



УДК 621.391

А. К. Шашкин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)

Прогнозирование шкал синхронизации в сетях телемеханики с ограниченными канальными ресурсами

Рассмотрено построение сетей телемеханики с резервированием каналов передачи сообщений в условиях ограниченного канального ресурса. Предложена система синхронизации с прогнозированием нестабильностей опорных хранителей частоты. Приведены алгоритмы прогнозирования и результаты их работы.

Сети телемеханики, резервирование каналов передачи, ограниченный канальный ресурс, прогнозирование шкал синхронизации

Телемеханика – область науки и техники контроля и управления на расстоянии путем передачи по каналам связи команд управления и сообщений о состоянии объектов¹. Она применяется в первую очередь в отраслях, где нужно объединить территориально разбросанные объекты в единый производственный комплекс с централизованным контролем и управлением. Такие задачи возникают в энергосистемах, на нефтепромыслах, трубопроводах, крупных заводах, в шахтах, на транспорте, в ирригации и т. д. В настоящей статье телемеханика рассмотрена применительно к системе энергетического мониторинга (управления уличным освещением).

Телемеханическая система (рис. 1) содержит пункт управления (диспетчерский пункт – ДП), контролируемые (абонентские) пункты КП и технические средства связи ДП с КП. КП содержат источники сообщений, а также аппаратно-программные средства формирования, приема и передачи сообщений. Источники сообщений формируют сигналы об аномальных ситуациях, сигналы, содержащие результаты измерений (значения токов в нагрузках, подводимых напряжений), сигналы-индикаторы состояния оборудования (включения и отключения освещения, целостности предохранителей), а также сигналы телеуправления (управления освещением).

Линии связи, соединяющие ДП с КП, могут быть как проводными (кабельными либо оптоволоконными), так и беспроводными (радиолиниями либо открытыми оптическими линиями).

В последние десятилетия предпочтение отдают беспроводным линиям связи [1]. Такие линии обеспечивают дальность связи, ограниченную дальностью непосредственной связи по радиоканалу либо по открытому оптическому каналу. С другой стороны, радиоканал позволяет обеспечить надежную связь с КП, удаленными на значительные расстояния от ДП, ретрансляцией информационных сообщений через промежуточные пункты.

В дальнейшем рассмотрим линию связи на базе радиоканала диапазона 30...50 МГц, наиболее часто используемого в телемеханике [1], [2].

Объем передаваемых в таких системах сообщений относительно мал – не более 10...20 байт. Так, в системе, развернутой в Санкт-Петербурге на базе диспетчерского пункта Петродворцовых элек-

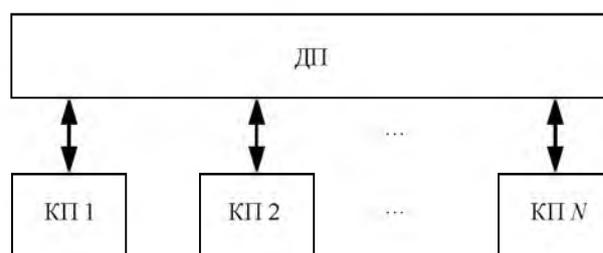


Рис. 1

¹ <http://riscom-etu.spb.ru>

трических сетей и охватывающей Петродворцовый, Ломоносовский, Красносельский, Володарский и Московский районы, число КП около 100.

Аппаратура КП обычно создается на основе однокристальных микроЭВМ, что позволяет изменять алгоритмы обработки сигналов и учитывать различные требования по сопряжению с электромеханическим оборудованием КП [2], [3].

