

## ФОРМИРОВАНИЕ ОБСЛУЖИВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПО КРИТЕРИЮ ТОЧНОСТИ

Сокол Е. И.<sup>1</sup>, Гриб О. Г.<sup>1</sup>, Швец С. В.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт",

<sup>2</sup>Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А. Н. Бекетова

*Для сокращения объема вычислений и оперативности принятия решений предложены правила отсева вариантов сетевых систем оперативного обслуживания энергосистемы по критерию точности.*

**Постановка проблемы.** Глобализационные аспекты развития электроэнергетики Украины в условиях интеграции топливно-энергетического комплекса нашей страны в мировую экономику, а также расширение торговли электроэнергией, произведенной разными типами электростанций, оказание атомно-строительных услуг и других операций на международных энергетических рынках, требуют трансформации электроэнергетической системы в соответствии с общемировыми тенденциями расширения сфер извлечения прибыли и наращивания добавленной стоимости [1,2]. Основа этих технологий – концепция "интеллектуальной энергетики" Smart Grid и сетевое управление [3-5].

Технологической базой для этой глобализационной трансформации является инфраструктура производства и сбыта атомно-энергетических ресурсов, ядро которой составляет энергосистема. Развитие энергосистемы должно опираться на соответствующие изменения организационной структуры, бизнес-моделей и иных аспектов управления в НЭК "Укрэнерго"[6].

Современная модернизация ключевых составляющих энергосистемы должна обеспечивать их надежную и экономичную работу и требует эффективного решения целого комплекса оптимизационных задач структурного и управленческого синтеза, неразрывно связанного со стратегией обслуживания энергосистемы в целом.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Существует несколько подходов к построению сетевых систем управления в энергетике. Суть первого подхода заключается в том, что сетевая система должна обладать тремя взаимосвязанными типовыми подсистемами [7]:

- информационной подсистемы, содержащей активные и пассивные технические средства, обеспечивающие сбор достоверной информации о текущем состоянии энергосистемы и окружающей среды;
- подсистемы активных технических средств, обеспечивающих реализацию команд от информационной подсистемы;
- подсистемы информационно-управляющих средств, реализующих анализ и управление первыми двумя подсистемами.

Такая организация реализует распределенную систему с удаленным центром управления.

Одна из основных проблем математического и алгоритмического описания сетевых систем в том, что динамика показателей моделируется в непре-

рывном времени, а динамика действий – в дискретном. Другой особенностью рассматриваемых систем является то, что они характеризуются большим количеством компонентов и причинно-следственных связей [8]. Внешняя среда в реальных задачах обычно характеризуется как стохастическая.

Отметим, что сетевые технологии – это не только информатизация процесса, но и возможность прогноза ситуации, а также принятия опережающих действий.

Второй подход для реализации сетевых систем управления в электроэнергетике – создание информационных систем на базе мультиагентных технологий [8].

Наиболее перспективным направлением оптимизации энергосистем принят комплексный подход, сочетающий в себе свойства мультиагентных технологий и распределенных систем на основе концепции "интеллектуальной энергетики" в условиях сетевого взаимодействия.

Таким образом, необходимо специальное теоретико-методологическое исследование проблем формирования и реализации модели превращения энергосистемы в универсального энергооператора на основе управления сетевым характером.

**Цель статьи.** Разработка правил отсева вариантов структуры системы оперативного обслуживания энергосистемы по критерию точности.

**Основные материалы исследований.** В последнее десятилетие в передовых странах мира развиваются технологии "интеллектуальных сетей", которые рассматриваются как основа модернизации и инновационного развития электроэнергетики.

Новейшие технологии, применяемые в энергосистемах, основанные на адаптации характеристик оборудования в зависимости от режимной ситуации, активное взаимодействие с генерацией и потребителями позволяют создавать эффективно функционирующую систему, в которую встраиваются современные информационно-диагностические системы, системы автоматизации управления всеми элементами, включенными в процессы производства, передачи, распределения и потребления электроэнергии [9].

Энергосистема из пассивного устройства передачи и распределения электроэнергии превращается в активный элемент, параметры и характеристики которой изменяются в зависимости от требований режимов работы в реальном времени. Сети оснащаются современными системами автоматизации управления нормальными и аварийными режимами работы, используются мощные компьютерные средства для

управления и оценки состояния режимов работы [10].

