

Е.И. Сокол, О.Г. Гриб, С.В. Швец

СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ СЕТЕЦЕНТРИЗМА

У статті розглянуті тенденції розвитку і принципи організації інтелектуальних енергосистем при введенні поняття сетецентризма в умовах ідеології Smart Grid. У якості рішення задач вказаної проблематики пропонується створення активно-адаптивної системи, яка реалізує концепцію «обслуговування системи на основі відклику». Бібл. 9.

Ключові слова: Smart Grid, сетецентрична система управління, активно-адаптивна система обслуговування енергосистем, результативний фактичний відклик.

В статье рассмотрены тенденции развития и принципы организации интеллектуальных энергосистем при введении понятия сетецентризма в условиях идеологии Smart Grid. В качестве решения задач указанной проблематики предлагается создание активно-адаптивной системы, реализующей концепцию «обслуживания системы на основе отклика». Библ. 9.

Ключевые слова: Smart Grid, сетецентрическая система управления, активно-адаптивная система обслуживания энергосистем, результативный фактический отклик.

Введение и постановка проблемы. В электроэнергетических системах мира и Украины не первый год идет работа по «интеллектуализации сетей» – Smart Grid (SG). В настоящий момент идеология построения интеллектуальных сетей энергообеспечения SG [1] (термин введен Майклом Барром (Michael T. Burr) в 2003 г. [2]), – одна из наиболее существенных и развиваемых при модернизации глобальной энергетики. В США и Западной Европе реализуется ряд крупных, а также более мелких проектов по переходу электроэнергетики и ЖКХ на «интеллектуальные сети» SG [3]. Принципиально новыми являются подходы, при которых ведущая роль отводится ядру энергосистемы – электрической сети как структуре, обеспечивающей эффективность связи генерации и потребителя.

В то же время пока не существует комплексной концепции формирования структурно-параметрической организации элементов энергосистемы и информационно-интеллектуальных основ повышения эффективности управленческих технологий на основе SG.

Анализ последних исследований и публикаций. Предпосылки интереса мирового сообщества к идее развития концепции SG очевидны: растут показатели потребления ресурсов, повышается стоимость производства электроэнергии, существующие сети поставки энергоресурсов резко реагируют на колебания в экономической сфере.

С ростом требований мирового сообщества используемые модели производства и поставки энергетических ресурсов перестают быть удовлетворительными; например, текущий объем потерь электроэнергии в сетях Украины составляет более 25 % [4]. Эти и другие причины подталкивают правительства и энергогенерирующие предприятия различных стран к скорейшей реализации принципов концепции SG.

В целом к сетям энергоснабжения, развиваемым в рамках концепции SG, можно выдвинуть следующие требования: адаптивность,

эффективность, доступность и возможность обратной связи, надежность, информационная обеспеченность, усложнение и интеграция функций SG [5].

В настоящий момент наиболее остро стоит проблема развития энергосистем как одного из элементов электроэнергетической системы Украины с целью повышения эффективности использования энергоресурсов и снижения цен для потребителей.

Цель исследований – разработка показателей структурно-параметрической организации эффективной активно-адаптивной системы обслуживания энергосистем в условиях идеологии Smart Grid.

Основные материалы исследований. В настоящее время наблюдается эволюция развития энергетических систем – от простейших форм, использующих элементарные сетевые технологии в энергетике, к более сложным формам в рамках концепции SG с элементами сетецентрического характера, которые основываются на интернет-технологиях последнего поколения и реализуют модели энергетической деятельности.

Концепция сетецентричности подразумевает формирование и поддержание в актуальном состоянии единого для всей системы образа реальной ситуации в максимально понятном и простом виде. Используемое информационное поле должно позволять воспринимать весь образ системы как единое целое на данном временном промежутке с учетом отклика системы на текущие изменения ее состояния под воздействием различных факторов.

Успешное решение задач управления в рамках сетецентрического подхода заключается в поддержании этого образа в максимально полном и достоверном состоянии и реализации положений принципа Situational Awareness [6] (комплексное интегрированное восприятие и анализ в интересах единой системы).

Сложившаяся информационная инфраструктура в Украине с ее традиционной, оправданной практикой решения инфо-коммуникационных проблем в

сложных условиях территориального, технического и природно-климатического характера, требует новых подходов с учетом необходимости решения задач по переходу страны на инновационный путь развития. Следует рассмотреть и использовать новые принципы построения активно-адаптивных энергосистем на основе концепции сетецентричности. Среди основных из них – использование всех видов информации, развитие традиционных и новых источников информации на основе адаптивных принципов структурно-параметрической организации элементов энергосистем; повышение качества, безопасности и надежности сбора, обработки, хранения, распределения информации.

