

М.С. ШИКОВА, И.В. МЕЛЬНИК  
Национальный технический университет Украины  
«Киевский политехнический институт»

## ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ УЗЛОВ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ИНФОРМАЦИИ В ИНФРАСТРУКТУРЕ МОНИТОРИНГА SMART GRID

*Инфраструктура системы мониторинга Smart Grid предполагает передачу и обработку больших объемов телеметрии. Это выводит на передний план следующие основные проблемы: упрощение структурированной кабельной системы, минимизация полосы пропускания канала передачи данных, обработка больших объемов данных. Частично эти проблемы решаются в рамках тематики Big Data. Данная статья рассматривает один из подходов, специфических для Smart Grid. Суть подхода, главным образом, заключается в установке промежуточных узлов преобразования информации. Количество получаемой информации определяется на основе вероятностных оценок.*

*Ключевые слова: Smart Grid, система мониторинга, оптимизация*

М.С. ШИКОВА, І.В. МЕЛЬНИК  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут»

## ОРГАНІЗАЦІЯ ПРОМІЖНИХ ВУЗЛІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ІНФОРМАЦІЇ В ІНФРАСТРУКТУРІ МОНІТОРИНГУ SMART GRID

*Інфраструктура системи моніторингу Smart Grid передбачає передачу та обробку великих обсягів телеметрії. Це виводить на передній план такі основні проблеми: спрощення структурованої кабельної системи, мінімізація смуги пропускання каналу передачі даних, обробка великих обсягів даних. Частково ці проблеми вирішуються в рамках тематики Big Data. Дана стаття розглядає один з підходів специфічних для Smart Grid. Суть підходу головним чином полягає в установленні проміжних вузлів перетворення інформації. Кількість інформації, яка отримується, визначається на основі імовірнісних оцінок.*

*Ключові слова: Smart Grid, система моніторингу, оптимізація*

M.S. SHYKOVA, I.V. MELNIK  
National Technical University of Ukraine  
"Kyiv Politechnical Institute"

## ESTABLISHING OF INTERMEDIATE INFORMATION PROCESSING NODES IN SMART GRID MONITORING INFRASTRUCTURE

*Smart Grid Monitoring System Infrastructure intends the transfer and processing of large amounts of telemetry. This require resolutions of the following questions: simplifying the structured cabling system, minimizing bandwidth of data links, processing of large amounts of data. Partly this problems is addressed in the Big Data topic. This article examines approach specific to Smart Grid. The approach mainly relays in establishing of intermediate information processing nodes. The amount of obtained information is defined on the base of probability estimations.*

*Keywords: Smart Grid, monitoring system, optimization*

### Постановка проблемы

Ключевыми задачами высокоуровневого планирования инфраструктуры мониторинга современных сетей энергоснабжения Smart Grid являются:

1. Минимизация пропускной способности канала передачи данных. Инфраструктура мониторинга Smart Grid включает в себя большое количество датчиков. Если предположить, что каждый из них будет в режиме реального времени передавать измеряемые данные, то это потребует очень широкую полосу пропускания каналов связи. Таким образом, следует оптимальным образом подобрать алгоритмы снятия показаний с датчиков.

2. Длина соединительных кабелей. При достаточно разветвленной системе мониторинга с большим количеством датчиков значительная часть стоимости системы будет составлять структурированная

кабельная система (СКС). СКС — это законченная совокупность кабелей связи и коммутационного оборудования.

Соответственно, выбор времени и метода опроса датчиков, а также минимизация стоимости СКС являются ключевыми вопросами высокоуровневого планирования таких сетей, оптимизирующих производство и потребление электроэнергии [1, 2].

#### **Анализ последних исследований и публикаций**

Построение распределенных систем мониторинга, в том числе и сети Smart Grid, сейчас активно исследуется, поскольку такие системы приобретают все большую популярность. Сбор данных и их обработка по соответствующим алгоритмам предоставляет ценную информацию для принятия решений, позволяет оптимизировать производственные процессы и потребление электроэнергии. Развитие информационных технологий и средств телекоммуникаций предоставляет необходимую технологическую базу, однако требует специальных подходов к планированию подобных систем. В целом задачи по передаче, хранению и обработке очень больших объемов данных объединены в тематике обработки больших объемов информации Big Data [2]. Однако Big Data охватывает лишь общие подходы, которые характерны практически для любой системы. Описанию специфики сетей Smart Grid на данный момент посвящено не много работ. Связано это с малым распространением этих систем в Украине, а зарубежные публикации больше ориентированы на описание существующих стандартов, а не на анализ путей их усовершенствования [3, 4]. Однако интерес к таким системам постоянно возрастает, поэтому планирование и оптимизация инфраструктуры сетей Smart Grid является актуальной задачей на сегодняшний день.