Для реализации этой новой функции энергосистема оснащается цифровыми системами оперативно-го обслуживания, ориентированными на внедрение сетевидного принципа управления [6]. Подобная организация управления обеспечивает получение информации в режиме on-line о режимах работы энергосистемы и состоянии оборудования.

Смысл сетевидного принципа состоит в том, что главным элементом всей энергосистемы является "обмен информацией" с максимальным расширением форм производства этой информации, доступа к ней, ее распределения, обратной связи. Энергосистема, в широком понимании, представляет собой новое информационное пространство, в котором разворачиваются основные стратегические процессы, а также их техническое и экономическое обеспечение.

Для достижения целей энергоэффективности, снижения потерь, помимо применения современного экономичного оборудования и технологий используются и специфические средства визуального контроля и обеспечения безопасной эксплуатации энергосистем, такие как беспилотный летательный аппарат (БПЛА) [6].

Основное предназначение БПЛА – тепловизионное обследование электрооборудования цифровых подстанций и элементов линий электропередачи для выявления дефектов контактных соединений, оборудования, перегрузки кабелей и автоматических выключателей, коррозии изоляции и других дефектов, возникающих вследствие перегрева электрического оборудования и узлов. Тепловизионное обследование позволяет выявить наличие дефектов и зафиксировать его точное месторасположение на термограмме.

Тепловизионный метод диагностики имеет ряд неоспоримых достоинств и преимуществ по сравнению с традиционными методами диагностики электрооборудования:

- это метод бесконтактного, неразрушающего контроля, обследование проводится под рабочей нагрузкой и не требует отключения оборудования, которое ведет к серьезным финансовым потерям (неинвазивный метод);

- дистанционность метода позволяет не только контролировать труднодоступные дефекты (например, контроль оборудования находящегося на высоте) без предварительной подготовки электрооборудования, но и является гарантом безопасности при проведении обследования;

- с помощью тепловизионного обследования выявляются не только застарелые и предаварийные дефекты, но и дефекты, только зарождающиеся или находящиеся на самых ранних стадиях развития, а также, дефекты которые невозможно определить никаким иным методом;

- оперативность (отображение результатов в реальном времени), достоверность, объективность, точность получаемых сведений, безопасность (при проведении обследования оборудования не оказывает воздействия).

Дефекты контактных соединений электрооборудования приводят к перегреву, преждевременному износу, а также увеличивают риск возникновения

аварии.

Тепловизионное обследование позволяет выявить следующие виды дефектов:

- дефекты контактных соединений электрооборудования;
- перегрузка электрооборудования по сравнению с допустимыми значениями;
- дефекты изоляции;
- дефекты оборудования, возникающие при перегреве оборудования.

Экономический эффект от проведения тепловизионного обследования не оспорим, так как:

- своевременное обследование позволяет выявить дефекты электрооборудования на ранних стадиях и предотвратить аварийные ситуации, которые влекут за собой существенные финансовые, трудовые и материальные затраты, на проведение ремонта и восстановления работоспособности оборудования, что позволяет говорить о быстрой окупаемости метода;

- наличие БПЛА позволяет иметь эффективную систему оперативного контроля энергосистемы без затрат на дополнительное оборудование, т. е. исключает его избыточность.

Эффективное применение системы оперативного обслуживания энергосистемы (СОЭ), построенной на принципах сетевидности [6], зависит от точности выполняемых диагностических операций как с помощью БПЛА, так и с помощью цифровых средств СОЭ.

По результатам диагностических измерений изменяется конфигурация энергосистемы и ее режимы, часть оборудования выводится в планово-профилактический ремонт, происходит ликвидация последствий аварийных режимов. В этом случае можно говорить о разных вариантах построения энергосистемы и ее СОЭ.

Эффективная эксплуатация энергосистемы должна основываться на решении задач оптимизации, связанных с оценкой и перебором вариантов построения энергосистемы и ее СОЭ. Среди критериев отсева вариантов структуры СОЭ предлагается использовать точностной критерий.

