

*У роботі наведено результати досліджень, які пов'язані з розробкою методу багатокритеріального оперативного керування режимами джерел розосередженої генерації автономної мікромережі на основі спільного використання підходу Беллмана-Заде та модифікованого алгоритму нелокального пошуку. Метод дозволяє ефективно врахувати інформацію кількісного та якісного характеру, отримати достатньо гармонічне за всіма критеріями рішення задачі, що належить області компромісів*

*Ключеві слова: мікромережа, розподіл ресурсів, розосереджена генерація, багатокритеріальне прийняття рішень, підхід Беллмана-Заде*

*В работе представлены результаты исследований, связанных с разработкой метода многокритериального оперативного управления режимами источников распределенной генерации автономной микросети на основе совместного использования подхода Беллмана-Заде и модифицированного алгоритма нелокального поиска. Метод позволяет эффективно учесть информацию количественного и качественного характера, получить достаточно гармоничное по всем критериям решение задачи, принадлежащее области компромиссов*

*Ключевые слова: микросети, распределение ресурсов, распределенная генерация, многокритериальное принятие решений, подход Беллмана-Заде*

## АЛГОРИТМ МНОГО-КРИТЕРИАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ МИКРОСЕТЕЙ

**В. А. Попов**

Кандидат технических наук, доцент\*

E-mail: tig@ukr.net

**Е. С. Ярмолюк**

Ассистент\*

E-mail: yarmolyuk.lena@gmail.com

**П. А. Замковой\***

E-mail: zamkovoy@list.ru

\*Кафедра электроснабжения

Национальный технический

университет Украины

«Киевский политехнический институт»

пр. Победы, 37, г. Киев, Украина, 03056

### 1. Введение

В настоящее время одно из важнейших направлений исследований в области энергетики концентрируется на вопросах расширения использования новых технологий выработки и распределения электрической энергии, созданию интеллектуальных сетей (Smart Grid) и микросетей (Microgrid), как их важной и неотъемлемой составной части.

Планируется, что в перспективе функционирование энергетического сектора любой страны будет обеспечиваться как за счет централизованных, так и децентрализованных (распределенных) источников энергии. При этом источники распределенной генерации, рассредоточенные на определенной территории, будут объединяться в единое целое, образуя микросети или, так называемые, виртуальные станции, что наряду с другими преимуществами позволит также повысить роль потребителя в управлении процессами генерации и распределения энергии.

Как и системы централизованного электроснабжения, микросеть должна иметь возможность контролировать процессы генерации и распределения электроэнергии, регулировать ее потоки потребителям. На начальном этапе микросети могут работать изолированно на выделенную группу потребителей. Впоследствии они будут не только объединяться между собой, но и интегрироваться в централизованные системы. Считается, что именно такое решение позволит достичь максимальной эффективности и надежности

процессов генерации, передачи и распределения электрической энергии с обеспечением ее надлежащего качества.

Неизбежность поэтапного реформирования энергетического сектора экономики связана не только с необходимостью широкомасштабного внедрения нового технологического оборудования, разработкой обширной нормативной документации, но и с созданием соответствующего информационного обеспечения. В формируемой новой структуре энергоснабжения потребителей управление должно осуществляться в реальном времени, что невозможно эффективно реализовать без создания адекватной информационной среды. Высокопроизводительная информационная инфраструктура позволит в реальном времени выдавать широкий спектр ситуационной информации как оперативно-диспетчерскому персоналу, так и разнообразным устройствам автоматического управления. Однако инвестиции, необходимые для решения указанных задач, измеряются сотнями миллиардов долларов, что делает невозможным их всеохватывающее и быстрое внедрение.

Вместе с тем, новая концепция реформирования энергетики является в своих основных чертах базальтернативной, что подтверждает опыт практически всех индустриально развитых и развивающихся стран. В то же время при реализации соответствующих проектов Smart Grid должны в максимальной степени учитываться географические, экономические, социальные особенности и энергетические приоритеты не только

конкретных стран, но и отдельных их территориальных образований.