Современный этап внедрения технологий SG в энергосистему Украины характеризуется зависимостью процессов формирования «интеллектуальных сетей» от зарубежных технологических решений. Причиной является определенно выраженная недостаточность в сетевом информационно-аналитическом и экспертно-аналитическом обеспечении экономики Украины, а именно:

- технические, организационные и правовые проблемы сбора и обработки экспертной информации, используемой для принятия управленческих решений [7];
- отставание во внедрении современных информационных средств и систем управления стратегического уровня в электроэнергетике [8].

При рассмотрении эксплуатационных особенностей энергосистем часто возникает необходимость проведения ремонтных и регламентных работ. С внедрением положений сетецентризма предлагается использовать концепцию «обслуживания системы на основе отклика» (ОСО). Данная концепция позволяет повысить возможности ремонтных подразделений высоковольтных линий и подстанций по их применению не по распределенным объектам. Внедрение концепции ОСО направлено на обслуживание конкретного объекта (цифровой подстанции, линии электропередачи, подсистемы мониторинга состояния элементов энергосистемы и т.д.), находящегося в конкретном районе и в конкретное время, и который в настоящий момент требует обслуживания в соответствии с откликом системы. В связи с этим появляется возможность в сокращении общей численности привлекаемых подразделений за счет их точечной и более эффективной работы.

Для настоящей сетецентрической системы управления нет препятствий в количестве подразделений, в масштабах действий по восстановлению работоспособного состояния высоковольтных линий и цифровых подстанций. Существуют только препятствия в эффективности работы ремонтных бригад, то есть, в способности выделенным нарядом сил и средств выполнить с достаточной эффективностью в назначенное время восстановление работоспособности составляющего элемента энергосистемы.

Для построения эффективной активно-адаптивной системы обслуживания энергосистем (СОЭ), построенной на принципах сетецентризма, необходимо, чтобы она базировалась на превосходстве систем связи, позволяющих в реальном масштабе времени получать и передавать огромными пакетами информацию различным потребителям, включая и централизованную и распределенную передачу. СОЭ указанного типа управления должна основываться на всесторонней подготовке состава ремонтных бригад, эксплуатирующих данную систему. Такой подход позволит значительно сократить обслуживающий персонал и перераспределить обязанности членов бригады на выполнение свойственных именно их должности задачам.

Одним из основных элементов предлагаемой СОЭ может выступать беспилотный летательный аппарат – БПЛА (квадрокоптер, мультикоптер, гексакоптер и т.д.) [9]. Режим функционирования БПЛА определяется перечнем выполняемых СОЭ задач в рамках основных задач энергосистемы. Среди них – контроль оператором текущих событий на объектах энергосистем, контроль выполнения ремонтных операций при восстановлении высоковольтных линий, контроль выполнения требований по охране труда и работе с высоким напряжением, дистанционное управление подачей напряжения после окончания цикла восстановления работоспособного состояния энергосистемы на соответствующих участках высоковольтных линий и т.д.

Задача синтеза СОЭ в общей постановке сводится к использованию системного подхода. Предлагается для решения указанной задачи применить обобщающий показатель эффективности выбора варианта структуры системы СОЭ, использующий концепцию ОСО.

Общая постановка задачи синтеза имеет следующий вид:

$$W = \max \{OE_v(x) - OE_b(x)\}, \text{ при } x \in X;$$

$$C_{nz} \rightarrow \min,$$

где $OE_v(x)$ – обобщающий эффект при реализации внедряемого варианта СОЭ; $OE_b(x)$ – обобщающий эффект при реализации базового варианта структуры СОЭ; X – область допустимых решений; C_{nz} – непроизводительные затраты.

Этот показатель строится в виде разности обобщающих эффектов: внедряемого варианта структуры системы СОЭ и базового.