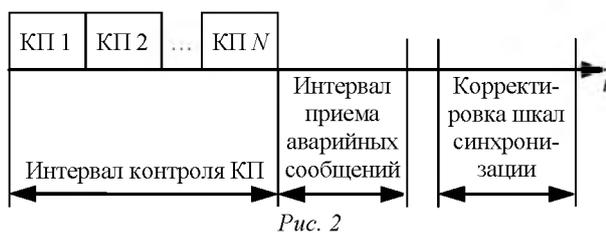
По каналам связи передача информации осуществляется в следующих видах:

- цифровая информация с использованием в радиоканале в качестве носителя фазовой манипуляции в полосе 300...3400 Гц со скоростью 1200/2400 бит/с;
- речевая информация (при необходимости связи диспетчера с обслуживающим КП персоналом) с использованием стандартных гарнитур радиостанций в полосе 300...3400 Гц.

Время передачи цифрового сообщения по радиоканалу от одного КП не более 2 с с учетом времени переключения радиостанции с приема на передачу.

Принцип обмена информацией. Предлагается построение алгоритма организации обмена в системе по принципу резервирования каналов передачи сообщений [4]. Алгоритм предполагает введение шкал синхронизации для ДП и КП. ДП может формировать шкалы синхронизации на основе шкалы GPS. КП должны формировать сигналы на основе собственного формирователя, корректируемого сигналами ДП. Установка GPS на КП нежелательна в силу невыполнимых требований со стороны GPS (отсутствие приема горизонтальных и вертикальных созвездий спутников из-за возможной экранировки КП кронами деревьев, перекрывающей доступ сигналов GPS, и т. п.). При этом для уменьшения загрузки канала связи сигналами синхронизации целесообразно корректировать шкалы синхронизации КП по сигналам от ДП между очередными сеансами контроля КП.

Временная диаграмма работы системы в таком случае может быть представлена в виде рис. 2. Интервал приема аварийных сообщений предназначен для приема сообщений от КП, содержащих информацию о возникновении и характере не-



штатных ситуаций. Его длительность позволяет принять аварийные сигналы, приходящие от пяти КП. Если нештатная ситуация возникла на большем числе пунктов, то обработка сигналов от некоторых КП может производиться после очередного интервала контроля объектов.

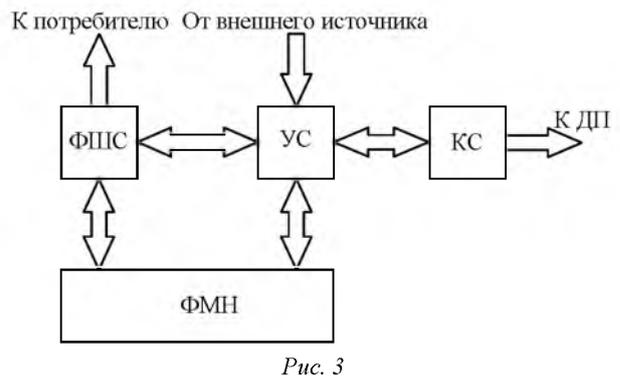
Описанный алгоритм обмена информацией между ДП и КП обладает следующими преимуществами:

- относительно малой вероятностью появления коллизий в канале связи (коллизии связаны только с приемом информации о нештатных ситуациях);
- возможностью своевременного получения информации о возникновении нештатных ситуаций на КП за счет выделения специального интервала для приема аварийных сообщений.

Алгоритм прогнозирования шкалы времени. Для реализации временного разделения каналов в системе телемеханики необходимо введение шкалы синхронизации. Структура пункта синхронизации отдельного КП представлена на рис. 3. В пункте находятся формирователь шкалы синхронизации ФШС, устройство сведения УС формируемой шкалы со шкалами внешних (других) формирователей и формирователь модели процесса неустойчивости ФМН, позволяющий оценить параметры модели и выполнить коррекцию шкалы синхронизации. Пункт синхронизации связан каналом связи КС с ДП.

Совершенствование шкал синхронизации, как правило, требует повышения стабильности сигналов опорных генераторов. Параллельно с этим может быть использован и другой подход к повышению стабильности таких шкал. Учитывая, что основная составляющая неустойчивости используемых на КП кварцевых генераторов имеет характер медленных флуктуаций, можно осуществлять прогнозирование этих неустойчивостей [2].

