

УДК 621.313.322

**В. В. Кулик, к. т. н., доц.; Т. Е. Магас, к. т. н., доц.; Ю. В. Малогулко**  
**ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ РАССРЕДОТОЧЕННЫМИ**  
**ИСТОЧНИКАМИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ С АСИНХРОННЫМИ**  
**ГЕНЕРАТОРАМИ СРЕДСТВАМИ SMART GRID**

*В статье, согласно концепции Smart Grid, рассматриваются отдельные вопросы формирования интеллектуальных электрических сетей, решение которых позволит создать предпосылки для эффективного использования рассредоточенных источников электроэнергии.*

**Ключевые слова:** *рассредоточенные источники электроэнергии, ветроэлектростанции, Smart Grid, асинхронные генераторы.*

### Введение

Современные мировые тенденции децентрализации электроснабжения потребителей, связанные с увеличением стоимости традиционных топливных ресурсов, проявляются в повышении доли рассредоточенного производства электроэнергии благодаря рассредоточенным источникам (РДЭ) и приводят к усложнению планирования режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) и оперативного управления ими. Кроме того, сочетание указанных выше процессов с реформированием экономики энергетики – внедрением системы двусторонних договоров – фактически делает невозможным организацию эффективного функционирования ЭЭС без совершенствования их информационной инфраструктуры с постепенным переходом к концепции интеллектуальных электрических сетей Smart Grid [1].

Современные реализации элементов Smart Grid в разных странах [2, 3] позволяют утверждать, что технологически такие системы создают предпосылки для высокоэффективного использования РДЭ для решения как локальных (обеспечение максимальной прибыли от их эксплуатации), так и общесистемных (повышение качества функционирования распределительных электрических сетей) задач. Согласно концепции Smart Grid [2] всех участников и организаторов процесса энергообмена в ЭЭС можно распределить между сферами деятельности, или так называемыми доменами (рис. 1).

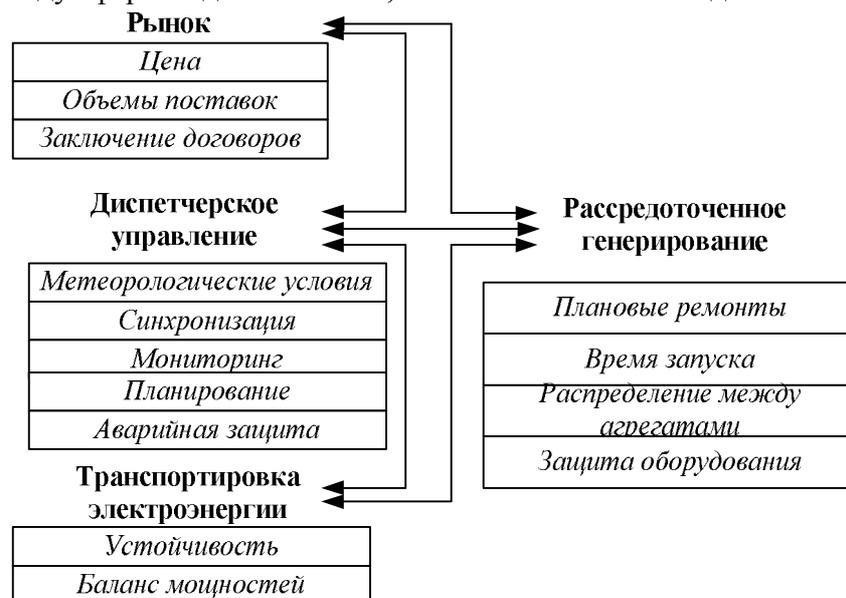


Рис. 1. Основные функции отдельных доменов Smart Grid, связанных с генерированием электроэнергии за счет рассредоточенных источников