---

## 2. Литературный обзор

---

В отечественной технической литературе вопросы, связанные с построением микросетей и управления их работой пока затрагиваются косвенно, только в контексте обсуждения общих идей разработки новой концепции организации энергетического сектора страны на основе интеллектуализации электрических сетей [1]. В то же время, за рубежом данная тематика является достаточно популярной, что подтверждается не только многочисленными публикациями, но и количеством разрабатываемых и реализованных конкретных проектов [2]. Вместе с тем, непосредственное применение полученных за рубежом результатов в условиях Украины в силу ряда причин является невозможным.

В частности, в некоторых исследованиях предлагаемые инновационные преобразования в энергетике концентрируются в основном на системообразующих сетях [3], что не является абсолютным приоритетом для Украины. Но основная проблема здесь заключается, прежде всего, в том, что реальное техническое состояние и степень автоматизации отечественных электрических сетей, особенно на уровне распределения электроэнергии, отсутствие возможности полноценного материального обеспечения подобных проектов создают серьезные препятствия для их широкого внедрения. Далеко не последнюю роль при этом играет и отсутствие не только в настоящее время, но и в ближайшей перспективе адекватного информационного обеспечения. Данный вывод следует из анализа условий, при которых реализуются подобные проекты за рубежом [4, 5].

В связи с этим в отечественной практике при принятии соответствующих решений относительно формирования новой идеологии построения электрических сетей и управления их работой, данный факт должен учитываться в обязательном порядке.

Фактор неопределенности неизбежно присущ практически всем задачам, связанным с управлением сложными системами. Предложенная более 40 лет назад Л. Заде теория нечетких множеств, а несколько позже сформированный Р. Муром интервальный анализ, дали мощный импульс решению практических задач в различных сферах человеческой деятельности в условиях неопределенности информации. Доказательством этому является большое количество изданных за это время монографий, которые посвящены именно прикладным аспектам применения данного математического аппарата [6 – 9].

Представленные в подобных работах результаты дают эффективный инструмент для моделирования различных объектов и управления их работой в условиях неопределенности, что обеспечивает более высокую степень адекватности получаемых решений и, как следствие этого, достижение результатов обеспечивающих фактическую эффективность. Более того, появившаяся возможность использования лингвистических характеристик позволяет, как формулировать многие задачи, так и описывать условия их реализа-

ции в форме наиболее понятной для лица принимающего решение.

Важным моментом, обеспечивающим эффективное решение многих задач, является корректный учет их многокритериальности. Как известно, формальный анализ подобных проблем завершается выделением области решений оптимальных по Парето [10] или, так называемой, области компромиссов. Выбор единственного решения связан уже с необходимостью вторжения в данную область, для чего требуется привлечение определенных неформальных процедур. Этим фактом, в значительной мере, и объясняется большое количество исследований в данной области [11 – 13]. При этом каждый из предложенных подходов для выбора единственного решения многокритериальной задачи обладает как определенными преимуществами, так и недостатками, что нашло свое отражение в указанных работах.

---

## 3. Цель и задачи исследования

---

Для отечественной энергетики вопросы полноты и качества информации, особенно на уровне распределительных систем, всегда были большим вопросом. За последние годы данная ситуация меняется в лучшую сторону, но очень медленно. Данный факт, конечно, усложняет решение многих вопросов реформирования энергетики.

В связи с этим при разработке и реализации подобных проектов возникает дополнительная задача, связанная с необходимостью создания и применения процедур принятия решений с обязательным учетом неполноты и недостаточной достоверности имеющейся информации.

В полной мере сказанное относится и к современным системам электроснабжения, где, как уже отмечалось, происходят серьезные структурные изменения, в частности, связанные с формированием микросетей, ориентированных на использование комплексных источников энергии, включающих различные как альтернативные, так и традиционные технологии генерации энергии.

