Uno и показаний часов, синхронизированных ntp-сервером.

Экспериментальные исследования выполнялись в г. Ставрополе. Векторный регистратор находился в г. Рига (Латвия).

Методика определения отклонения синхронного времени от астрономического по данным датчиков частоты

Данная методика используется в ПО ККЧ ОИК СК-2007, применяемом специалистами Главного диспетчерского центра (ГДЦ) АО «СО ЕЭС» для контроля отклонения синхронного времени от астрономического с начала года, месяца, суток. В ее основу положено следующее выражение из [2] для определения величины отклонения синхронного времени от астрономического:

$$\Delta T = \sum_1^n (\Delta f_i \cdot 0,02 \cdot \Delta t), \quad (1)$$

где  $\Delta f_i = f - f_{ном}$  – отклонение частоты от номинального значения;  $\Delta t = 1$  с – длительность одного интервала в расчетном периоде, с;  $n$  – количество интервалов  $\Delta t$  в расчетном периоде.

Информация о частоте поступает в ОИК от датчиков частоты. Несмотря на то что, в соответствии с [4], частота измеряется с высокой точностью (не хуже  $\pm 0,001$  Гц), наличие в ее составе систематической погрешности приводит к отставанию синхронного времени от астрономического при положительном знаке этой составляющей или к опережению синхронным временем астрономического при отрицательном знаке систематической погрешности измерения частоты. Например, при систематической погрешности  $+0,001$  Гц за сутки отставание составит 1,7 с, а за год 10,5 минут.

Устранить негативное влияние систематической погрешности в измерении частоты можно, используя в качестве исходных данных для расчета отклонения синхронного времени от астрономического фазовых углов напряжений, измеряемых векторными регистраторами.

*Методика определения отклонения синхронного времени от астрономического по данным векторных регистраторов о фазе напряжения*

Данная методика предполагает подсчет числа переходов фазы напряжения через  $-180$  и  $180$  градусов  $N_{-180}$  и  $N_{180}$  на исследуемом интервале времени и вычисление отклонения синхронного времени от астрономического по следующему выражению:

$$\Delta T = 0,02 \left[ (N_{180} - N_{-180}) + (\delta_k - \delta_n) / 360 \right], \quad (2)$$

где  $\delta_n$  и  $\delta_k$  – соответственно фазовые углы напряжения, измеренные векторным регистратором в начале и в конце интервала времени.

Очевидно, что величина  $\Delta T$  может рассчитываться и отображаться в ОИК в темпе процесса по мере поступления данных от векторных регистраторов. Для повышения надежности в случае пропадания данных от векторного регистратора расчет должен выполняться по данным от нескольких векторных регистраторов, расположенных в различных частях одной синхронной зоны ЭЭС.

Преимущество данной методики заключается в том, что при соответствующей программной реализации систематические погрешности измеряемых фазовых углов напряжений не приводят к увеличению абсолютной погрешности  $\Delta T$ .

При выполнении экспериментов 1–3 периодически осуществлялась замедленная видеосъемка при помощи камеры iPhone 6r дисплеев часов и экрана другого iPhone 5S, на котором отображалось текущее астрономическое время с ntp-сервера [17]. Полученные снимки затем обрабатывались вручную. Дата и время с ntp-сервера и с дисплеев часов в момент изменения показаний последних заносились в таблицу Excel для последующей обработки.

Отклонение синхронного времени от астрономического рассчитывалось по формуле (3)

где  $T_c$  и  $T_{ntp}$  – соответственно синхронное время, показываемое часами на плате Arduino Uno или часами плиты GORENIE, и время ntp-сервера, отображаемое на дисплее iPhone 5S.

**Результаты и обсуждение / Results and discussion.**

► *Эксперимент № 1.* Для проверки корректности хода разработанных часов синхронного времени их показания с 24 сентября по 1 ноября 2019 г. сравнивались с показаниями часов кухонной плиты GORENIE, синхронизируемые от сети. Результаты сравнения представлены на рис. 4.

