



ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЕДИНОГО ВРЕМЕНИ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

А.С.Клейман, доктор технических наук, профессор, начальник лаборатории ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков

П.А.Кравченко, кандидат технических наук, доцент Харьковского государственного технического университета сельского хозяйства

В.Н.Романьюк, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник воинской части А0785, г. Харьков

В.С.Соловьев, доктор технических наук, профессор, директор научного центра времячастотных и линейных измерений ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков

Т.А.Усенко, младший научный сотрудник ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков

С.И.Зуб, ведущий инженер ННЦ "Институт метрологии", г. Харьков

И.С.Кравченко, студентка Национального технического университета "Харьковский политехнический институт"

Рассмотрены вопросы обеспечения единства измерений времени в электроэнергетике, пути решения этой проблемы. Обосновано применение оригинальных методов синхронизации с использованием рубидиевых стандартов частоты и времени. Показано, что доминирующие погрешности счетчиков, измеряющих расход электроэнергии, определяются, в основном, системой формирования интервалов времени в этих счетчиках. Указано на необходимость срочной доработки таких счетчиков.

The problems of time measurements unity assurance in electric power engineering and the ways of their solving are considered. The application of the original methods of synchronization with the use of rubidium standards of time and frequency is grounded. It is shown that the dominating errors of counters, which measure electric energy consumption, are mainly determined by the system of forming time intervals in these counters. The necessity of urgent improvement of such counters is indicated.

Как неоднократно отмечалось, единство измерений любой физической величины обеспечивается как за счет высоких точностных характеристик государственного первичного эталона, так и за счет наличия широко разветвленной, с высокими точностными характеристиками системы передачи размера единицы от эталона потребителям.

В мировой практике для передачи размеров единиц времени и частоты широко используются средства радио, телевидения, радионавигационные системы (РНС) типа ГЛОНАСС (Россия), NAVSTAR (США).

Рассмотрение ряда литературных источников, включая [1-5], показывает, что многие объекты, предприятия и организации разных министерств

и ведомств для решения своих задач требуют использования частотно-временной информации (ЧВИ) в тех или иных объемах. При этом точность частотно-временной информации, необходимая потребителям, отличается на величину в несколько порядков. Соответственно потребности в ЧВИ могут удовлетворяться при помощи различных технических средств. Однако, в соответствии с Законом Украины "Про метрологію та метрологічну діяльність" вся ЧВИ в Украине должна использоваться в единых единицах и шкалах, а именно в тех, которые воспроизводятся и сохраняются государственным первичным эталоном единицы времени и частоты (ГПЭВЧУ), который функционирует в ННЦ "Институт метрологии" [6].

Наконец, надо иметь в виду, что объектовая или ведомственная система обеспечения потребителей ЧВИ может носить централизованный или децентрализованный характер. В первом случае потребитель получает ЧВИ от ведомственной службы времени и частоты, которая, в свою очередь, связана с Государственной службой единого времени и эталонных частот (ГСВЧ), в другом – непосредственно от ГСВЧ.

При этом можно выделить такие группы заданий [7]:

- создание службы времени технической точности (часофикация объектов или систем);

- ведение локальной шкалы времени (ШВ) с метрологической точностью и использование этой шкалы на объектах соответствующего ведомства.

Потребности в ЧВИ могут удовлетворяться при помощи различных технических средств. При этом следует учесть, что:

- ГСВЧ, созданная в Украине, воспроизводит и хранит единицы времени и частоты с наивысшей в стране точностью $(2-5) \cdot 10^{-14}$;

- вся ЧВИ в Украине должна использоваться в единых единицах и шкалах, а именно в тех, которые воспроизводятся и сохраняются государственным первичным эталоном единиц времени и частоты, созданным в ХГНИИМ;

- в Украине сегодня и в ближайшем будущем могут использоваться такие источники сигналов, которые несут ЧВИ:

- станции радиовещания Украины, которые передают сигналы проверки времени повышенной информативности ("шесть точек");

- радиостанции ГСВЧ Российской Федерации РВМ (несущие частоты 5, 10 и 15 МГц);

- радиостанции DX-диапазона (РБУ, Россия – 66,6 кГц; DCF-77, ФРГ – 77,54 кГц; NBS, Швейцария – 75 кГц; MSF, Великобритания – 60 кГц).