#### **Формулирование цели исследования**

Целью исследования является построение математической модели сети мониторинга Smart Grid, при построении которой используются промежуточные узлы преобразования информации. Основой проводимых математических исследований являются методы теории вероятностей, математической статистики и теории надежности технических систем [5 – 10].

#### **Изложение основного материала исследования**

В данной статье будет рассмотрена модель сети электроснабжения. Это логическая модель системы управления Smart Grid, которая применима как в рамках дома, промышленного комплекса, так и в более широком государственном масштабе. Основу предлагаемой модели составляют следующие компоненты.

1. Датчики – это приборы, которые измеряют определенные параметры. Например, снимают показания температуры, мощности, влажности и т.д. В рамках одного дома это могут быть датчики температуры, влажности, датчики работоспособности тех или иных устройств, датчики закрытия двери. В государственном масштабе это могут быть датчики потребления мощности, а также датчики качества сигнала, если это важно для питания определенного электротехнического оборудования.

2. Элементы, которые коммутируют сеть электропитания. Например, включение или выключение, изменение характеристик энергетического оборудования и т.д. Они отправляют сообщения управляющему оборудованию и обслуживающему персоналу.

3. Центр управления, который принимает решения и отдает команды элементу управления. В нем организована логика управления системой Smart Grid.

Введем понятие инфраструктуры мониторинга. Инфраструктура мониторинга – это система, которая выполняет постоянное наблюдение за сетью энергоснабжения, отслеживая изменения в состоянии источников и потребителей электроэнергии и сети электроснабжения. С точки зрения описанной логической схемы – это совокупность всех датчиков, центра управления, а также каналов передачи информации между датчиками и центром управления.

Такая система может обнаруживать повреждение электросети, чтобы автоматически коммутировать резервные линии и посылать сообщения обслуживаемому персоналу; проверять доступность источников альтернативной энергии, в том числе ветряных генераторов и солнечных батарей; определять, когда работает потребитель электроэнергии, для которого существенны определенные качества электропитания, и решать другие серьезные задачи, связанные с оптимизацией электроснабжения. Предполагается, что на данном этапе известны места расположения датчиков, а также их вид и функциональные возможности.

Для решения поставленной задачи оптимизации электроснабжения устанавливаются промежуточные узлы преобразования информации. С точки зрения теории информации центр управления осуществляет преобразование первичной информации во вторичную. В соответствии с этим все датчики имеют логический канал связи с центром управления. Однако при реализации данной логической схемы на практике имеет смысл распределить функции системы мониторинга между несколькими узлами,

именуемыми далее промежуточными узлами преобразования информации. Таким образом, инфраструктура системы мониторинга электроэнергии Smart Grid схематично изображена на рис. 1.

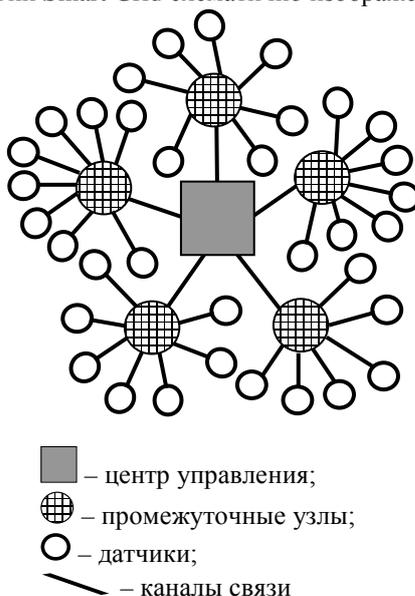


Рис. 1 – Инфраструктура сети мониторинга электроэнергии

Предположим, что промежуточный узел будет отсылать информацию в центр управления только при определенных условиях, например, при превышении определенного порога потребляемой энергии или при отключении устройства. Это позволяет решить оптимизационную задачу минимизации СКС. Важным параметром является количество информации на выходе, поскольку оно определяет ширину полосы пропускания информационных каналов от промежуточных узлов до центра управления, а также мощность самой системы управления. В роли промежуточного узла может выступать одноплатный компьютер, что уменьшает стоимость системы управления и расширяет её функциональные возможности.