Выражение для обобщающего эффекта синтезируемой структуры СОЭ будет иметь вид:

$$OE_v(x) = \left(\sum_{i=1}^n P_i P_{ci} P_{wvi} k_{gi} (RO_{fi} - C_i) \times \right. \\ \left. \times \prod_{j=1}^k \exp(-\{\lambda_{qij} + \lambda_{cij}\} t_{pij}) \right) - C_d, \quad (1)$$

где P_i – априорная вероятность требования на выполнение соответствующей подсистемой i -той задачи; P_{ci} – вероятность того, что не будет срыва

выполнения i -той задачи из-за отсутствия работоспособной подсистемы; P_{wwi} – вероятность того, что не будет срыва выполнения i -той задачи из-за настройки i -той подсистемы неисправным средством; κ_{gi} – коэффициент готовности i -той подсистемы; RO_{fi} – стоимостное выражение результативного фактического отклика при выполнении i -той задачи; C_i – затраты, связанные с реализацией выбранного варианта подсистемы технического обслуживания для i -той подсистемы и измерением параметров этой подсистемы в процессе эксплуатации; λ_{qij} , λ_{cij} – интенсивности явного и скрытого отказов j -го компонента i -той подсистемы; t_{pij} – время, за которое рассматриваются явный и скрытый отказы; C_d – затраты, связанные с функционированием системы СОЭ.

Используя понятие концепции ОСО для системы СОЭ выражения для RO_{fi} и C_i будут иметь вид:

$$\begin{aligned} RO_{fi} &= RO_{bi} + RO_{ci}; \\ C_i &= C_{bi} + C_{ci}, \end{aligned} \quad (2)$$

где RO_{bi} и C_{bi} – стоимостное выражение результативного безусловного фактического отклика и затрат, зависящих от решения i -той задачи соответствующей подсистемой; RO_{ci} и C_{ci} – стоимостное выражение результативного фактического отклика и затрат, обусловленных введением концепции ОСО.

В общем случае для установившегося режима эксплуатации системы СОЭ:

$$\begin{aligned} RO_{bi} &= \sum_{j=1}^m P_{ij} \sum_{k=1}^m P_{ijk} RO_{ijk}; \\ C_{bi} &= \sum_{j=1}^m P_{ij} \sum_{k=1}^m P_{ijk} C_{ijk}, \end{aligned} \quad (3)$$

где P_{ij} – вероятность нахождения i -той подсистемы в каждом из j -х состояний в процессе эксплуатации; RO_{ijk} , C_{ijk} – стоимостное выражение результативного фактического отклика и затрат, получаемых от применения по назначению i -той подсистемы при переходе из состояния j в состояние k ; P_{ijk} – вероятность перехода i -той подсистемы из состояния j в состояние k в процессе решения текущей задачи.

Значения RO_{ci} и C_{ci} описываются выражениями:

$$RO_{ci} = \sum_{j=1}^Z P_{ij} (RO_{cpij}(t_{sij})) P_{ij}(t_{sij}) PO_{cpbij}(t_{sij}); \quad (4)$$

$$C_{ci} = \sum_{j=1}^Z P_{ij} (C_{cpij}(t_{sij})) P_{ij}(t_{sij}) C_{cpbij}(t_{sij}), \quad (5)$$

где $RO_{cpij}(t_{sij})$ и $C_{cpij}(t_{sij})$ – составляющие результативного фактического отклика и затрат j -той компоненты i -той подсистемы для t_{sij} -того времени обслуживания; $RO_{cpbij}(t_{sij})$ и $C_{cpbij}(t_{sij})$ – безусловные составляющие результативного фактического отклика и затрат j -той компоненты i -той подсистемы для t_{sij} -того времени обслуживания.

Значения RO_{ijk} и C_{ijk} будут определяться матрицами значений случайной дискретной

величины в установившемся режиме эксплуатации системы СОЭ:

$$[RO_{ijk}] = \begin{bmatrix} RO_{i11} & RO_{i12} & \dots & RO_{i1k} \\ RO_{i21} & RO_{i22} & \dots & RO_{i2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ RO_{ik1} & RO_{ik2} & \dots & RO_{ikk} \end{bmatrix}, \quad (6)$$

Значения $RO_{cpij}(t_{sij})$ и $C_{cpij}(t_{sij})$ описываются матрицами, аналогично выражениям (6). Значения этих матриц выбирают для соответствующего времени t_{sij} .

В процессе эксплуатации системы СОЭ возникают ситуации, когда j -тая компонента i -той подсистемы может находиться на обслуживании, не учитывая характер концепции ОСО, а зависящим от надежности используемых средств, что обуславливает наличие составляющих $RO_{cpij}(t_{sij})$ и $C_{cpij}(t_{sij})$. Эти составляющие также описываются матрицами типа (6).