- станции радионавигационной системы РНС-Е (частота – 100 кГц);

- спутники космической навигационной системы ГЛОНАСС, принадлежащей Российской Федерации; спутники космической навигационной системы NAVSTAR, принадлежащей США;

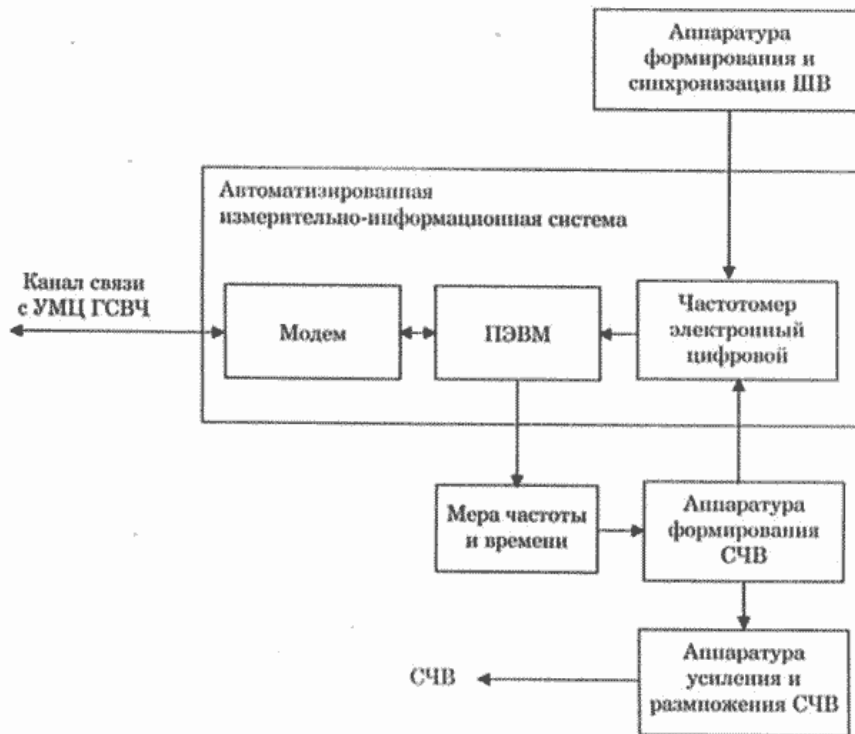
- телевизионные станции, передающие программу УТ-1 (передача ЧВИ в стадии опытной эксплуатации).

На рисунке изображена типичная структурная схема ведомственной (объектовой) службы времени и частоты потребителей ЧВИ. В зависимости от конкретных потребностей потребителя и необ-

ходимой точности ЧВИ те или иные структурные элементы могут быть объединены или исключены. В состав самой простой системы может входить лишь одно устройство, которое выполняет все необходимые функции (например, синхронизатор типа Ч7-43 или ЧК7-50). Принцип работы схемы ясен из рисунка и не требует дополнительных пояснений.

Метрологические характеристики службы времени и частоты потребителя будут зависеть, главным образом, от метрологических характеристик используемых мер частоты и времени, а также от метода и технических средств, которые выбраны для привязки или синхронизации ШВ. Точностные и временные параметры систем (процедур) синхронизации ШВ и привязки координат были проанализированы для случая использования в качестве стандарта частоты (опорного генератора) рубидиевого стандарта со следующими характеристиками: нестабильность частоты, которая характеризуется двувыворочной дисперсией за 10 с $\sigma_f = 3 \cdot 10^{-12}$, погрешность установки номинала частоты $\Delta_f = 3 \cdot 10^{-12}$ и скорость дрейфа частоты $f' = 2 \cdot 10^{-13} \text{ с}^{-1}$ [8].