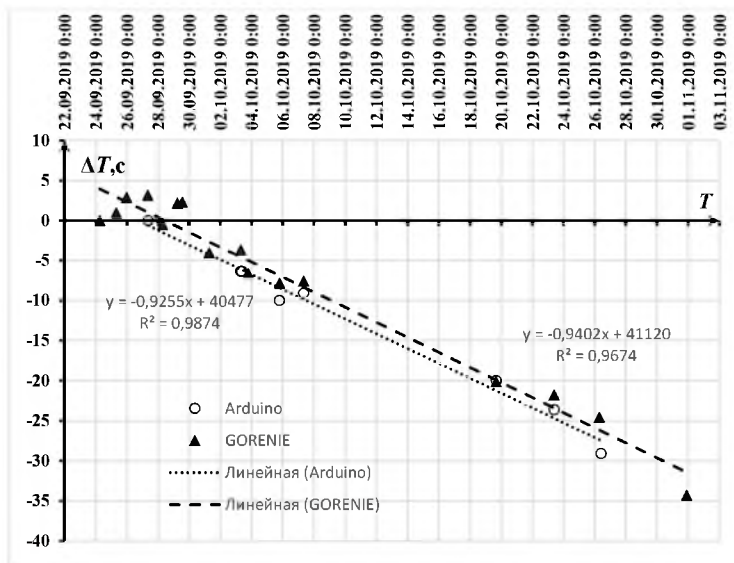


Рис. 4. Сравнение показаний часов на плате Arduino и показаний часов кухонной плиты GORENIE в период с 24 сентября по 2 ноября 2019 года

Таблица 1  
 Результаты обработки видеозаписей с показаниями времени птр-сервера и часов на плате Arduino Uno

Номер видео	Дата и время птр-сервера	Время на часах	Отклонение синхронного времени Δt, с	Номер видео	Дата и время птр-сервера	Время на часах	Отклонение синхронного времени Δt, с
1	11.09.2019 7:57:26.000	7:57:26	0	19	01.10.2019 7:07:08.392	7:06:47	-21.392
2	11.09.2019 18:52:01.044	18:52:00	-1.044	20	03.10.2019 7:21:37.051	7:21:16	-21.051
3	12.09.2019 7:13:05.375	7:13:03	-2.375	21	03.10.2019 19:00:58.005	19:00:34	-24.005
4	12.09.2019 21:43:18.184	21:43:20	2.184	22	05.10.2019 19:01:25.215	19:01:00	-25.215
5	13.09.2019 7:56:38.591	7:56:41	2.591	23	07.10.2019 8:12:41.945	8:12:16	-24.945
6	13.09.2019 20:01:11.872	20:01:13	1.872	24	19.10.2019 16:08:48.533	16:08:11	-37.533
7	14.09.2019 6:00:55.725	6:00:56	0.725	24	23.10.2019 9:08:04.160	9:07:25	-39.16
8	14.09.2019 22:11:15.475	22:11:14	-1.475	26	26.10.2019 7:17:06.924	7:16:24	-41.924
9	15.09.2019 7:51:11.775	7:51:09	-1.775	27	31.10.2019 21:33:48.675	21:32:57	-51.675
10	22.09.2019 6:52:43.941	6:52:34	-8.941	28	01.11.2019 23:59:29.194	23:58:40	-49.194
11	23.09.2019 7:46:18.482	7:46:00	-18.482	29	02.11.2019 23:59:56.182	23:59:04	-52.182
12	24.09.2019 5:58:12.360	5:57:55	-17.36	30	03.11.2019 7:30:38.611	7:29:47	-51.611
13	25.09.2019 7:20:09.395	7:19:53	-16.395	31	04.11.2019 0:00:08.807	23:59:18	-49.807
14	25.09.2019 23:17:17.475	17:03	-14.475	32	04.11.2019 10:16:12.746	10:15:19	-52.746
15	27.09.2019 7:35:29.195	7:35:15	-14.195	33	06.11.2019 23:59:47.915	23:58:56	-50.915
16	28.09.2019 7:00:38.825	7:00:20	-17.825	34	07.11.2019 0:00:28.921	23:59:37	-50.921
17	29.09.2019 6:13:11.167	6:12:56	-15.167	35	08.11.2019 6:03:16.218	6:02:26	-50.218
18	29.09.2019 13:37:09.051	13:36:54	-15.051	36	09.11.2019 0:01:27.245	0:00:31	-56.245

Результаты сравнения показывают, что имеющиеся расхождения показаний часов не превышают максимальных вариаций синхронного времени, обусловленных неодновременным снятием показаний и изменениями частоты напряжения в сети.