Для определения влияния различных факторов на величину и характер неустойчивости вы-



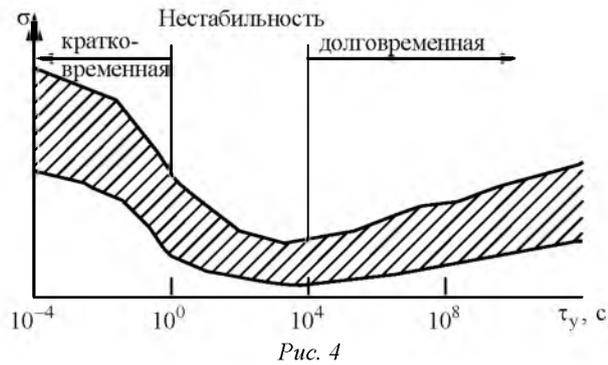


Рис. 4

полнены измерения нестабильности частоты $\delta_f = \Delta f / f$ при разных интервалах времени усреднения τ_y . Результаты приведены на рис. 4 [5] в виде зависимости интервалов значений среднеквадратического значения нестабильности частоты σ от времени усреднения. В интервале времени усреднения от 0.1 с до 15 ч наблюдается спад значений нестабильности. Ее увеличение слева от этого интервала обусловлено влиянием термических и дробовых шумов активных и пассивных элементов опорного кварцевого генератора. В этой же зоне заметна также нестабильность третьего типа – детерминированные периодические отклонения.

Математические модели процессов нестабильности позволяют построить алгоритмы прогнозирования отклонений частоты от номинала, на основании которых могут быть сформулированы управляющие воздействия, компенсирующие эти отклонения. Выходной сигнал опорного генератора можно записать в виде

$$s(t) = [E + \beta(t)] \sin[2\pi f_0 t + \varphi(t)], \quad (1)$$

где E , f_0 – номинальные значения амплитуды и частоты сигнала соответственно; $\beta(t)$, $\varphi(t)$ – случайные процессы, описывающие флуктуации амплитуды и фазы соответственно. В реальных генераторах основной вклад в нестабильность вносят фазовые составляющие, а флуктуациями амплитуды можно пренебречь и переписать (1) в виде

$$s(t) = E \sin[2\pi f_0 t + \varphi(t)].$$

Разделим нестабильность фазы на "долговременную" нестабильность $\varphi_d(t)$ и "кратковременную" нестабильность $\varphi_{кр}(t)$:

$$\varphi(t) = \varphi_d(t) + \varphi_{кр}(t).$$

Рассмотрим прогнозирование "долговременной" составляющей. Модель базируется на предположении, что процесс нестабильности формируется на выходе четырехполосника, возбужденного "белым" гауссовским шумом. Параметры возбуждающего шума и формирующего четырехполосника выбираются такими, чтобы процесс на выходе четырехполосника имел характеристики, близкие к экспериментально полученным. Сравнение параметров процессов можно выполнить следующим образом. На основе экспериментально наблюдаемого процесса нестабильности генератора вычисляют его корреляционную функцию $R(\tau)$. По ней на основании соотношения Винера–Хинчина определяют энергетический спектр процесса нестабильности, совпадающий с точностью до постоянных коэффициентов с квадратом модуля коэффициента передачи формирующего четырехполосника. Динамическая модель в данном случае представляет собой описание прохождения "белого" гауссовского шума через формирующий четырехполосник посредством системы дифференциальных уравнений².