Проведенные расчеты показали, что при указанных характеристиках хранителя частоты (времени) и погрешности однократного (10-секундного) отсчета временной поправки на выходе приемника GPS ~40...50 нс обеспечивается поддержание синхронизации ШВ пункта и ШВ системного вре-



мени спутниковой радионавигационной системы (СРНС) с погрешностью 10...15 нс. При этом погрешность синхронизации ШВ пунктов, разнесенных на расстояние порядка 1000 км, не превышает 5...7 нс. Причем расхождения ШВ между отдельными пунктами рассматриваемой структуры практически отсутствуют.

Такими точностными характеристиками обладает рубидиевый стандарт частоты, созданный в ННЦ "Институт метрологии" [8].

Ведущее место при решении задач синхронизации системных ШВ занимают СРНС, которые могут обеспечить необходимую доступность, точность и оперативность для всех без исключений потребителей. Перспективные работы по повышению стойкости этих систем к любым внешним факторам, направленным на их деградацию, позволяют рассматривать СРНС как одно из средств получения сигналов времени потребителями Украины [5-7]. Однако, при этом необходимо иметь в виду, что глобальные спутниковые навигационные системы (ГНСС), такие, как GPS (США) и ГЛОНАСС (Россия), принадлежат военным ведомствам, предназначены для военных целей со всеми вытекающими отсюда последствиями и в любой момент могут быть отключены (GPS).

ГЛОНАСС в настоящее время находится в стадии реконструкции и не может обеспечить в полной мере потребности по синхронизации ШВ, прежде всего из-за отсутствия целостности системы.

Сигналы GPS, несущие навигационную информацию, излучаются на двух частотах: 1575,45 МГц (L1) и 1227,6 МГц (L2). На второй частоте излучаются только сигналы с военным кодом P(Y), несущие высокоточную информацию (P – Precision, точный) и защищенные криптографическим методом от имитационных помех, о чем свидетельствует индекс Y. На первой частоте передаются сигналы как с кодом P(Y), так и с общедоступным кодом C/A. Сигналы обоих кодов представляют собой псевдошумовую последовательность импульсов, с помощью которой осуществляется фазовая манипуляция несущей частоты. Военный код P(Y) имеет продолжительность 267 суток, а код C/A – 1 мс. Прием сигналов с кодом P(Y) дает возможность работы в режиме высокой точности измерений (PPS), а сравнение времени прихода сигналов на частотах L1 и L2 позволяет вычислять дополнительную задержку, возникающую при прохождении сигналов через ионосферу из-за нелинейности (увеличения пути) распространения в ней радиоволн. Прием сигналов с кодом C/A только на одной частоте не дает возможности вычислять ошибки, вносимые при прохождении радиоволн через ионосферу. Кроме того, сама структура кода обеспечивает значительно худшие характеристики в режиме стандартной точности измерений (SPS). Основным навигационным псевдослучайным кодом является точный P-код. При включении режима A/S (Antispoofing) вместо этого кода

будет использоваться закрытый код P(Y), введенный впервые для НКА Блок-II [9]. В любой момент времени, за счет преднамеренного ухудшения точности путем ввода ошибок при формировании навигационных параметров, погрешность измерений в режиме SPS для гражданских потребителей может быть существенно увеличена.

Для использования в гражданских целях по совместной инициативе Европейской комиссии и Европейского космического агентства создана программа "Галилео", также представляющая собой глобальную систему местопределения и навигации с помощью спутников. Однако и она будет иметь несколько типов сигналов, обеспечивающих открытые услуги (OS) – бесплатные для применения "широкой публикой", коммерческие услуги (CS) – платные услуги с добавленной стоимостью и общественно регулируемые услуги (PRS) – услуги с контролируемым доступом для правительственного применения. На наш взгляд, рассматривать вопрос о применимости программы "Галилео" для формирования системных ШВ будет возможно после окончательного выбора будущего коммерческого оператора рабочей службы "Галилео" (период до 2010 г.) [9].