► *Эксперимент № 2.* Результаты ручной обработки видеоизображений с показаниями времени ntr-сервера и часов на плате Arduino Uno представлены в таблице 1.

Для более наглядного представления отклонение синхронного времени от астрономического в период с 11 сентября по 9 ноября 2019 г. представлено в виде диаграммы Excel на рис. 5.

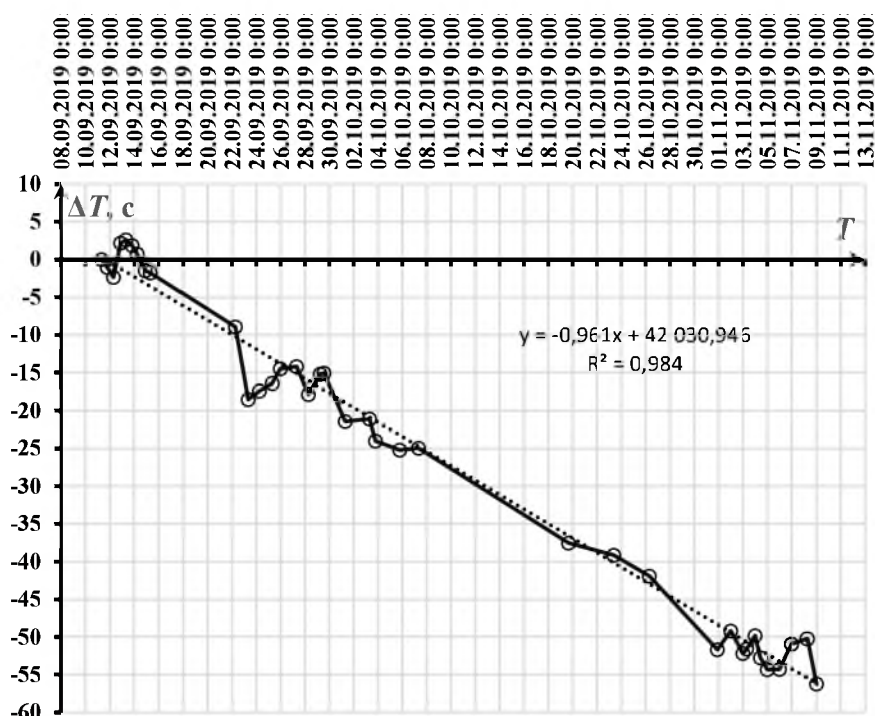


Рис. 5. Зависимость отклонения синхронного времени от астрономического в период с 11 сентября по 9 ноября 2019 года

С достаточно высокой точностью зависимость  $\Delta T(T)$  можно аппроксимировать линейной зависимостью, уравнение которой представлено на рис. 5. Систематическая среднесуточная погрешность синхронных часов относительно времени ntr-сервера составляет  $-0,96$  с/сутки.

Полученные результаты коррелируют с представленными в [12] статистическими данными о максимальном месячном отставании синхронного времени в первой синхронной зоне на 36 с.

По данным ПО ККЧ ОИК СК-2007 в ГДЦ АО «СО ЕЭС», использующего для расчета значения частоты от датчиков ИВЧ-1, отклонение синхронного времени за сентябрь 2019 г. оказалось равным  $-0,171$  с, а по данным этого ПО, получающего значения частоты от векторного регистратора МИП-02 филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Юга, отклонение синхронного времени за этот же период составило  $-32,043$  с. Таким образом, причиной отставания синхронного времени в 1-й синхронной зоне ЕЭС России является систематическая положительная погрешность определения среднего значения частоты в ОИК по данным датчиков частоты ИВЧ-1, приводящая к тому, что диспетчерский персонал АО «СО ЕЭС» вместо 50 Гц на практике обеспечивает среднее значение частоты 49,9994 Гц. Перевод ПО ККЧ ОИК в ГДЦ АО «СО ЕЭС» на использование частоты от векторного регистратора МИП-02 позволит устранить систематическое отставание синхронного времени.