Основные функции доменов, связанных с работой возобновляемых источников электроэнергии в распределительных сетях, показаны на рис. 1. Домен «Распределенное генерирование» объединяет электрические станции, в том числе РДЭ различных типов, выдающие электроэнергию в распределительные сети. Его основной задачей является повышение эффективности производства электроэнергии этими источниками. Особые сложности возникают на пути оптимизации функционирования ветровых (ВЭС) и солнечных электростанций (СЭС), поскольку их режимы определяются стохастическим воздействием окружающей среды, и при этом практически невозможно запастись первичную энергию (как, например, в случае малых ГЭС). Описанный домен связан информационными потоками с доменами управления, организации функционирования рынка электроэнергии, а также доменом транспортировки электроэнергии. Информационная связь с последним является наиболее важной, поскольку транспортный домен функционально выполняет, совместно с другими доменами, сбор и обработку информации, защиту оборудования, оптимизацию функционирования и прочее.

Информационные связи позволяют на уровне диспетчерского управления учитывать эксплуатационные особенности различных электрических станций, использующих возобновляемые источники энергии, особенно ВЭС и СЭС, процесс производства электроэнергии на которых имеет ряд особенностей технического и организационного характера. Информационные связи с доменом «Рынок» позволяют согласовывать задачи оперативной оптимизации режимов ЭЭС с заявленными объемами поставок электроэнергии по условиям двусторонних договоров, конъюнктурой рынка электроэнергии, корректированием цен на поставку электроэнергии и другие системные услуги.

### Оптимальное управление распределенными источниками энергии

Оптимизация функционирования РДЭ осуществляется за счет реализации плановой последовательности управляющих воздействий, полученных путем решения соответствующих оптимизационных задач с интегральным критерием качества на определенном временном отрезке. Типичная задача обеспечения эффективного использования распределенных источников, которая заключается в получении максимальной прибыли от реализации произведенной электроэнергии [4], может быть представлена так. Задана совокупность из  $n$  управляемых РДЭ, например, малых ГЭС, и  $m$  условно управляемых ВЭС и СЭС, математическое ожидание суммарной активной мощности которых составляет:

$$M_{VAR}(t) = M_{BEV}\{P(t)\} + M_{СЕС}\{P(t)\}. \quad (1)$$

В качестве переменных управления приняты мощности МГЭС, поскольку они являются наиболее стабильными и не подвержены воздействию окружающей среды. Потери от перетоков мощности условно управляемых РДЭ и МГЭС в распределительной сети являются функциями от мощностей генерирования и должны учитываться в целевой функции. Состав включенного оборудования МГЭС в течение суток и его энергетические характеристики являются постоянными. Необходимо найти такие режимы МГЭС  $P_i(t)$  на интервале времени  $[t_0; t_k]$ , которые бы обеспечили максимальную прибыль от реализации электроэнергии РДЭ на энергорынке:

$$\int_{t_0}^{t_k} \psi(t) \left[ \sum_{i=1}^n P_i(t) + M_{VAR}(t) - k_{\psi}(t) \cdot \Delta P_{PDE}(t) \right] dt \rightarrow \max, \quad (2)$$

где  $k_{\psi}(t)$  – весовой коэффициент, который определяется соотношением отпускного тарифа для РДЭ  $\psi(t)$  и стоимости потерь мощности для данной распределительной сети  $\psi_0$ ;  $\Delta P_{PDE}(t)$  – составляющая потерь мощности в распределительных электрических сетях, обусловленная функционированием РДЭ;  $P_i(t)$  – активные мощности генерации малых ГЭС.

$$\varphi(t) = \sum_{i=1}^n P_i(t) + \Delta P_{\text{ЦЕ}}(t) - P_{\text{н}\Sigma}(t) - \Delta P_{\Sigma}(t),$$

где  $\Delta P_{\text{ЦЕ}}(t)$  – мощность за счет централизованного электрического снабжения;  $P_{\text{н}\Sigma}(t)$  – суммарная нагрузка заданной совокупности потребителей;  $\Delta P_{\Sigma}(t)$  – суммарные потери мощности в электрических сетях.