Учитывая выражения (2) – (5), и приняв во внимание, что составляющие RO_{ijk} , C_{ijk} , $RO_{cpij}(t_{sij})$, $C_{cpij}(t_{sij})$ описываются выражениями типа (6), получим выражение адаптивного показателя обобщающего эффекта синтеза структуры СОЭ, который модифицирован для концепции ОСО:

$$\begin{aligned} OE_v &= \sum_{i=1}^n P_i \kappa_{gi} \times \prod_{j=1}^N (1 - (\beta_{ij} + (1 - \beta_{ij}) P_{1ij})) \times \\ &\times \left(\frac{1 - P_{2ij}}{P_{1ij}(P_{1ij} + P_{2ij})} \right) \times \left[\sum_{j=1}^L P_{ij} \times \sum_{k=1}^M P_{ijk} (RO_{ijk} - C_{ijk}) + \right. \\ &+ \sum_{j=1}^Z \{ P_{ij} (RO_{cpij}(t_{sij})) P_{ij}(t_{sij}) RO_{cpbij}(t_{sij}) - \\ &- P_{ij} (C_{cpij}(t_{sij})) P_{ij}(t_{sij}) C_{cpbij}(t_{sij}) \}] \times \\ &\times \prod_{j=1}^V \exp(-(\lambda_{qij} + \lambda_{cij}) t_{pij}) - (P_u (C_u + (K_p + E) K + C_m)), \end{aligned} \quad (7)$$

где β_{ij} – вероятность скрытого отказа j -той компоненты i -той подсистемы; P_{1ij} – вероятность нахождения j -той компоненты i -той подсистемы в исправном и работоспособном состоянии; P_{2ij} – вероятность нахождения j -той компоненты i -той подсистемы в состоянии применения со скрытым отказом; P_u – вероятность принятия в эксплуатацию системы СОЭ; C_u – текущие годовые издержки на эксплуатацию системы СОЭ; K_p – норма реновации (обновления) компонент системы СОЭ; K – нормативный коэффициент экономической эффективности; E – единовременные затраты при вводе в эксплуатацию системы СОЭ; $P_{ij}(t_{sij})$ – вероятность обслуживания i -той подсистемы продолжительностью t_{sij} по причине ложного или скрытого отказов; C_m – фонд заработной платы обслуживающего персонала.

Выводы. В условиях применения «Smart Grid – возможностей» для повышения интеллектуализации электроэнергетической системы Украины с активно-адаптивной сетью электроснабжения возникает необходимость внедрения принципа сетцентризма в

структурно-параметрическую организацию элементов энергосистем. Эта оптимизация элементов энергосистем в условиях сетцентризма и концепции SG влечет за собой использование положений теории систем и понятий многокритериального оптимизационного синтеза. Предлагаемая модификация адаптивного показателя обобщающего эффекта синтеза структуры СОЭ, которая учитывает концепцию ОСО, при наличии ложных и истинных отказов, позволит уточнить процедуру отбора конкурентоспособных вариантов с целью определения множества допустимых структур, отвечающих требованиям целевой функции синтеза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. SMART GRID [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm>.
2. Michael T. Burr. Technology corridor: Reliability demands will drive automation // *Fortnightly Magazine*. – November 1 2003. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor?page=0%2C0>.
3. Дорофеев В.В. Интеллектуальная сеть. Новые принципы построения. Оборудование и системы управления интеллектуальной сети // Доклад на заседании круглого стола по теме «Умные сети – Умная энергетика – Умная экономика». – СПб. 17.06.2010. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.fsk-ees.ru/media/File/press_centre/speeches/Presentation_dorofeev.pdf.
4. Быкова О., Абязов П. Куда движется электроэнергетика? [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://www.bigpowernews.ru/research/document47671>.
5. 10 трендов рынка SMART Grid в 2012 году. [Электронный ресурс] / Режим доступа: http://www.cleandex.ru/articles/2012/08/23/10_trendov_rynka_smart_grid_v_ssha.
6. Mica R. Endsley, Daniel J. Garland. *Situation Awareness Analysis and Measurement*. – Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ, 2000. – 383 p. ISBN 08058-2134-1.
7. Сетевая экспертиза. 2-е изд. / Под ред. Д.А. Новикова, А.Н. Райкова. – М.: Эгвес, 2011. – 166 с.
8. Косянчук Т.Ф. Діагностика конкурентного потенціалу підприємства // Наукові записки. Серія «Економіка». – 2013. – Випуск 23. – С. 51-54.
9. Электронный ресурс / Режим доступа: http://quadrocopter.ua/quadrocopters_copters/