► *Эксперимент № 3.* Результаты расчетов отклонений синхронного времени по методике, основанной на измерениях фазовых углов от векторного регистратора в период с 0:00:00 02.11.2019 г. до 24:00 03.11.2019 г., приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты расчета  $\Delta T$  по данным векторного регистратора

Час	$\Delta T$ за час, мс	$\Delta T$ с начала суток, мс	Час	$\Delta T$ за час	$\Delta T$ с начала суток, мс
02.11.2019 1:00:00	279	279	03.11.2019 1:00:00	198	198
02.11.2019 2:00:00	350	629	03.11.2019 2:00:00	362	560
02.11.2019 3:00:00	292	921	03.11.2019 3:00:00	404	964
02.11.2019 4:00:00	278	1199	03.11.2019 4:00:00	218	1182
02.11.2019 5:00:00	365	1564	03.11.2019 5:00:00	249	1432
02.11.2019 6:00:00	213	1778	03.11.2019 6:00:00	355	1787
02.11.2019 7:00:00	-282	1495	03.11.2019 7:00:00	-33	1754
02.11.2019 8:00:00	-20	1475	03.11.2019 8:00:00	-103	1652
02.11.2019 9:00:00	-1549	-74	03.11.2019 9:00:00	-66	1585
02.11.2019 10:00:00	-660	-734	03.11.2019 10:00:00	-95	1491
02.11.2019 11:00:00	-527	-1261	03.11.2019 11:00:00	45	1536
02.11.2019 12:00:00	-765	-2027	03.11.2019 12:00:00	104	1639
02.11.2019 13:00:00	-80	-2106	03.11.2019 13:00:00	278	1917
02.11.2019 14:00:00	-230	-2336	03.11.2019 14:00:00	268	2185
02.11.2019 15:00:00	-63	-2399	03.11.2019 15:00:00	79	2264
02.11.2019 16:00:00	-618	-3017	03.11.2019 16:00:00	-317	1947
02.11.2019 17:00:00	-4	-3020	03.11.2019 17:00:00	-162	1785
02.11.2019 18:00:00	-138	-3158	03.11.2019 18:00:00	-142	1644
02.11.2019 19:00:00	-85	-3243	03.11.2019 19:00:00	253	1897
02.11.2019 20:00:00	-1	-3244	03.11.2019 20:00:00	8	1904
02.11.2019 21:00:00	-223	-3466	03.11.2019 21:00:00	-106	1799

Час	$\Delta T$ за час, мс	$\Delta T$ с начала суток, мс	Час	$\Delta T$ за час	$\Delta T$ с начала суток, мс
02.11.2019 22:00:00	-20	-3487	03.11.2019 22:00:00	-83	1716
02.11.2019 23:00:00	125	-3362	03.11.2019 23:00:00	13	1728
03.11.2019 0:00:00	327	-3035	04.11.2019 0:00:00	-87	1641

Как следует из представленных результатов, отклонение синхронного времени от астрономического за 2.11.2019 г. составило  $-3,035$  с, а за 3.11.2019 г.  $+1,641$  с.

Соответствующие отклонения, определенные по часам на плате Arduino Uno, составили  $-3,012$  с и  $+1,625$  с соответственно. По данным ПО ККЧ ОИК СК-2007, использующего для расчета значения частоты от векторного регистратора МИП-02, подключенного к сети собственных нужд диспетчерского центра филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Юга, отклонение синхронного времени за 2 и 3 ноября 2019 г. составило соответственно  $-3,054$  с и  $+1,611$  с. Таким образом, ПО ККЧ, использующее методику расчета отклонения синхронного времени по частоте, имеет отрицательную систематическую погрешность, равную  $-0,019$  с за 02.11.2019 г. и  $-0,03$  с за 03.11.2019 г. При такой ежедневной погрешности даже при идеальной коррекции частоты за год отклонение синхронного времени составит  $+9$  с.

**Заключение / Conclusion.** Экспериментальными исследованиями установлено, что систематическое отставание синхронного времени от астрономического времени в 1-й синхронной зоне ЕЭС России в среднем составляет 1 с в сутки и обусловлено в основном положительной систематической погрешностью измерителя частоты ИВЧ-1.

Переход в ГДЦ АО «СО ЕЭС» на использование данных от векторных регистраторов МИП-02 в ПО ККЧ позволит контролировать отклонение синхронного времени с высокой точностью ( $0,019-0,03$  с в сутки). Однако даже при такой небольшой систематической погрешности и идеальной коррекции частоты годовое отклонение синхронного времени составит  $+9$  с.