Решение задачи подробно рассмотрено в [4]. Как решение, используя принцип максимума интегральных функций Понтрягина, получено условие оптимальности функционирования РДЭ в виде соотношений:

$$z_{\text{EP}}^*(t) = \frac{\lambda_1 q_1^*(t) + q_1^{\text{III}}}{1 - \sigma_1^*(t)} = \frac{\lambda_2 q_2^*(t) + q_2^{\text{III}}}{1 - \sigma_2^*(t)} = \dots = \frac{\lambda_n q_n^*(t) + q_n^{\text{III}}}{1 - \sigma_n^*(t)}, \quad (3)$$

где  $z_{\text{EP}}^* = z_{\text{EP}} + z'_{\text{EP}}$ ,  $q_i^* = q_i + q'_i$ , а  $\sigma_i^* = \sigma_i + \sigma'_i$  при условии, что

$$\begin{cases} z_{\text{EP}} = -\psi(t); \quad z'_{\text{EP}} = \frac{d\psi(t)}{dt}, \\ q_i = \frac{\partial Q_i}{\partial P_i}; \quad q'_i = -\frac{d}{dt} \frac{\partial Q_i}{\partial P_i}; \quad q_i^{\text{III}} = \frac{\partial \Pi_i^P}{\partial P_i} + \frac{\partial \Pi_i^H}{\partial P_i}; \quad \sigma_i = k_{\text{ц}} \frac{\partial \Delta P_{\text{РДЕ}}}{\partial P_i}; \quad \sigma'_i = -k_{\text{ц}} \frac{d}{dt} \frac{\partial \Delta P_{\text{РДЕ}}}{\partial P_i}, \end{cases} \quad (4)$$

где  $Q_i$  – текущие расходы воды на  $i$ -той малой ГЭС;  $\Pi_i^P$ ,  $\Pi_i^H$  – штрафные функции, которые вводятся в целевую функцию для учета ограничений типа неравенств, соответственно по мощности  $i$ -го РДЭ ( $P_i^{\text{min}} \leq P_i(t) \leq P_i^{\text{max}}$ ) и по напору между бьефами ( $H_i^{\text{min}} \leq H_i(t) \leq H_i^{\text{max}}$ ) в случае, если  $i$ -ым РДЭ является малая гидроэлектростанция.

Учитывая стохастический характер внешних воздействий окружающей среды, а также то, что параметры генерирования отдельных рассредоточенных источников, в частности ВЭС и СЭС, представлены в (1) и (2) математическими ожиданиями, определение последних требует текущих и прогнозных (до четырех суток) метеорологических параметров. Значения последних обеспечиваются совместно доменами «Транспортировка электроэнергии» и «Диспетчерское управление». Кроме того, результаты прогнозирования метеопараметров используют для оценки перспективного электропотребления, что необходимо для учета ограничений по балансу электроэнергии, а также определения составляющей потерь и ее чувствительности к изменению  $P_i$  в (3) и (4). Исходя из этого, концепция Smart Grid предусматривает разработку обобщенного механизма прогнозирования погодных условий для планирования потребления и предельных объемов производства электроэнергии.

### Оценивания потерь мощности, обусловленных функционированием РДЭ

Децентрализация электроснабжения с заключением двусторонних договоров между представителями владельцев РДЭ и потребителями электроэнергии (или государственным предприятием «Энергорынок») накладывает ограничения на функционирование доменов «Диспетчерское управление» и «Транспортировка электроэнергии».

Как отмечалось выше, основным показателем эффективной работы РДЭ в целом является экономический эффект от реализации выработанной электроэнергии. В зависимости от условий эксплуатации таких станций (условий договоров на присоединение к сетям посредника, а также двусторонних договоров) критерий оптимальности управления режимами РДЭ (2) может учитывать потери электроэнергии на ее транспортировку в виде стабильной ставки в денежном или натуральном выражении, или как результат аналитических расчетов с учетом режима работы и топологии электрических сетей (ЭС). Последний требует выделения из совокупных балансовых потерь электроэнергии,

обеспечиваемых информационной подсистемой домена «Транспортировка электроэнергии», потерь, обусловленных функционированием отдельных РДЭ, или их групп  $\Delta P_{PDE}(t)$ , часто в виде математического ожидания  $M_{\Delta P_{PDE}}(t)$ .