При рассмотрении данной модели будем считать, что датчики поставляют значение некоторого параметра и инфраструктура мониторинга должна произвести некоторые действия в случае, если значение измеренного параметра превышает пороговое. На практике такие критерии могут быть различными. Например, это может быть преодоление как верхнего, так и нижнего порога, нестабильность параметра, его дисперсия и т.д. Для решения поставленной задачи воспользуемся методикой информационных оценок системы контроля электроэнергии, которая была предложена в работе [11].

Преобразование первичной измерительной информации о фактическом значении контролируемого параметра в информацию вторичную, представляемую в форме логических выводов, входящих в систему принятия решений, позволяет рассматривать любую систему инфраструктуры мониторинга как информационную. Для определения количества информации на выходе этой системы зададимся статистической моделью критерия принятия решения о том, что параметр находится в зоне допустимых значений. Гипотеза  $\gamma_1$  – это превышение порога, то есть параметр выходит за рамки допустимых значений.

Гипотеза  $\gamma_0$  говорит о том, что параметр находится в зоне допустимых значений. При этом в наблюдаемом случайном процессе  $x(t)$  рассматривается измеренное значение  $x$  с использованием критериальной статистики. Область допустимых значений для этой статистики  $\omega \in [0; x_B]$ , а критическая область  $\varpi \in [x_B, \infty]$ ,  $x_B$  - номинальное пороговое значение. Выбор решения производится в соответствии с условиями [11]:

$$\begin{cases} \gamma_0 : x \in \omega; \\ \gamma_1 : x \in \varpi. \end{cases} \quad (1)$$

Используем для описания вероятностных свойств статистики  $X$  модель скачкообразных изменений математического ожидания  $m_x$  процесса  $x(t)$  на интервале  $\Delta t$  его наблюдения [5 – 11]:

$$\begin{cases} m_x = m, \text{ если } x(t) \in \omega_0; \\ m_x = m + \Delta, \text{ если } x(t) \in \varpi, \Delta = \text{const}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\Delta$  – параметр смещения.

Введем два состояния ( $\Theta$ ) процесса  $x(t)$  на интервале  $\Delta t$  [11]:

$$\begin{cases} \Theta_0 : x(t) \in \omega_0, \\ \Theta_1 : x(t) \in \varpi. \end{cases} \quad (3)$$

Статистика случайной величины  $X$  рассматривается как сумма непрерывной центрированной величины  $x(\Delta t)$  и дискретной случайной величины  $Z$ :

$$x = x(t) + Z, \quad (4)$$

где  $Z = \begin{cases} m, \text{ если } \Theta = \Theta_0, \\ m + \Delta, \text{ если } \Theta = \Theta_1. \end{cases}$

Пусть  $\sigma^2$  – дисперсия процесса  $x(t)$ , которая не изменяется для состояний  $\Theta_0$  и  $\Theta_1$ , а  $f(x)$  – плотность распределения процесса на интервале  $\Delta t$ . Если,  $\sigma^2 = \text{const}$ , то, с учетом условий (2) и (4), процесс  $x(t)$  может считаться нестационарным по математическому ожиданию [5 – 10]. Пусть  $T$  – время наблюдения процесса  $x(t)$  в ходе контроля появления превышения нормы  $x_B$  при кратковременных превышениях порога, то есть выполняется условие  $T \gg \Delta t$ . Если процесс изменения параметра стационарен, то параметр  $H(t)$  этого потока будет постоянной величиной [4]:

$$H(t) = \lambda$$

Далее предположим, что интервал  $\Delta t$  настолько мал, что на этом интервале может появиться не более одного события превышения порога, при этом сами события рассматриваются как независимые случайные. Тогда последовательность таких событий образует простейший (стационарный пуассоновский) поток. Для пуассоновского потока событий вероятность того, что на участке времени длиной  $T$  наступит ровно  $k$  событий, определяется по формуле [5 – 10]:

$$P(k) = \frac{(\lambda T)^k}{k!} \cdot e^{-\lambda T} \quad (5)$$

Введем следующие обозначения. Пусть вероятность  $P_0$  соответствует нахождению параметра потребляемой электроэнергии в зоне допустимых значений, то есть значение  $k = 0$ . Аналогично предположим, что вероятность  $P_1$  соответствует тому, что за промежуток времени  $T$  было хотя бы одно превышение потребления электроэнергии, то есть коэффициент  $k \geq 1$ . Тогда из выражения (5) следует, что:

$$\begin{aligned} P_0 &= e^{-\lambda T}, \\ P_1 &= 1 - e^{-\lambda T}. \end{aligned} \quad (6)$$