В процессе становления данного направления развития энергетики возникает задача не только моделирования режимов подобных систем, но и оптимального управления их работой.

В ряде исследований, например [14 – 16], было показано, каким образом посредством применения элементов интервальной и нечеткой математики может быть достаточно корректно учтен фактический уровень неопределенности исходной информации при моделировании режимов распределительных сетей (и микросетей) в том числе с альтернативными источниками энергии в реальной информационной среде. Очевидно, что подобные идеи должны быть реализованы и при создании методов оптимального управления их режимами.

Параллельно с этим, как отмечалось, например в [17], не менее важным условием обеспечения эффективного управления сложными системами является учет неопределенности целей. Это связано с тем, что подавляющее большинство оптимизационных задач целесообразно рассматривать как многокритериальные.

Обобщая представленные выше соображения, основную цель данной работы можно представить как разработку метода оперативного управления режимами работы генерирующих источников в структуре автономной микросети на основе модифицированного алгоритма распределения ресурсов. При решении данной задачи необходимо предложить механизм эффективного учета ее многокритериальности, неопределенности исходной информации, возможности гибкого задания и изменения приоритетности целевых функций и ограничений, в частности, путем применения лингвистических характеристик.

#### 4. Учет фактора неопределенности целей

Можно указать несколько принципиальных причин, обуславливающих целесообразность ориентации на многокритериальные методы оптимизации или принятия решений.

Существует достаточно широкий класс задач, в которых эффективность решения не может быть объективно оценена единственным критерием. Прежде всего, это относится к техническим проблемам. В частности, в электроэнергетике многие из решаемых задач связаны одновременно с изменением потерь мощности и электрической энергии, показателей надежности электроснабжения и качества электрической энергии, пропускной способности элементов электрических сетей и т.д. Оценить все перечисленные факторы единственным (обобщенным) критерием чаще всего не представляется возможным.

Помимо этого даже в тех случаях, когда эффективность принимаемого решения и может быть оценена единым критерием (например, экономического характера), часто возникают ситуации, когда выбор единственного решения невозможен в связи с высоким уровнем неопределенности информации. В подобных ситуациях введение дополнительных критериев (количественного или качественного характера) позволяет эффективно сократить область неопределенности получаемых решений.

В общем случае при рассмотрении многокритериальных задач наиболее принципиальными моментами является обоснованное решение таких вопросов как нормализация частных критериев, определение принципа оптимальности, объясняющего, в каком смысле одно решение является лучше другого, обеспечение того, чтобы выбранные решения обязательно принадлежали области компромиссов, возможность задания различных приоритетов отдельным целевым функциям.

Опыт решения практических задач, связанных с многокритериальной оптимизацией, показал, что все перечисленные выше вопросы достаточно обоснованно и вместе с тем относительно просто решаются при использовании подхода предложенного Беллманом и Заде [17, 18].

В этом случае принцип оптимальности заключается в максимальном удовлетворении всех целей. Более того, в условиях отсутствия дифференциации степени важности отдельных критериев, при использовании данного подхода уровень удовлетворения отдельных критериев оказывается достаточно близким, т. е. обе-

спечивается гармоничность решений, которые к тому же, как доказано в ряде работ, всегда принадлежат области компромиссов. Последнее обстоятельство исключает необходимость проведения дополнительного анализа или выполнения достаточно трудоемкой процедуры предварительного выделения указанной области.

В соответствии с данным подходом каждая целевая функция  $F_r(X)$  исходной многокритериальной задачи

$$F_r(X) \rightarrow \text{extr}_{X \in L}, \quad r = 1, \dots, q, \quad (1)$$

где  $L$  – область допустимых решений, заменяется нечетким множеством (нечеткой целевой функцией)

$$A_r = \{X, \mu_{A_r}(X)\}, \quad X \in L, \quad r = 1, \dots, q, \quad (2)$$

где  $\mu_{A_r}(X)$  – функция принадлежности нечеткой характеристики  $A_r$ .