Последнее возможно при условии использования методов распределения потерь мощности, приведенных в [5]. На практике используют ряд методов, среди которых следует выделить метод определения комплексной матрицы коэффициентов распределения потерь мощности [5]:

$$\Delta P_{\mathbf{в}} = \text{Re}(\dot{\mathbf{T}}_{\mathbf{k}} \dot{\mathbf{S}} + \dot{\mathbf{T}}_{\text{зр}}), \quad (5)$$

где  $\dot{\mathbf{T}}_{\mathbf{k}}$  – матрица коэффициентов распределения потерь мощности в ветвях электрических сетей в зависимости от мощностей в их узлах с учетом коэффициентов трансформации трансформаторов связи;  $\dot{\mathbf{T}}_{\text{зр}}$  – вектор-столбец потерь мощности в ветвях схемы от э. д. с. несбалансированных коэффициентов трансформации;  $\dot{\mathbf{S}}$  – вектор-столбец нагрузок (генерации) в узлах схем замещения.

Размерность  $\dot{\mathbf{T}}_{\mathbf{k}}$  обуславливается количеством независимых узлов, без базисного, и количеством веток в схеме ЭМ:

$$\begin{aligned} \dot{T}_{ki} &= (\dot{\mathbf{U}}_t \mathbf{M}_{\Sigma ki}) \widehat{\mathbf{C}}_{ki} \dot{\mathbf{U}}_d^{-1}; \\ \dot{T}_{зpi} &= (\dot{\mathbf{U}}_t \mathbf{M}_{\Sigma ki}) \widehat{\mathbf{D}}_{\sigma i} \widehat{\mathbf{U}}_{\sigma}, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\dot{T}_{ki}$  – вектор-строка матрицы коэффициентов распределения потерь мощности для  $i$ -той ветки схемы от мощности в ее узлах с учетом комплексных коэффициентов трансформации;  $\dot{T}_{зpi}$  – потери в  $i$ -той ветке от э. д. с. несбалансированных коэффициентов трансформации трансформаторов связи;  $\dot{\mathbf{U}}_t$  – транспонированный вектор напряжений в узлах;  $\mathbf{M}_{\Sigma k}$  – матрица связей с учетом коэффициентов трансформации в явном виде;  $\dot{\mathbf{U}}_d$  – диагональная матрица напряжений в узлах;  $\widehat{\mathbf{C}}_k$  – матрица токораспределения с учетом трансформаторных связей;  $\widehat{\mathbf{D}}_{\sigma}$  – матрица проводимостей, формирующих уравнивающие токи от несбалансированных коэффициентов трансформации в замкнутых контурах ЭЭС;  $\widehat{\mathbf{U}}_{\sigma}$  – вектор-столбец напряжений в балансирующих узлах.

В зависимости от электрического расстояния до потребителя, с которым заключен договор на поставку электроэнергии, конфигурации ЭС, графиков потребления других потребителей и совокупного потребления потери электроэнергии изменяются. Это обстоятельство должно учитываться в целевой функции (2) или тарифе на транспортировку и, в конечном итоге, в цене на электроэнергию. Исходя из этого, изменяя средствами домена «Диспетчерское управление» пути протекания электроэнергии (с учетом условий договора на ее поставку), загруженность отдельных сечений и т. п., можно корректировать конечную стоимость электроэнергии для потребителя. Таким образом, становится возможным извлечение дополнительной прибыли за счет эффективного взаимодействия энергорынка и энергоснабжающих компаний.