Обозначим через  $p_{il(\zeta_l)} = \{p_q^0 \pm \Delta p_q \quad \forall q \in J_{il(\zeta_l)}\}$  вектор параметров размерности  $q_{il(\zeta_l)}$ , соответствующий элементам технической реализации множества  $J_{il(\zeta_l)}$  для закона управления  $u_{il(\zeta_l)}$ . Решение системы дифференциальных уравнений для  $l$ -й подсистемы  $i$ -го уровня запишем в виде:

$$y_{il}^j(t, v_j^i) = F_{il(\zeta_l)}^j(u_{il(\zeta_l)}(t), p_{il(\zeta_l)}, y_{il(0)}^j), \quad (1)$$

$$(k \in K_{il}, \quad q \in I_{i-k}^l),$$

где через  $v_j^i$  обозначена часть варианта  $v_j \in V$ , от которого зависит значение выходной переменной  $l$ -й подсистемы  $i$ -го уровня;

$y_{il(0)}^{j\alpha} = y_{i-k,q}^{l\alpha}(t_i) (k \in K_{il})$  – начальные условия для дифференциальных уравнений, являющиеся значениями выходных переменных подсистемы  $i-k$ -х уровней  $\forall k \in K_{il}$ , связанных с  $l$ -й подсистемой  $i$ -го

уровня  $(\alpha = 1, \dots, \alpha_{il}^j)$ ;

$F_{il(\zeta_i)}^j$  – векторная функция, компоненты которой есть непрерывные функции своих аргументов.

Предположим также, что компоненты векторной функции  $F_{il(\zeta_i)}^j$  имеют отличные от нуля первые производные в некоторой окрестности точки  $(y_{i-k}^l(t_i), P_{il(\zeta_i)(0)})$ , определяемой номинальными значениями параметров и начальных условий. Необходимо из множества возможных вариантов создания сложной системы СОЭ  $v_j \in V$ , которые характеризуются как видами законов управления в каждой из подсистем, так и погрешностями элементов технической реализации, отобрать такие, которые удовлетворяют критерию:

$$\Delta y_{nh}^{h\alpha}(v_i) \leq \varepsilon_{nh}^{h\alpha}, \quad (h \in I_n, \alpha = 1, \dots, \alpha_{nh}^h), \quad (2)$$

где  $\varepsilon_{nh}^{h\alpha}$  – неотрицательная величина, характеризующая степень близости  $\alpha$ -й выходной координаты  $h$ -й подсистемы  $n$ -го уровня СОЭ и ее программного значения;

$\Delta y_{nh}^{h\alpha}(v_i)$  – точностная характеристика выходной переменной подсистемы  $n$ -го уровня СОЭ.

Непосредственное построение всех вариантов множества  $V$  с оценкой их по точностному критерию (2) приводит к необходимости интегрировать систему дифференциальных уравнений для всех подсистем. Это связано с большим объемом вычислений, что не позволяет выбрать приемлемый вариант СОЭ в заданные сроки. В связи с этим возникает необходимость разработки правил отсева как видов законов управления, так и элементов их технической реализации, которые заведомо не смогут входить в приемлемый вариант СОЭ.

Выражение (2) описывает совокупность общих требований на всю систему в целом. В связи с этим необходимо провести декомпозицию этих требований относительно каждой из подсистем и привести их к виду:

$$\Delta y_{il}^{j\alpha} = \left| y_{il}^{j\alpha}(v_j^i) \Big|_{t_{i+1}} - y_{il(0)}^{j\alpha}(t+1) \right| \leq \varepsilon_{il}^{j\alpha}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_{il}^{j\alpha}$  – степень близости  $\alpha$ -й компоненты выходной переменной  $l$ -й подсистемы  $i$ -го уровня;

$y_{il}^{j\alpha}(v_j^i) \Big|_{t_{i+1}}$  – определяется из уравнений, описывающих поведение  $l$ -й подсистемы  $i$ -го уровня.