Для устранения эффекта накопления систематической погрешности синхронного времени предлагается определять отклонение синхронного времени от астрономического по фазам напряжений, измеряемым векторными регистраторами, что позволит не только повысить точность хода электрических часов, синхронизируемых от сети, но и открывает перспективы создания дешевых и достаточно точных часов реального времени для интеллектуальных приборов учета электроэнергии.

**Благодарности / Gratitude.** Авторы признательны инженеру-программисту кафедры автоматизированных электроэнергетических систем инженерного института СКФУ Евгению Геннадьевичу Зеленскому за написание программы для сбора данных от векторных регистраторов и главному специалисту службы электрических режимов филиала АО «СО ЕЭС» ОДУ Юга Кириллу Александровичу Сидорову за предоставленную информацию.

#### ЛИТЕРАТУРА И ИНТЕРНЕТ-РЕСУРСЫ

1. Стандарт организации СТО 17330282.27.010.001-2008. Электроэнергетика. Термины и определения. – Утв. Приказом ОАО РАО «ЕЭС России» № 289 от 1.06.2008 г. Дата введения – 20.06.2008. – Москва : ОАО РАО «ЕЭС России», 2008. – 902 с. – Текст : непосредственный.
2. ГОСТ Р 55890-2013. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление регулирование частоты и перетоков активной мощности. Нормы и требования // Национальный стандарт РФ. – Москва : Стандартинформ, 2014. – Текст : непосредственный.
3. Стандарт организации СТО 59012820.27.100.003-2012. Регулирование частоты и перетоков активной мощности в ЕЭС России. – Утв. и введен в действие Приказом ОАО «СО ЕЭС» № 475 от 05.12.2012. – Москва : АО «СО ЕЭС», 2012. – Текст : непосредственный.

4. ГОСТ 34184-2017. Электроэнергетические системы. Оперативно-диспетчерское управление. Регулирование частоты и потоков активной мощности в энергообъединении. Общие требования // Межгосударственный стандарт. – Москва : Стандартинформ, 2017. – Текст : непосредственный.
5. Правила устройства электроустановок. – 3-е изд. – Ленинград ; Москва : Государственное энергетическое издательство, 1958. – 463 с. – Текст : непосредственный.
6. ГОСТ 13109-67. Нормы качества электрической энергии у ее приемников, присоединенных к электрическим сетям общего назначения. – Утв. в Госстандарт СССР 02.08.1967 г. – Москва : Издательство стандартов, 1968. – Текст : непосредственный.
7. Аюев, Б. И. Основы функционирования объединенной электроэнергетической системы континентальной Европы / Б. И. Аюев. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008. – 276 с.
8. Monitoring of Energy System Frequency, Modern Requirements / К. Б. Авхимов, В. П. Будовский, Е. И. Сацук // Энергетик. – 2018. – № 7. – С. 14–20. – Текст : непосредственный.
9. Основные технические требования к параллельно работающим энергосистемам стран СНГ и Балтии. Правила и рекомендации по регулированию частоты и потоков активной мощности. – Утв. Решением Электроэнергетического совета СНГ : Протокол № 48 от 23.10.2015 г. – 22 с. – Текст : непосредственный.
10. Развитие системы автоматического вторичного регулирования частоты и потоков активной мощности в ЕЭС России / А. В. Жуков, Е. И. Сацук, А. Н. Сафронов // Энергия единой сети. – 2014. – № 6 (17). – С. 24–30. – Текст : непосредственный.
11. Информационные системы реального времени для центров управления. – URL: <https://www.monitel.ru/> (дата обращения: 05.11.2019). – Текст : электронный.
12. Impacts of Power Grid Frequency Deviation on Time Error of Synchronous Electric Clock and Worldwide Power System Practices on Time Error Correction / Yao Zhang, Wenxuan Yao, Shutang You, Wenpeng Yu, Ling Wu, Yi Cui and Yilu Liu // Energies. – 2017. – Aug. – No 10. – Pp. 1–15. – Текст : непосредственный.
13. NAESB WEQ [Wholesale Electric Quadrant] Manual Time Error Correction Business Practice Standards – WEQ-006. – URL: <https://www.naesb.org/contactus.asp/>. – Текст : электронный. – Текст : непосредственный.
14. NERC Standard BAL-004-0 – Time Error Correction; online at. – URL: <http://www.nerc.com/files/BAL-004-0.pdf/>. – Текст : электронный.
15. Патент РФ на изобретение № 2619134 «Способ синхронизации измерений в электрических сетях по частоте и фазе напряжения силовой сети» / Ю. Г. Кононов, П. А. Звада. – Правообладатель: АО «Энергомера». Опубл. 12.05.2017 г. – 18 с. – Текст : непосредственный.
16. Данные в реальном времени с приборов ЭНИП-2. – URL: <http://pmu.ens.ru/pmulive/> (дата обращения: 05.11.2019). – Текст : электронный.
17. NTP – Серверы точного времени. – URL: <http://ntp-servers.net/> (дата обращения: 05.11.2019). – Текст : электронный.
18. Ponikvar, Dusan, A circuit for mains synchronization has two separate outputs for each half-period / Dusan Ponikvar // EDN. – 2013. – Mart 23. – URL: <https://www.edn.com/design/power-management/4410475/A-circuit-for-mains-synchronization-has-two-separate-outputs-for-each-half-period/> (дата обращения: 05.11.2019). – Текст : электронный.