Таким образом, сигналы, излучаемые навигационными спутниками, имеют определенную структуру, способную обеспечивать проведение высокоточных навигационных и временных измерений. Однако, в полной мере использовать возможность СРНС могут только их владельцы, к числу которых Украина не принадлежит. Указанные владельцы имеют принципиальную возможность изменять структуру излучаемых радионавигационных сигналов так, чтобы или усложнить несанкционированное их использование другими потребителями, или внести существенные погрешности в результаты определения.

Для того чтобы своевременно принять предохранительные меры, обеспечивающие возможность использования потребителем таких сигналов без нанесения вреда, необходимо обеспечивать постоянный контроль качества радионавигационного поля.

К сожалению, в Украине государственной сети мониторинга ГНСС и синхронной работы технических средств с государственным первичным эталоном времени и частоты в настоящее время не существует.

Рядом зарубежных фирм, таких, как "Hewlett-Packard", "Rohde&Schwarz", "Время-Ч", "Кварц", РИРВ, разрабатывается и выпускается широкий класс приборов: квантовые стандарты частоты и времени (цезиевые, водородные, рубидиевые), кварцевые генераторы и целый ряд частотно-измерительных приборов. Их основные характеристики представлены в [8, табл. 1, 2] и в табл. 1.

Квантовая мера, в которой используется любое изменение физического состояния атомов или молекул под действием электромагнитного поля, называется пассивной квантовой мерой, одной из

Таблица 1

Модель	Произв.	F _{ном} , МГц	Точн. устан.	ADEV	Уход частоты		Уров. гарм.	Фазовый шум, Гц			U _{пит} , В	Потребляемая мощность, Вт	Габариты В×Ш×Д	Масса, г
					год	сутки		1	10	100				
Рубидиновые модули для автономной работы														
FE-5680A	F	10	1·10 ⁻¹¹	1,4·10 ⁻¹¹ /t ^{0,5}	2·10 ⁻⁹	2·10 ⁻¹¹	30	-	-100	-125	-145	11 (32 пик)	25×88×125	450
option 03	F	5												
option 06	F	2,048												
option 08	F	По заказу												
option 28	F				5·10 ⁻¹⁰	4·10 ⁻¹²								
option 29	F				2·10 ⁻¹¹	-								
option 31	F			5·10 ⁻¹² /t ^{0,5}										
LPRFS (S, Q-code)	T	10	5·10 ⁻¹¹	1·10 ⁻¹¹ /t ^{0,5}	5·10 ⁻¹¹	-	-25	-80	-100	-130	-140	10 (25)	75×75×49	400
LPRFS (S, Q, X-code)	T	10	5·10 ⁻¹¹	1·10 ⁻¹¹ /t ^{0,5}	5·10 ⁻¹¹	-	-40	-80	-100	-130	-140	10 (25)	75×75×49	400
Рубидиновые модули со встроенной ФАПЧ от 1 с														
SRO-100	T	10	5·10 ⁻¹¹	3·10 ⁻¹¹ /t ^{0,5}	5·10 ⁻¹¹	-	-25	-75	-95	-125	-145	24	110×71×26	300
SRO-100 (S-code)	T	10	5·10 ⁻¹¹	1·10 ⁻¹¹ /t ^{0,5}	5·10 ⁻¹¹	-	-25	-80	100	-124	-145	24	110×71×26	300

Обозначения производителей: F – фирма "Frequency Electronics" (США), T – фирма "Temex" (Швейцария)

реализаций которой является стандарт частоты и времени рубидиевый.