Обозначим коэффициент передачи формирующего четырехполосника через $K_\Phi(p)$, "белый" гауссовский шум, возбуждающий четырехполосник, – через $\xi(t)$, а совокупность процессов на выходе – как векторный сигнал $x(t) = [x_1(t), \dots, x_m(t)]^T$, где составляющие вектора представляют собой отдельные элементы выходного сигнала. Коэффициент передачи формирующего четырехполосника, в частности зададим дробно-рациональной функцией [6], [7]:

$$K_\Phi(p) = \frac{\lambda_1 p^{m-1} + \lambda_2 p^{m-2} + \dots + \lambda_m}{p^m + \psi_1 p^{m-1} + \dots + \psi_m}, \quad (2)$$

где $\lambda_1, \dots, \lambda_m$; ψ_1, \dots, ψ_m – постоянные. При этом процесс с рациональным спектром можно представить матричным дифференциальным уравнением:

$$\dot{x}(t) = Fx(t) + G\xi(t), \quad t \in [0, T],$$

где для K_Φ в форме (2)

$$F = \begin{bmatrix} -\psi_1 & 1 & 0 \dots 0 \\ -\psi_2 & 0 & 1 \dots 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ -\psi_m & 0 & 0 \dots 0 \end{bmatrix},$$

² Системой таких уравнений описывается всякий процесс с рациональным спектром, приближающимся к нулю на высоких частотах [6].

$\mathbf{G} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m]^T$; T – момент окончания наблюдения; причем $\mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0$ – начальные условия; точка над обозначениями переменных обозначает производную по времени; "T" – символ транспонирования.

"Белый" шум $\xi(t)$ имеет ковариационную матрицу $M[\xi(t)\xi^T(u)] = X\delta(t-u)$, где X – спектральная плотность мощности шума; $\delta(\cdot)$ – дельта-функция; $M\{\cdot\}$ – символ математического ожидания.

Нестабильность фазы описывается следующим образом: $\varphi(t) = \mathbf{H}(t)\mathbf{x}(t) + \eta(t)$, где $\mathbf{H}(t)$ – вектор-строка, вид которой определяется наблюдаемой составляющей сигнала $\mathbf{x}(t)$; $\eta(t)$ – модель процесса "кратковременной" нестабильности. Порядок системы m , значения параметров $\lambda_1, \dots, \lambda_m, \psi_1, \dots, \psi_m$ определяются конкретным видом (2) и типом нестабильности. Если, например процесс нестабильности, представляет собой фиксированное расхождение частот, то $\mathbf{H}(t) = [1, 0, \dots, 0]$ и уравнение вырождается в скалярное уравнение первого порядка. Если процесс нестабильности описывается квазигармоническим колебанием, адекватной ему является модель второго порядка [6].

Определить порядок математической модели можно несколькими способами. Первый способ решения задачи состоит в вычислении коэффициентов $\lambda_1, \dots, \lambda_m, \psi_1, \dots, \psi_m$ формирующего четырехполюсника на основе известного энергетического спектра процесса нестабильности. Требования к точности аппроксимации определяют порядок модели. Этот способ, несмотря на кажущуюся простоту, сложен, поскольку измерения нестабильностей опорных генераторов предъявляют высокие требования к измерительной аппаратуре и, кроме того, необходимая точность аппроксимации энергетического спектра зависит от многих факторов.

Другой способ основан на подборе порядка математической модели, выполнении на ней исследований нестабильности и анализе полученных результатов. По завершении анализа, как правило, можно сделать заключение о целесообразном виде математической модели.

На рис. 5 нестабильность представлена тремя компонентами. Первый компонент – $g(t)$ – медленное изменение фазы (тренд процесса), которое можно трактовать как детерминированную со-

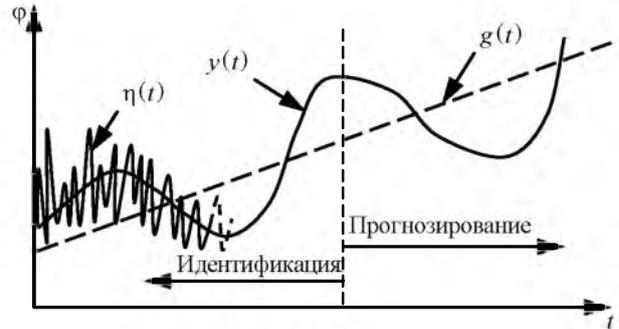


Рис. 5

ставляющую на исследуемой выборке. Как правило, описание тренда ищется в виде полинома.