REFERENCES

1. SMART GRID. Available at: <http://www.oe.energy.gov/smartgrid.htm> (Accessed 12 May 2014).
2. Michael T. Burr. Technology corridor: Reliability demands will drive automation. *Fortnightly Magazine*, 2003, November 1. Available at: <http://www.fortnightly.com/fortnightly/2003/11/technology-corridor?page=0%2C0> (Accessed 15 June 2004).
3. Dorofeyev V.V. Intellectual network. New principles of construction. The equipment and control systems of an intellectual network. *Report at a meeting of a round table on the subject «Clever Networks – Clever Power – Clever Economy»*, Saint Petersburg, 2010. Available at: http://www.fsk-ees.ru/media/File/press_centre/speeches/Presentation_dorofeev.pdf. (Rus).
4. Bykova O., Abyazov P. *Where the power industry moves?* Available at: <http://www.bigpowernews.ru/research/document47671> (Accessed 24 November 2015). (Rus).
5. *10 trends of the SMART Grid market in 2012*. Available at:

- http://www.cleandex.ru/articles/2012/08/23/10_trendov_rynka_smart_grid_v_ssha (Accessed 02 April 2013). (Rus).
6. Mica R. Endsley, Daniel J. Garland. *Situation Awareness Analysis and Measurement*. Lawrence Erlbaum Associates, Inc., Mahwah, NJ, 2000. 383 p. ISBN 08058-2134-1.
 7. *Network examination. 2nd prod.* Edited by D.A. Novikov, A.N. Raykov. Moscow, Egves Publ., 2011. 166 p. (Rus).
 8. Kosyanchuk T.F. Diagnosis of the competitive potential of the company. *Scientific notes. Series «Economy»*, 2013, no.23, pp. 51-54. (Ukr).
 9. Available at: http://quadrocopter.ua/quadrocopters_copters/ (Accessed 11 July 2015).

Поступила (received) 05.02.2016

Сокол Евгений Иванович¹, д.т.н., проф.,

Гриб Олег Герасимович¹, д.т.н., проф.,

Швец Сергей Викторович², к.т.н., доц.,

¹Национальный технический университет

«Харьковский политехнический институт»,

61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,

²Харьковский национальный университет

городского хозяйства им. А.Н. Бекетова,

61002, Харьков, ул. Маршала Бажанова, 17,

тел/phone +38 067 7680838, e-mail: se_sx@bk.ru

Y.I. Sokol¹, O.G. Gryb¹, S.V. Shvets²

¹National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute»,

21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

²O.M. Beketov National University of Urban Economy

in Kharkiv,

17, Marshal Bazhanov Str., Kharkiv, 61002, Ukraine.

The structural and parametrical organization of elements

of a power supply system in the conditions of network centrism.

Purpose. Development of indicators of the structural and parametrical organization of effective active and adaptive system of service of power supply systems in the conditions of ideology of Smart Grid. **Methodology.** In the conditions of application of ideology of Smart Grid for increase of intellectualization of electrical power system there is a need of introduction of the principle of a network centrism in the structural and parametrical organization of elements of power supply systems that involves performance of conditions on implementation of provisions of the principle of Situational Awareness. The essence of this principle consists in that, information on a condition of system has to be presented in the form convenient for the analysis, recognition, transfer, distribution and storage, to be coordinated for flexible and optimum development at the subsystem and object-by-object levels. **Results.** Structural and parametrical optimization of elements of power supply systems in the conditions of a network centrism and the concept of SG involves use of provisions of the theory of systems and concepts of multicriteria optimizing synthesis. It is offered to use the modified adaptive indicator of the generalizing effect of synthesis of structure of active and adaptive system of service of power supply systems in the form of a difference of the generalizing effects: the introduced option of structure of system and basic. **Originality.** Introduction of an adaptive indicator of synthesis of system of service of power supply systems considers the concept of «service of system on the basis of a response» in the presence of false and true refusals. **Practical value.** Use of the specified indicator will allow to specify procedure of selection of competitive options for the purpose of definition of a set of admissible structures which meet the requirements of criterion function. References 9. **Key words:** Smart Grid, network-centric control system, active and adaptive system of service of power supply systems, productive actual response.