Следует отметить, что если воспроизведение и хранение единицы частоты определяется, в основном, параметрами физической части стандартов частоты, то хранение и воспроизведение единицы времени (шкалы времени) является достаточно сложной задачей и зависит от ряда факторов. В [10] отмечалось, что методы СВЧ-спектроскопии, на применении которых основаны квантовые стандарты частоты, позволяют измерять частоты с гораздо большей относительной точностью, чем любую другую величину. Желательно эту точность использовать и в области измерения интервалов времени. Частоту любого источника колебаний, в том числе и используемого как времязадающий источник, можно записать в виде

$$\omega = \omega_0 [1 + \Delta\omega + \alpha t + \theta(t)], \quad (1)$$

где α – относительная скорость линейного изменения частоты; $\Delta\omega$ – относительное отклонение частоты генератора от эталонного (номинального) значения; $\theta(t)$ – относительные флуктуации частоты от текущего значения.

Наблюдаемое время определяется как

$$t_n = \frac{\varphi}{\omega_0}; \quad (2)$$

$$\partial t_n = \frac{\partial U}{\omega}. \quad (3)$$

Используя (1)–(3), после несложных преобразований получим

$$T_s = T\Delta\omega + \frac{1}{2}\alpha T^2 + \int_0^T \theta \partial t_1, \quad (4)$$

где T – измеряемый интервал времени.

Первое слагаемое выражения (4) определяет линейный ход шкалы, связанный с отклонением частоты источника от сравниваемого номинального (эталонного) значения. Второе слагаемое определяется относительной скоростью линейного ухода частоты, а третье слагаемое – относительными флуктуациями рассматриваемого источника.

С учетом полученных соотношений определим величину изменения шкалы времени для разных характеристик хранителей. Результаты расчетов представлены в табл. 2 и 3.

В табл. 4 представлены характеристики отдельных измерителей расхода электроэнергии, использующих систему отсчета времени, построенную на часовых кварцах (32780 Гц), погрешности которых приведены в табл. 2 и 3.

В [4] прогнозируется применение спутниковых РНС для создания сети единого времени в электроэнергетике. Однако следует отметить, что применение РНС требует использования хороших носителей времени, обеспечивающих надежную синхронизацию измерительных систем. Кроме того, как показано

Таблица 2

Относительное отклонение частоты от номинального значения	Среднее изменение шкалы времени, с		
	за сутки	за месяц	за 10 суток (для часовых кварцев)
10^{-4}	10	300	100
10^{-5}	10^0	30	10
10^{-7}	10^{-2}	0,3	–
10^{-10}	10^{-5}	$3 \cdot 10^{-4}$	–
10^{-11}	10^{-5}	$3 \cdot 10^{-5}$	–
10^{-12}	10^{-7}	$3 \cdot 10^{-6}$	–
10^{-13}	10^{-8}	$3 \cdot 10^{-7}$	–
$5 \cdot 10^{-14}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$1,5 \cdot 10^{-8}$	–

Таблица 3

Относительная скорость линейного ухода частоты за сутки	Среднее изменение шкалы времени, с		
	за сутки	за месяц	за 10 суток (для часовых кварцев)
10^{-4}	5	4500	500
10^{-5}	0,5	–	50
10^{-10}	$5 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-3}$	–
$4 \cdot 10^{-11}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$450 \cdot 10^{-6}$	–
–	–	–	–
10^{-12}	$5 \cdot 10^{-8}$	–	–
$5 \cdot 10^{-13}$	–	–	–
10^{-13}	$5 \cdot 10^{-9}$	–	–

Таблица 4*

Номер уровня системы учета	Мощность объекта контроля, МВА	Допустимая погрешность измерений, %
1	$S \geq 1000$	0,3 (0,7**)
2	$300 \leq S < 1000$	0,4 (0,7**)
3	$100 \leq S < 300$	0,7
4	$50 \leq S < 100$	1,2
5	$10 \leq S < 50$	1,8
6	$3 \leq S < 10$	2,5
7	$0,75 \leq S < 3$	4,6
8	$S < 0,75$	7,3; 3,2***

* Для оптового рынка базовым принят уровень 3, для розничного – уровень 7.

** Указанные значения допустимых погрешностей измерений принимаются на переходный период формирования системы учета энергорынка.