Вторым компонентом $y(t)$ являются медленные флуктуации относительно компонента $g(t)$. Эту составляющую можно считать случайным локально-стационарным процессом со временем корреляции, большим периода прогноза. В рассматриваемом случае $y(t)$ также является объектом прогнозирования.

Третий компонент $\eta(t)$ – быстрые флуктуации фазы, стационарные по всей выборке, но с длительностью интервала корреляции, значительно меньшей, чем время наблюдения T . Можно считать, что этот компонент возникает за счет инструментальных погрешностей при изменении первых двух компонентов.

Таким образом, фаза сигнала представима в виде $\varphi(t) = g(t) + y(t) + \eta(t)$, причем прогнозируются только первые два компонента.

Процесс наблюдения нестабильности включает интервалы идентификации и прогнозирования. На этапе идентификации оцениваются параметры принятой модели. На этапе прогнозирования прогнозируется значение процесса на основе полученных результатов идентификации.

Примем далее модель флуктуации фазы в виде полинома со случайными коэффициентами:

$$\varphi(t) = \alpha_0 + \alpha_1 t + \dots + \alpha_m t^m + \eta(t), \quad (3)$$

где $\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_m$ – случайные величины с известной корреляционной матрицей, элементы которой определяются как $M\{\alpha_i \alpha_j\} = \sigma_{ij}^2, i, j \in \overline{0, m}$.

Преобразуем алгебраическое уравнение (3) в систему дифференциальных уравнений. Для этого обозначим $\varphi(t) = x_1(t)$. Тогда алгебраическое уравнение можно заменить системой m дифференциальных уравнений первого порядка:

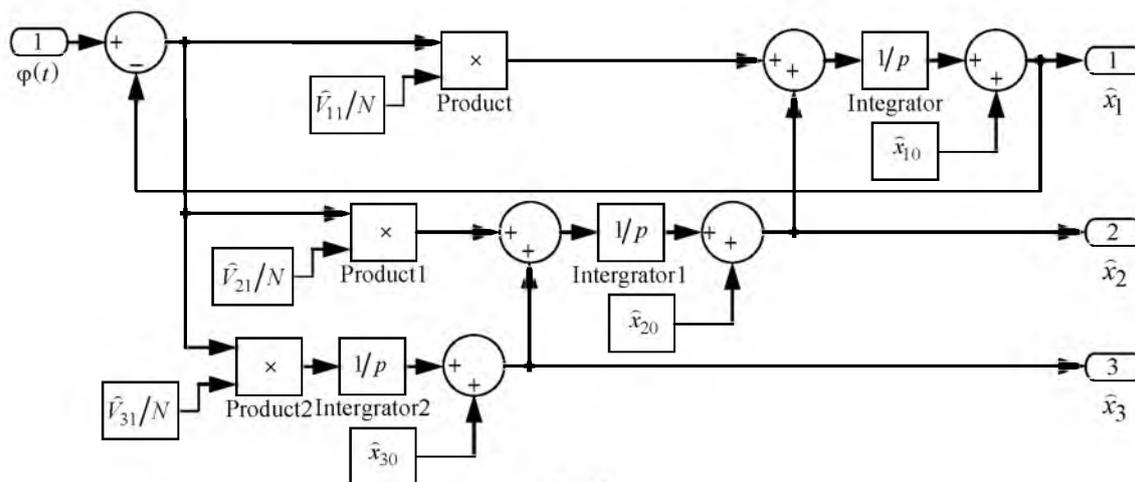


Рис. 6

параметры вектора состояния (рис. 6). При формировании оценки наблюдаемого процесса приняты начальные условия: $\hat{x}_{10} = 10$, $\hat{x}_{20} = 10$, $\hat{x}_{30} = 0$ и коэффициенты второго слагаемого правой части (7) $\hat{V}_{11}/N = 0.7$, $\hat{V}_{21}/N = 0.6$, $\hat{V}_{31}/N = 0.1$. На вход схемы подается исследуемый процесс неустойчивости $\varphi(t)$. Выходными сигналами являются оценки параметров \hat{x}_1 , \hat{x}_2 , \hat{x}_3 .