На основе рассмотренных в данном разделе вероятностных оценок работы систем контроля энергопотребления и энергоснабжения Smart Grid, рассмотрим далее информационные оценки работы таких систем.

### Определение количества ожидаемой информации

Неопределенность статистики  $X$  до проведения контроля потребления электроэнергии определяется дифференциальной энтропией [5 – 10]:

$$h_x = \int_{-\infty}^{\infty} f(x') \log_2 f(x') dx' \quad (7)$$

где плотность вероятности  $f(x')$  определяется как композиция законов распределения случайных величин  $x$  и  $z$  [5 – 10]:

$$f(x') = f(x) \cdot f(z).$$

Здесь  $x$  – заданное значение  $x(t)$ ,  $z$  – заданное значение  $Z$ , причем величина  $x$  распределена по

нормальному закону, то есть

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt, \quad (8)$$

а плотность  $f(z)$  задана как ряд распределения случайной величины с заданной статистикой, которая определяется экспериментально. Тогда нечетные центральные моменты порядка  $k$  дискретной случайной величины  $Z$  равны [5 – 10]:

$$\mu_k = \Delta^k p_0 p_1 (p_0 - p_1) \quad (9)$$

Из литературы по теории вероятностей известно, что распределение  $f(z)$  симметрично, как и нормальный закон распределения для величины  $X$ , в том случае, если  $p_0 = p_1 = 0,5$ , поскольку для нечетных значений параметра  $k$  все значения  $\mu_k = 0$  [5 – 10]. В этом случае условная дифференциальная энтропия объединения для статистики  $X$  определяется результатом контроля в виде решений  $\gamma_0$  или  $\gamma_1$ , соответствующих отсутствию или наличию для значения величины  $Z$  скачкообразного приращения  $\Delta$  [9 – 11]:

$$h_{x/x_z} = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} f(x, x_z) \log \frac{f(x, x_z)}{f(x_z)} dx dx_z \quad (10)$$

где  $f(x, x_z)$  - плотность вероятности совместного появления событий  $x$  и  $x_z = x(\Delta t) + z$ .

Ожидаемое, по результатам контроля электроэнергии, количество информации о наличии или отсутствии случайного события, связанного с превышением потребления электроэнергии – это разность  $h_x - h_{x/x_z}$  [5,10, 11], то есть:

$$I = h_x - h_{x/x_z} \quad (11)$$

Если  $f(x)$  – нормальный закон распределения, то из соотношений (8, 10, 11), имеем [5 – 11]:

$$I = \log_2 \sqrt{1 + \frac{\sigma_x^2}{\sigma_{x_z}^2}} \quad (12)$$

Для нахождения остаточной дисперсии  $\sigma_x^2$  зададимся рисками  $\alpha$  первого рода и  $\beta$  второго рода. В соответствии с теорией надёжности риск второго рода соответствует ложной тревоге, то есть: система управления Smart Grid фиксирует превышение потребления электроэнергии при его отсутствии. Риск первого рода соответствует событию пропуска сигнала, то есть: Smart Grid не фиксирует факт превышения потребления электроэнергии [5 – 10]. Тогда:

$$\sigma_{x_z}^2 = (m - m_{z|\gamma_0})^2 (1 - \alpha) + (m + \Delta - m_{z|\gamma_0})^2 \alpha + (m - m_{z|\gamma_1})^2 \beta + (m + \Delta - m_{z|\gamma_1})^2 \cdot (1 - \beta), \quad (13)$$

$$\text{где} \begin{cases} m_{z|\gamma_0} = m + \Delta\alpha, \\ m_{z|\gamma_1} = m + \Delta(1 - \beta) \end{cases} \quad (14)$$