Здесь функции принадлежности  $\mu_{A_r}(X)$ ,  $r = 1, \dots, q$  должны отражать степень достижения нечеткими целевыми функциями своих оптимальных значений. Указанному условию отвечают следующие функции принадлежности

– для целевых функций подлежащих максимизации

$$\mu_{A_r}(X) = \left[ \frac{F_r(X) - \min_{X \in L} F_r(X)}{\max_{X \in L} F_r(X) - \min_{X \in L} F_r(X)} \right]^p; \quad (3)$$

– и для целевых функций подлежащих минимизации

$$\mu_{A_r}(X) = \left[ \frac{\max_{X \in L} F_r(X) - F_r(X)}{\max_{X \in L} F_r(X) - \min_{X \in L} F_r(X)} \right]^p. \quad (4)$$

В (3) и (4) показатель  $p$  характеризует степень важности отдельных целевых функций.

В этом случае, т.е. при наличии нечетких целевых функций, решение задачи формируется на основе использования определенного оператора агрегирования [18]

$$\mu_D(X) = \text{agg}(\mu_{A_1}(X), \mu_{A_2}(X), \dots, \mu_{A_q}(X)), \quad X \in L. \quad (5)$$

В технической литературе предложено семейство различных операторов агрегирования [19]. При этом отсутствует формальное обоснование для выбора того или иного оператора при решении конкретной проблемы.

В большинстве случаев данный выбор носит интуитивный характер и зависит от опыта лица принимающего решение [20].

Среди предложенных операторов агрегирования, наиболее распространенными являются операции минимизации и произведения. При этом каждый из указанных операторов имеет определенные теоретические обоснования [21]. В этом случае соответственно имеем

$$\mu_D(X) = \min_{r=1, \dots, q} \mu_{A_r}(X), \quad X \in L, \quad (6)$$

$$\mu_D(X) = \prod_{r=1, \dots, q} \mu_{A_r}(X), \quad X \in L. \quad (7)$$

Учитывая приведенную выше интерпретацию функций принадлежности, оптимальному решению задачи ( $X^*$ ) будут отвечать следующие условия

$$\max \mu_D(X) = \max_{X \in L} \min_{r=1, \dots, q} \mu_{A_r}(X) \quad (8)$$

с

$$X^* = \arg \max_{X \in L} \min_{r=1, \dots, q} \mu_{A_r}(X) \quad (9)$$

или

$$\max \mu_D(X) = \max_{X \in L} \prod_{r=1, \dots, q} \mu_{A_r}(X) \quad (10)$$

с

$$X^* = \arg \max_{X \in L} \prod_{r=1, \dots, q} \mu_{A_r}(X). \quad (11)$$

Рассмотрим, каким образом, представленный выше подход может быть применен к решению задачи многокритериального управления режимами микросетей.

### 5. Обоснование и формирование целевых функций и ограничений в задаче оптимального распределения нагрузок между генерирующими источниками микросети

Предполагается, что оперативное распределение нагрузок между отдельными генерирующими источниками, входящими в структуру микросети, осуществляется с учетом группы факторов различного характера. При этом в процессе принятия решения в первую очередь учитываются экономические аспекты работы микросистемы, технические характеристики используемого оборудования и экологические последствия его применения. В качестве иллюстрации подобного подхода можно рассмотреть следующие целевые функции, формируемые первоначально на качественном уровне:

- преимущественно задействовать источники с минимальными эксплуатационными затратами (что характеризует экономичность работы микросети);

- преимущественно задействовать источники с минимальным значением числа часов использования максимума (что позволит, в первую очередь, задействовать генерирующее оборудование с ограниченным энергетическим ресурсом);

- преимущественно использовать источники с минимальным уровнем выбросов в окружающую среду.