Каждый из оцениваемых параметров имеет ошибку, обусловленную тем, что в моделируемом процессе неустойчивости присутствует компонент быстрых флуктуаций. Оценивание параметров модели на основе уравнений (7), (8) существенно ослабляет воздействия этой составляющей [6].

Модель оценивания и прогнозирования в общем виде представлена на рис. 7. Блок 1 оценивает параметры вектора состояния (см. рис. 6). Слева от него расположена схема, формирующая процесс неустойчивости в виде аддитивной смеси шумового процесса и тренда, описываемого квадратичным уравнением. По окончании интервала оценивания параметров вектора состояния результаты оценки вводятся в качестве начальных условий в модель (см. рис. 6) и далее осуществляется прогнозирование процесса неустойчивости в соответствии с уравнением (9).

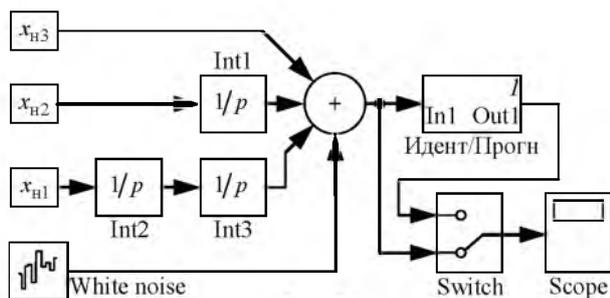


Рис. 7

На индикацию с помощью ключа выводятся два процесса: процесс неустойчивости (верхнее положение переключателя) и результат оценки и прогнозирования этого процесса (нижнее положение).

Исходя из априорных сведений о параметрах кварцевых генераторов для моделирования приняты начальные условия: $x_{н1} = 5$, $x_{н2} = 5$, $x_{н3} = 180$.

На рис. 8 представлены смещение шкалы синхронизации $t_{см}$, возникающее вследствие ошибок оценки фазы сигнала синхронизации, и оценка этого смещения $\hat{t}_{см}$, полученная в результате моделирования. Величина A показывает погрешность работы системы, основанной на исследуемых алгоритмах; величина B – погрешность, получаемую вследствие работы кварцевого генератора без систем оценки и прогнозирования. Отношение этих параметров $S = B/A$ – полученный в результате прогнозирования неустойчивости выигрыш.

Результаты моделирования для различных интервалов прогнозирования позволили установить, что выигрыш системы S может увеличиться примерно в пять раз.

Оценка изменения шкалы синхронизации системы телемеханики с учетом прогнозирования. Оценим эффективность прогнозирования в системе телемеханики, сравнив допустимый интервал