Условные математические ожидания  $m_{z|\gamma_0}$  и  $m_{z|\gamma_1}$  соответствуют возможным решениям  $\gamma_0$  и  $\gamma_1$ , принимаемым в ходе контроля. Выражение (13), после преобразований с учетом уравнений (1-4), примет вид

$$\sigma_{x_z}^2 = \Delta^2 [\alpha(1 - \alpha) + \beta(1 - \beta)]. \quad (15)$$

Тогда, из соотношений (12 – 15) окончательно имеем:

$$I = \log_2 \sqrt{1 + \frac{e^{-\lambda t} (1 - e^{-\lambda t}) + \sigma^2 / \Delta^2}{\alpha(1 - \alpha) + \beta(1 - \beta)}}. \quad (16)$$

где  $\lambda$  – параметр распределения Пуассона (5), который характеризует частоту превышения отключений электроэнергии за заданный промежуток времени.

Таким образом, на основе соотношения (16), с учетом стоимости микрокомпьютеров, используемых для контроля потребления электроэнергии, и соответствующих датчиков, можно определить оптимальное количество промежуточных контрольных узлов в сети управления потреблением электроэнергии Smart Grid, инфраструктура которой приведена на рис. 1.

### **Выводы**

Актуальность использования системы управления электроэнергией Smart Grid связана с повышением в экономически развитых странах интереса к концепции "Intelligent Home" [2], а также с распространением практики экономии электроэнергии на производстве [2]. Грамотное планирование системы мониторинга Smart Grid позволит снизить себестоимость системы и повысить ее эффективность. В данной работе рассмотрен один из подходов такого планирования и показано, что введение промежуточных узлов преобразования информации позволяет снизить требование к полосе пропускания каналов связи, уменьшить стоимость СКС, а также в некоторой степени снизить нагрузку на центр управления. Для выбора оптимального количества промежуточных узлов использованы вероятностные и информационные оценки. Данный подход может быть использован на разных уровнях иерархии: в небольших энергетических системах, типа "Intelligent Home", в промышленных масштабах, а также в масштабах государства для контроля и оптимизации потребления электроэнергии.

### **Список использованной литературы**

1. Лунтовський А.О., Мельник І.В., Шикова М.С. Етапи розвитку сучасних мережних технологій та приклад створення енергетично-ефективного мультимедійного сервісу на основі комп'ютерного вузла. // *Електроніка і зв'язь*. – Том 19. – №6 (83). – 2014. – С. 121 – 127.
2. Лунтовський А.О., Мельник І.В. Сучасні системи туманних вичислень і методи їх проектування. // *Електронне моделювання*. – Т. 37. – № 2. – 2015. – С. 59-76.
3. Xi F., Satyajayant M., Guolian X., Dejun Y. Smart Grid – The New And Improved Power grid: A Survey. // *IEEE Communication Surveys and Tutorial*. – V. 35, 2011. – p. 511 – 548.
4. Gungor V.C., Sahin D., Kocak T., Ergut S., Bucella C., Cecati C., Hancke G.P. Smart Grid Technologies: Communication Technologies and Standards. // *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. – V. 7, # 4, 2011. – P. 529 – 539.
5. Блинков Ю.В. Основы теории информационных процессов и систем: учебн. пособие / Ю.В. Блинков // – Пенза: ПГУАС, 2011. – 184 с.
6. Душин В.К. Теоретические основы информационных процессов и систем: учебник для студ. вузов / В.К. Душин. 4-е изд. М.: Дашков и К., 2010. – 348 с.
7. Иванов Ю.П. Информационно-статистическая теория измерений / Ю.П. Иванов, Б.Л. Бирюков. – СПб.: ГУАП, 2008. – 160 с.
8. Вентцель Е.С. Теория вероятностей и ее инженерные приложения: [Учебн. пособие для вузов] / Е.С. Вентцель, Л.А.Овчаров.–М.: 2007.– 490 с.
9. Волкова В.Н. Информационные системы: учебн. пособие / Под ред В.Н. Волковой, Б.И. Кузина. – СПб.: СПб ГТУ, – 2001. – 216 с.
10. Волков В.Л. Информационно-статистическая теория измерений / В.Л. Волков. – Н. Новгород: НГТУ, 2000. – 80 с.
11. Любимова Н.А. Контроль загрязняющих выбросов энергетических предприятий с использованием информационного анализа. – *Вестник Херсонского национального технического университета*. – № 3(50), 2014. – С. 346 – 349.