Для выполнения такой декомпозиции получены соотношения, связывающие точность функционирования отдельной подсистемы СОЭ с вариациями параметров различных законов управления, а также с точностными характеристиками подсистем нижних уровней, влияющих на эту подсистему. Эта связь определяется принадлежностью допустимых отклоне-

ний вектора параметров и начальных условий от номинальных значений области

$$D_{il(\zeta_i)} = \bigcap_{\alpha=1}^{\alpha_{il}^j} D_{il(\zeta_i)}^{\alpha}, \quad (4)$$

где  $D_{il(\zeta_i)}^{\alpha}$  – выпуклая область полупространства отклонений вектора параметров  $\Delta p_{il(\zeta_i)}^q$  и  $\Delta y_{i-k,q}^p$  начальных условий, образованная пересечением двух полупространств, нормированных с использованием функций чувствительности выходных переменных по параметрам и начальным условиям в номинальных точках.

При построении алгоритма предварительного отсева вариантов проектируемой СОЭ необходимо учитывать следующие утверждения (приводятся без доказательства).

Первое. Если закон управления  $u_{i-k,q(\zeta_i)}$   $q$ -й подсистемы  $i-k$ -го уровня при номинальных значениях параметров приводит к таким вариациям выходных переменных  $\Delta y_{i-k(\zeta_i)}^l$ , которые не принадлежат области  $D_{il}^{(0)} = \bigcup_{\zeta_i=1}^{\xi_{il}} D_{il(\zeta_i)}$  при минимальных вариациях параметров законов управления  $u_{il(\zeta_i)} \in U_{il}$ , т.е.

$$\Delta y_{i-k(\zeta_i)}^l \notin D_{il}^{(0)} = \bigcup_{\zeta_i=1}^{\xi_{il}} D_{il(\zeta_i)} \Big|_{\Delta p_{il(\zeta_i)}^{\min}}, \quad (5)$$

то он не будет образовывать вариантов системы СОЭ с законами управления из множества  $U_{il}$ , удовлетворяющими неравенству (2). Отсев вариантов подсистем  $i-k$ -го уровня  $\forall k \in K_{il}$  при проверке условия (5) позволяет получить максимальное число принципиально возможных вариантов их создания за счет сужения множества вариантов технической реализации  $l$ -й подсистемы  $i$ -го уровня СОЭ.

Второе. Если вектор погрешностей параметров  $\Delta p(v_{il(\zeta,\mu)}) = \{\Delta p_{il(\zeta)}\}$  ( $q \in J_{il(\zeta)}$ ) какого-либо варианта технической реализации  $v_{il(\zeta,\mu)}$ , соответствующий закону управления  $u_{il(\zeta)}$  в  $l$ -й подсистеме, не принадлежит области  $D_{il(\zeta)}^{\min}$  при вариациях начальных условий

$$\Delta y_{il}^{j\lambda(m)} = \Delta y_{i-k,q}^{l\alpha(m)} = \min_{\zeta} \{\Delta y_{i-k,q}^{l\alpha}\} \\ (k \in K_{il}, q \in I_{i-k}, \alpha = 1, \dots, \alpha_{il}^j),$$

$$\text{т.е. } \Delta p(v_{il(\zeta,\mu)}) \notin D_{il(\zeta)}^{\min} = D_{il(\zeta)} \Big|_{\Delta y_{il}^{j\lambda} = \Delta y_{il}^{j\lambda(m)}}, \quad (6)$$

то ни с каким законом управления  $u_{i-k,q(\zeta)} \in U_{i-k,q}$  ( $\zeta = 1, \dots, \xi_{i-k,q}$ ) он не будет образовывать вариант системы, удовлетворяющий ограничениям (3).

Отсев вариантов технической реализации подсистемы  $i$ -го уровня при проверке условия (6) позволяет получить максимально возможное число вариантов их построения за счет сужения множества вариантов подсистемы  $i-k$ -го уровня  $\forall k \in K_{il}$ .

Третье. Для любых  $\Delta y_{i-k,q}^l \in D_{il}^{(0)}$ , ( $k \in K_{il}, q \in I_{i-k}^l$ ) области допустимых вариаций параметров  $D_{il}^{\min}(\zeta_i = 1, \dots, \xi_{il})$  определяют все варианты технической реализации СОЭ законов управления из  $U_{il}$ , обеспечивающие выполнение (3).

Через  $D_{il}^{(0)}$  и  $D_{il}^{\min}(\zeta_i)$  обозначены области допустимых вариаций начальных условий и параметров, получаемые из  $D_{il}$  соответственно при нулевых вариациях параметров  $\Delta p_{il}^q(\zeta_i)$  и минимальных вариациях начальных условий  $\Delta y_{i-k,q}^{l(m)}$  ( $k \in K_{il}, q \in I_{i-k}^l$ ).