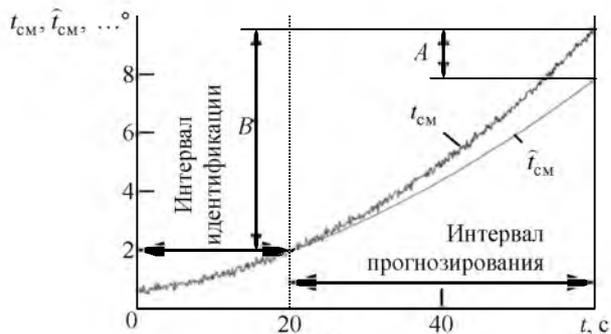


Рис. 8

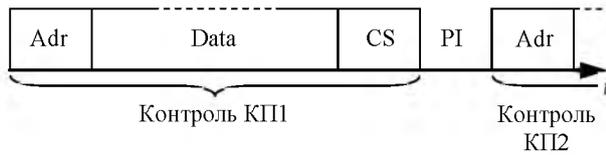


Рис. 9

передачи сигналов синхронизации без прогнозирования и с его применением. Состав пакета, передаваемого от ДП к КП, представлен на рис. 9, где Adr – адрес КП (8 бит), Data – сообщение (64 бит), CS – контрольная сумма (8 бит), PI – защитный интервал (8 бит). На основе данных рис. 9 интервал контроля одного КП (передаваемое сообщение и защитный интервал) $K = 88$ бит. Пусть в системе имеется 100 КП. Тогда интервал контроля всех КП соответствует 8800 бит. Добавив интервал, предусмотренный в каждом цикле работы для приема пяти аварийных сообщений того же объема (440 бит) (см. рис. 2), получим измеренную в битах длительность цикла работы системы $\Sigma = 9240$ бит.

Примем скорость передачи информации в системе телемеханики $v = 1200$ бит/с. Тогда длительность одного цикла работы составит $T_{\text{ц}} = \Sigma/v = 7.7$ с.

Если относительная нестабильность частоты кварцевого генератора $\delta_f = 10^{-6}$, отклонение

длительности цикла составит 7.7 мкс. При введении защитного интервала (рис. 9, PI) длительностью 6.7 мс количество циклов работы системы без дополнительного сведения шкал синхронизации между ДП и КП составит

$$N_1 \leq 6.7 / (7.7 \cdot 10^{-3}) = 870,$$

а продолжительность такой работы $T_1 = 870 \cdot 7.7 = 6699$ с, т. е. 1.86 ч.

На основе разработанного алгоритма прогнозирования отклонение системного времени удастся снизить в пять раз (до 1.54 мкс). За счет того же защитного интервала количество циклов работы без сведения шкал синхронизации между ДП и КП составит $N_2 \leq 6.7 / (1.54 \cdot 10^{-3}) = 4350$, а время работы $T_2 = 4350 \cdot 7.7 = 33\,495$ с или 9.3 ч.

Таким образом, за счет введения системы прогнозирования нестабильности частоты опорного кварцевого генератора период необходимого сведения шкал синхронизации ДП и КП увеличится в пять раз. Согласно проведенным расчетам, при этом будет достаточно проводить сведение шкал синхронизации один раз в 9 ч.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шашкин А. К., Копылов В. В., Лисенков А. В. Каналы связи диспетчерского управления электрических сетей. Достоинства радиоканалов // Новости электротехники. 2004. № 1(25). С. 64–65.
2. Система контроля объектов энергопотребления с гибкой архитектурой / А. В. Катушкин, В. В. Копылов, А. В. Лисенков, А. К. Шашкин // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". Сер. Радиоэлектроника и телекоммуникации. 2003. № 1. С. 48–52.
3. Caballero A., Shashkin A. Training for the project of large scale control systems // Training for tomorrow: IFAC /IFIP conf. Leiden, the Netherlands, June 7–10, 1983. New York: IFAC, 1983. P. 40–43.
4. Широкополосные беспроводные сети передачи информации / В. М. Вишневецкий, А. И. Ляхов, С. Л. Портной и др. М.: Техносфера, 2005. 592 с.
5. Макшанов А. В., Смирнов А. В., Шашкин А. К. Робастные методы обработки сигналов в радиотехнических системах синхронизации. СПб.: Изд-во С.Петербургского ун-та, 1991. 176 с.
6. Снайдер Д. Метод уравнений состояний для непрерывной оценки в применении к теории связи. М.: Энергия, 1973. 104 с.
7. Первачев С. В. Валуев А. А., Чиликин В. М. Статистическая динамика радиотехнических следящих систем. М.: Сов. радио, 1973. 488 с.

A. K. Shashkin

Saint-Petersburg state electrotechnical university "LETI"

Prediction of scales of synchronization in telemechanics networks with limited channel resources

Creation of telemechanics networks with reservation of messages transmission channels in the conditions of a limited channel resource is considered. The system of synchronization with prediction of basic frequency keepers' not-stability is offered. Prediction algorithms and results of its operation are given.

Telemechanic nets, canal transmission reservation, limited canal resource, synchronization scales prediction

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2014 г.