### Воздействие рассредоточенных источников энергии на потери электрической энергии в ЭС

Как известно, для преобразования механической энергии в электрическую в отдельных рассредоточенных источниках энергии (малых ГЭС, ВЭС, когенерационных установках и т. п.) используют асинхронные генераторы (АГ). Последние, имея ряд преимуществ, в контексте эксплуатации, являются потребителями реактивной мощности. Это обстоятельство



Таблица 1

## Распределение потерь мощности в режиме работы АГ с потреблением реактивной мощности

№ узла	Расчетная мощность узла		Коэффициенты матрицы распределения потерь мощности	Потери активной мощности от узла, МВт
	$P_r$ , МВт	$Q_n$ , МВАр		
108	10,9	8,18	-0.138+0.227j	0,347
104	2,3	1,73	-0.061-0.363j	-0.559
103	16,7	12,52	-0.12+0.136j	-0.306
102	13,8	10,35	-0.123+0.151j	-0.133

Таблица 2

## Распределение потерь мощности в режиме работы АГ с компенсацией реактивной мощности

№ узла	Расчетная мощность узла		Коэффициенты матрицы распределения потерь мощности	Потери активной мощности от узла, МВт
	$P_r$ , МВт	$Q_n$ , МВАр		
108	10,9	0	-0.009+0.151j	-0.103
104	2,3	0	-0.055-0.326j	0.069
103	16,7	0	-0.032+0.103j	-0.542
102	13,8	0	-0.028+0.112j	-0.387

## Выводы

Производство электроэнергии за счет возобновляемых источников; ее транспортировки и распределение в условиях децентрализации генерирования связаны с необходимостью согласования интересов отдельных участников энергообмена. Эта комплексная задача не может быть решена без развития информационной инфраструктуры и интеллектуализации систем управления на основании Smart Grid. Потери электроэнергии на ее транспортировку от РДЭ в ЭС энергорынка, или к отдельному потребителю согласно договору на ее поставки могут выступать рычагом влияния на функционирование таких станций. Следовательно, можно обеспечить участие РДЭ в решении комплексной задачи повышения эффективности функционирования ЭМ на взаимовыгодных условиях.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стогній Б.С. Інтелектуальні електричні мережі електроенергетичних систем та їхнє технологічне забезпечення / Б.С. Стогній, О.В. Кириленко, С.П. Денисюк // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 6. – С. 44–50.
2. NIST Releases Report on Smart Grid Development // National Institute of Standards and Technology (USA) – Recognized Standards for Inclusion In the Smart Grid Interoperability Standards Framework, Release 1.0 (електронний ресурс). Режим доступу: [http://collaborate.nist.gov/twiki-sgrid/bin/view/\\_SmartGridInterimRoadmap/InterimRoadmapFinal](http://collaborate.nist.gov/twiki-sgrid/bin/view/_SmartGridInterimRoadmap/InterimRoadmapFinal)
3. European Smart Grids Technology Platform // European Commission. Directorate-General for Research Sustainable Energy System, EUR 22040, 2006. – 44 p.
4. Нікіторович О.В. Оптимізація функціонування каскадів малих ГЕС з застосуванням засобів автоматичного керування / П.Д. Лежнюк, В.В. Кулик, О.В. Нікіторович // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: «Електротехніка і енергетика», випуск 8 (140). – 2008. – С. 171-174.
5. Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Бурикін О.Б. Взаємовплив електричних мереж в процесі оптимального керування їх режимами: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. –123 с.

**Кулик Владимир Владимирович** – к. т. н., доцент кафедри електрических станций и систем, e-mail: [kulik\\_vv@mail.ru](mailto:kulik_vv@mail.ru).

Винницкий национальный технический университет.

**Магас Тарас Евстафьевич** – к. т. н., доцент кафедры информационных технологий в менеджменте.

Винницкий национальный аграрный университет.

**Малогулко Юлия Владимировна** – магистрант научного направления кафедры электрических станций и систем, e-mail: [Juliya\\_Malogulko@ukr.net](mailto:Juliya_Malogulko@ukr.net), тел. (0432) 504287.

Винницкий национальный технический университет.