При этом каждая целевая функция, сформированная для  $t$ -го режима, в математическом плане может быть описана линейной, дробной, квадратичной и т.д. функцией, в частности, в простейшем случае функцией следующего вида

$$F_{rt}(P) = \sum_{i=1}^n c_{rit} P_{it}, \quad (12)$$

где  $r=1, \dots, q$  – общее количество рассматриваемых целевых функций;

$n$  – число генерирующих источников в микросети;

$P_{it}$  – мощность  $i$ -го генерирующего источника в  $t$ -м режиме.

Показатель  $c_{rit}$  в (12) для приведенных выше целевых функций характеризует соответственно удельную

величину затрат на выработку 1 кВт час электроэнергии  $i$ -м генерирующим источником в  $t$ -м режиме; значение  $T_{i\max}$  характерное для  $i$ -го генерирующего источника; уровень снижения выбросов  $i$ -м генерирующим источником, определяемый в соответствии с выражением

$$V_i = (V_0 - V_{\cdot i}), \quad (13)$$

где  $V_{\cdot i}$  – удельный (на 1 кВт час) уровень выбросов, например  $\text{CO}_2$ ,  $i$ -м генерирующим источником;

$V_0$  – средний по Украине уровень выбросов  $\text{CO}_2$  на 1 кВт час генерируемой электроэнергии.

Очевидно, что в этом случае первые две целевые функции будут требовать минимизации, а третья – максимизации.

В рассматриваемой постановке задачи в качестве ограничений рассматриваются как технические возможности отдельных генерирующих источников

$$P_{i\min} \leq P_{it} \leq P_{i\max}, \quad i = 1, \dots, n, \quad (14)$$

так и условие обязательного выполнения баланса генерация – потребление с учетом при необходимости потенциала аккумулирующих устройств и потерь мощности в микросистеме

$$\sum_{i=1}^n P_{it} = A_t, \quad (15)$$

где  $A_t$  – суммарная нагрузка микросистемы в момент времени  $t$ .

Следует отметить, что указанные ограничения относятся к электрической мощности оборудования и не затрагивают вопросов генерации тепловой энергии. На данном этапе логично предположить, что формируемые микросети в подавляющем большинстве случаев не предназначены для удовлетворения тепловой нагрузки потребителей в полном объеме. В этом случае считаем, что соответствующее оборудование микросети может служить только как дополнительный источник тепловой энергии.

Необходимо подчеркнуть, что полный перечень целевых функций должен определяться с учетом конкретных особенностей рассматриваемой микросети и условий ее функционирования в конкретных режимах.

Например, при сезонной потребности в дополнительной тепловой энергии, может вводиться следующая целевая функция:

- преимущественно использовать источники с возможностью когенерации (что позволит в максимальной мере задействовать их потенциал в плане генерации тепловой энергии).

Логично допустить, что при наличии в структуре микросети альтернативных источников энергии, их потенциал должен быть задействован в каждый момент времени в полном объеме и в первую очередь. Вместе с тем, вводя соответствующие целевые функции можно для конкретных промежутков времени учесть определенные ограничения на режим работы ряда источников, например, связанные с их текущим неудовлетворительным техническим состоянием, планируемым техническим обслуживанием или профилактическим ремонтом.

В этом случае коэффициенты  $c_{rit}$  в соответствующей целевой функции (например, типа (12)) могут формироваться на основе оценок, задаваемых лицом принимающим решение. В частности, можно принять  $c_{rit}=1$ , в случае отсутствия каких-либо ограничений по нагрузке  $i$ -го источника,  $c_{rit}=0,6-0,8$  при нежелательности использования  $i$ -го источника в обеспечении нагрузки потребителей в  $t$ -м режиме,  $c_{rit}=0,2-0,4$  – при крайней нежелательности использования  $i$ -го источника в  $t$ -м режиме.

Естественно, что в данном случае сформированная таким образом целевая функция будет требовать максимизации.

Дополнительно важно подчеркнуть, что наличие возможности изменять приоритет отдельных целевых функций позволяет при необходимости не только изменять степень влияния отдельных факторов на принятие решений, но даже полностью исключать отдельные целевые функции из рассмотрения, по крайней мере, для определенных режимов.