**Выводы.** С применением в энергосистемах технологий "интеллектуальных сетей" и оснащением современными системами автоматизации управления нормальными и аварийными режимами работы, они ориентированы на внедрение сетецентрической концепции управления. Применение цифровых средств контроля подсистем энергосистемы в совокупности с БПЛА позволяет эффективно устранять аварийные ситуации и дефекты электрооборудования, а также осуществлять постоянный информационный обмен между взаимосвязанными элементами единой системы. По результатам диагностических измерений изменяется конфигурация энергосистемы, позволяет говорить о разных вариантах построения энергосистемы и ее СОЭ. Среди критериев отсева вариантов структуры СОЭ предлагается использовать метод последовательного анализа вариантов и оценки сложной системы по критерию точности. Суть метода сводится к последовательному построению выпуклых областей допустимых вариаций параметров и начальных условий каждой из подсистем, описываемые системой линейных неравенств, а затем к этим неравенствам применяются процедуры отсева в виде правил.

#### Список использованных источников

1. Петров Д. В. Мирохозяйственная адаптация организационных механизмов инвестиционного стимулирования модернизационных программ // Экономика. Право. Печать: Вестник КСЭИ. 2014. № 1 (61). – С. 226-231.
2. Апканеев А. В., Логинов Е. Л. Стратегические направления совершенствования системы управления предприятиями атомной отрасли // Вестник экономической интеграции. 2010. № 7. – С. 47-52.
3. Логинов Е. Л., Деркач Н. Л., Логинов А. Е. "Интеллектуальные сети" (smart grid) в электроэнергетике: проблемы управления и безопасности // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2011. № 20. – С. 49-55.
4. Байтов А. В. Сетецентрическое управление энергоинфраструктурными узлами с ключевым положением АЭС в глобальной энергетике //

Национальные интересы: приоритеты и безопасность, 2013, №30. – С. 2-10.

5. Массель Л. В., Иванов Р. А., Массель А. Г. Моделирование этапов принятия решений на основе сетецентрического подхода / Вестник ИрГТУ. – №10 (81). – 2013. – С. 16-22.

6. Сокол Е. И., Гриб О. Г., Швець С. В. Структурно-параметрическая организация элементов энергосистемы в условиях сетецентризма // Электротехника і електромеханіка. – 2016. – №2. – С. 61-64. doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.11

7. Шабунин, А. Б. и др. Сетецентрический подход к разработке системы управления производственными процессами // Труды международной научно-практической конференции "Управление большими системами-2011" (УБС'2011). Т.3. – М.: ИПУ РАН, 2011. – С. 222-225.

8. Иващенко А. В. и др. Мультиагентные технологии для разработки сетецентрических систем управления // Известия Южного федерального университета. Технические науки. Выпуск № 3. Т. 116. – 2011. – С. 11-22.

9. Швець С. В. Застосування стратегії "кінцевого ефекту" в задачах оптимізації технічних систем/ Науково-технічний журнал "Енергетика та комп'ютерно-інтегровані технології в АПК". – № 1(3). – Харків: Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка, 2015. – С. 18-19.

10. Швець С. В. Адаптаційні аспекти синтезу оперативно-диспетчерської служби/ Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. Технічні науки. Випуск 164 "Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України". – Харків: ХНТУСГ, 2015. – С. 23-24.

#### Анотація

### ФОРМУВАННЯ ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕНЕРГОСИСТЕМИ ЗА КРИТЕРІЄМ ТОЧНОСТІ

Сокол Є. І., Гриб О. Г., Швець С. В.

*Для скорочення обсягу обчислень та оперативності прийняття рішень запропоновано правила відсіву варіантів сетецентричної системи оперативного обслуговування енергосистеми за критерієм точності.*

#### Abstract

### THE FORMATION OF THE MAINTENANCE OF THE POWER SYSTEM BY THE CRITERION OF ACCURACY

Ye. Sokol, O. Gryb, S. Shvets

*To reduce the amount of calculation and timeliness of decision-making proposed rules for dropout variants of network-centric system operational services of the power system by the criterion of accuracy.*