*** Для прямого включения счетчиков (без трансформаторов).

выше [8], в настоящее время можно использовать только систему GPS, которая является военной и в любое время может быть выключена. Рассмотрение систематических погрешностей по результа-

там, представленным в табл. 2 и 3 (строки 1 и 2), показывает существенный вклад в формирование времени разных экземпляров часовых устройств, что приводит к существенной погрешности отсчета времени отдельных экземпляров приборов.

Применяемые для измерения расхода электроэнергии приборы (табл. 4) используют счетчики, обладающие низкой точностью (табл. 2 и 3), причем эти величины характерны для каждого из счетчиков, что приведет к расхождению показаний расхода электроэнергии как в отдельных пунктах учета, так и в элементах базовой NTP-сети. Вообще, по нашим расчетам, для исключения потерь электроэнергии погрешность отсчета времени в счетчиках не должна превышать 10^{-2} с.

В [3] подробно рассмотрена структура аппаратуры измерения расхода электроэнергии, для которой может быть использована система синхронизации времени с использованием рубидиевых стандартов частоты, рассмотренных выше, с их синхронизацией по ГПЭВЧУ с применением системы дистанционного контроля и управления [11, 12].

Выводы

1. Применение предлагаемой системы синхронизации обеспечивает наивысшую точность и надежность воспроизведения шкалы времени, отсутствие расхождения шкал в разных точках измерения времени системы энергорынка и позволяет уменьшить погрешность измерения расхода электроэнергии.

2. Как уже указывалось, использование РНС GPS чревато возможностью отключения системы GPS и нарушением работы системы электроэнергетики.

3. Необходимо обратить особое внимание на погрешности приборов измерения расхода, которые являются доминирующими. Эти приборы требуют немедленной модернизации.

Список литературы

1. Соловьев Ю.А. Системы спутниковой навигации. -М.: Эко-Трендз, 2000. -450 с.

2. Сетевые спутниковые радионавигационные системы /Под ред. В.С.Шебшаевича. -2-е изд. -М.: Радио и связь, 1993. -408 с.

3. Коцарь О.В., Мазан В.В. Синхронизация времени в АСКУЭ СИНТ //Энергетика и электрификация. -2003. -№ 4. -С. 39-45.

4. Стогний В.С., Сопель М.Ф., Пилипенко Ю.В. О проблеме единого времени в электроэнергетике //Там же. -2003. -№ 4. -С. 35-39.

5. Ковпак Б.Д., Наталюк М.Ф., Кричевець О.М. та ін. З питань метрологічного забезпечення автоматизованого вимірювання та обліку електричної енергії між суб'єктами енергоринку //Український метрологічний журнал. -2005. -№ 3. -С. 26-29.

6. ДСТУ 3538-97 Державна повірочна схема для засобів вимірювань часу і частоти. -Київ.: Держстандарт, 1997. -9 с.

7. Клейман А.С., Левенберг А.И., Романько В.Н. и др. Региональная система передачи потребителям размера единиц частоты и шкал времени //Радиотехника. -2001. -Вып. 121. -С. 74-76.

8. Клейман А.С., Левенберг А.И., Сидоренко Г.С. и др. Стандарт частоты и времени рубидиевый: создание, исследование и применение //Український метрологічний журнал. -1998. -Вып. 4. -С. 23-25.

9. Business in satellite navigation /http://www.esa.int/navigation

10. Lyons H. //The atomic clock. Am.Scholar. Spring. -1950. -V. 19. -P. 159-168.

11. Клейман А.С., Соловьев В.С., Левенберг А.И. и др. Передача эталонной частоты от государственного эталона потребителям //Український метрологічний журнал. -2003. -Вып. 3. -С. 22-23.

12. Клейман А.С., Варакин Ю.А., Левенберг А.И. и др. Передача эталонных сигналов ГПЭВЧУ потребителям //Метрологія та вимірювальна техніка (Метрологія-2002): Наук. праці III Міжнар. наук.-техн. конф. у 2-х т. Т. 1. -Харків: ХДНДІМ, 2002. -С. 116-117.