#### REFERENCES AND INTERNET RESOURCES

1. Organization Standard STO 17330282.27.010.001-2008. Elektroenergetika. Terminy i opredelenija (Power industry. Terms and definition), Approved. By order of RAO UPS of Russia No. 289. Moskva : OJSC RJSC «UPS OF RUSSIA», 2008. – 902 s.
2. GOST R 55890-2013. Edinaja energeticheskaja sistema i izolirovanno robotajushhie energosistemy. Operativno-dispetcherskoe upravlenie regulirovanie chastoty i peretokov aktivnoj moshhnosti. Normy i trebovanija (United power system and isolated power systems. Operative-dispatch management. Frequency control and control of active power. Norms and requirements). – Approved. 01.09.2014, Moskva : Standartinform, 2014, 20 s.
3. Organization standard STO 59012820.27.100.003-2012. Regulirovanie chastoty i peretokov aktivnoj moshhnosti v EJeS Rossii (Regulation of the frequency and flows of active power in the UPS of Russia). – Approved. and entered into force by the Order of JSC «SO UPS» No. 475. 05.12.2012. – Moskva : JSC «SO UPS», 2012, 38 s.

4. GOST 34184-2017. Elektroenergeticheskie sistemy. Operativno-dispetcherskoe upravlenie. Regulirovanie chastoty i peretokov aktivnoj moshhnosti v energoob edinenii. Obshhie trebovaniya (Electric power systems. Operational dispatching control. Frequency control and control of active power in interconnected power system. General requirements). – Approved. 30.07.2017. – Moskva : Standartinform, 2017. – 7 s.
5. Pravila ustrojstva elektroustanovok. 3-e izd. (Electrical installation code). – Leningrad ; Moskva : Gosudarstvennoye energeticheskoye izdatel'stvo, 1958. – 463 s.
6. GOST 13109-67. Normy kachestvo elektricheskoy energii u ee priemnikov, prisoedinennyh k elektricheskim setjam obshhego naznacheniya (Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in public electrical systems). – Approved. Gosstandart of the USSR 02.08.1967. – Moskva : Izdatel'stvo standartov, 1968.
7. Ajuev, B. I. Osnovy funkcionirovaniya obedinennoj elektroenergeticheskoy sistemy kontinental'noj Evropy (Fundamentals of the functioning of the united electric power system of continental Europe) / B. I. Ajuev. – Ekaterinburg : UrO RAN, 2008. – 276 s.
8. Avkhimov K. B., Budovskiy V. P., Satsuk Ye. I. Monitoring of Energy System Frequency, Modern Requirements / K. B. Avkhimov, V. P. Budovskiy, Ye. I. Satsuk // Energetik. – 2018. – No 7. – S. 14–20.
9. Osnovnye tehniczeskie trebovaniya k paralel'no rabotajushhim energosistemam stran SNG i Baltii. Pravila i rekomendacii po regulirovaniyu chastoty i peretokov aktivnoj moshhnosti (Basic technical requirements for parallel operating power systems of the countries of the CIS and the Baltic States. Rules and recommendations for regulating the frequency and flows of active power). – Approved by the Decision of the CIS Electric Power Council. – Protocol No. 48. – Dated 10.23.2015. – 22 s.
10. Razvitiye sistemy avtomaticheskogo vtorichnogo regulirovaniya chastoty i peretokov aktivnoy moshchnosti v YEES Rossii (Development of a system of automatic secondary regulation of frequency and active power flows in the UPS of Russia) / A. V. Zhukov, Ye. I. Satsuk, A. N. Safronov // Energiya yedinoj seti. – 2014. – No 6 (17). – S. 24–30.
11. Real-time information systems for control centers [Electronic resource]. – URL: <https://www.monitel.ru/> (date of the application: 05.11.2019).
12. Impacts of Power Grid Frequency Deviation on Time Error of Synchronous Electric Clock and Worldwide Power System Practices on Time Error Correction / Yao Zhang, Wenxuan Yao, Shutang You, Wenpeng Yu, Ling Wu, Yi Cui and Yilu Liu // Energies. – 2017. – Aug. – No 10. – S. 1–15.
13. NAESB WEQ [Wholesale Electric Quadrant] Manual Time Error Correction Business Practice Standards – WEQ-006 [Electronic resource]. – URL: [https://www.naesb.org/pdf2/weq\\_bklet\\_011505\\_tec\\_mc.pdf/](https://www.naesb.org/pdf2/weq_bklet_011505_tec_mc.pdf/).
14. NERC Standard BAL-004-0 – Time Error Correction; [Electronic resource]. – URL: <http://www.nerc.com/files/BAL-004-0.pdf/>.
15. Patent 2619134 of the Russian Federation, Sposob sinhronizacii izmerenij v elektricheskikh setjah po chastote i faze napryazheniya silovoj seti (Method for synchronizing measurements in electric networks by frequency and phase of voltage of the power network) / Ю. Г. Кононов, П. А. Звада. – Rightholder : JSC Energomera. Publ. 05.12.2017. – 18 s.
16. Real-time data with ENIP-2 devices, [Electronic resource]. – URL: <http://pmu.ens.ru/pmulive/> (date of the application: 05.11.2019).
17. NTP exact timeservers, [Electronic resource]. – URL: [ntp-servers.net](http://ntp-servers.net) (date of the application: 05.11.2019).
18. Ponikvar, Dusan A circuit for mains synchronization has two separate outputs for each half-period / Dusan Ponikvar // EDN. – 2013. – Mart 23. [Electronic resource]. – URL: <https://www.edn.com/design/power-management/4410475/A-circuit-for-mains-synchronization-has-two-separate-outputs-for-each-half-period> (date of the application: 05.11.2019).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Кононов Юрий Григорьевич**, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения инженерного института СКФУ. E-mail: [iukononov@ncfu.ru](mailto:iukononov@ncfu.ru)

**Левченко Иван Иванович**, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения инженерного института СКФУ. E-mail: [lii37@mail.ru](mailto:lii37@mail.ru)



*Сацук Евгений Иванович*, доктор технических наук, доцент, начальник службы внедрения противоаварийной и режимной автоматики Системного оператора Единой энергетической системы (ОАО «СО ЕЭС»). E-mail: satsuk-ei@so-ups.ru

*Тучина Дарья Сергеевна*, аспирант кафедры автоматизированных электроэнергетических систем и электроснабжения инженерного института. E-mail: tuchinads@yandex.ru

#### INFORMATION ABOUT AUTHORS

*Yury Kononov*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Chair of Automatic Electrical Power Systems and Electric Power Supply, Engineering Institute, NCFU. E-mail: iukononov@ncfu.ru

*Ivan Levchenko*, Doctor of Technical Sciences, Professor, Leading researcher of the Chair of Automatic Electrical Power Systems and Electric Power Supply, Engineering Institute, NCFU. E-mail: lii37@mail.ru

*Yevgeniy Satsuk*, Doctor of Technical Sciences, associate Professor, Head of the Emergency and Regulatory Automation Implementation Service of the System Operator of the Unified Power System (JSC SO UPS). E-mail: satsuk-ei@so-ups.ru

*Darya Tuchina*, Post-graduate student of the Chair of Automatic Electrical Power Systems and Electric Power Supply, Engineering Institute, NCFU. E-mail: tuchinads@yandex.ru