Не исключено, что для формирования отдельных целевых функций потребуются проведение дополнительных исследований. Очевидно, что микросеть включает в себя различные генерирующие источники, которые, в общем случае, могут быть рассредоточены на достаточно большой территории. Данный факт требует создания электрических сетей для распределения генерируемой энергии между отдельными потребителями.

Таким образом, одним из факторов определяющих оптимальное распределение нагрузки между отдельными генераторами может быть минимизация потерь мощности в элементах сети в определенные периоды времени.

Описать аналитически соответствующую целевую функцию невозможно.

Это обстоятельство потребует предварительного формирования некоторого функционального эквивалента электрической сети, с помощью которого появится возможность оценки «реакции» (в плане изменения потерь мощности) электрических сетей на перераспределение нагрузки между генераторами. Опыт показывает [22], что подобные модели могут успешно формироваться на основе применения математического аппарата факторного планирования экспериментов.

## 6. Алгоритм оперативного управления режимами работы комплексных источников энергии

Ниже обсуждается, каким образом, представленные выше идеи могут быть реализованы в алгоритме оперативного управления режимами работы генерирующих источников, входящих в структуру микросети. Для каждого заданного периода времени  $t$  указанная задача сформируется в виде модели

$$F_r(P) \rightarrow \text{extr}_{x \in L}, \quad r=1, \dots, q, \quad (16)$$

где  $L$  – область допустимых решений задачи;  
 $q$  – количество рассматриваемых целевых функций, с учетом ограничений (14), (15).

Дальнейший анализ осуществляется на основе алгоритма многокритериального распределения ресурсов [17], включающего в себя следующие шаги.

1. Решаются задачи

$$F_r(P) \rightarrow \min_{P \in L}, \quad F_r(P) \rightarrow \max_{P \in L}, \quad r=1, \dots, q, \quad (17)$$

что позволяет получить точки  $P_r^-, P_r^+$   $r=1, \dots, q$ .

2. Формируется вектор  $\Lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_q)$  при наличии соответствующей информации относительно важности отдельных целевых функций (критериев).

3. В соответствии с выражениями (3), (4) согласно характеру целевых функций определяются значения функций принадлежности для всех полученных значений  $P_r^-, P_r^+$   $r=1, \dots, q$ .

4. Дальнейшее решение базируется на идеях предложенного в [23] алгоритма нелокального поиска, модернизированного с целью возможности учета многокритериального характера задачи.

Название метода, как указывают авторы [24], связано с тем, что структура поверхности оптимизируемой функции вызывает ассоциацию в данном случае с многомерным оврагом. При этом изменении, так называемых, несущественных переменных (т. е. переменных, приращение которых приводит к значительным легко обнаруживаемым изменениям целевой функции) определяет крутые склоны оврага, а изменение существенных переменных (которые приводят к незначительным изменениям целевой функции) характеризует рельеф дна оврага.

С целью реализации указанного подхода формируется последовательность  $\{P^{(l)}\}$ ,  $l=1, \dots, q$  из точек  $P_r^-$  для минимизируемых целевых функций и точек  $P_r^+$  – для максимизируемых целевых функций (полученных в результате выполнения пункта 1 данного алгоритма) в соответствии с условием

$$\min_{1 \leq r \leq q} \mu_{A_r}(P^{(l)}) \geq \min_{1 \leq r \leq q} \mu_{A_r}(P^{(l+1)}), \quad l=1, \dots, q-1. \quad (18)$$

Соответствующие значения функций принадлежности были определены на стадии выполнения пункта 3 данного алгоритма.

5. Осуществляется локальный поиск из точки  $P^{(l)}$ ,  $l=1$ . Указанные вычисления заключаются в пошаговом попарном разнонаправленном изменении координат с предварительно выбранным шагом дискретности  $\Delta p$  с учетом ограничений (14), (15). Для данной цели может быть задействована любая процедура многомерного поиска. При этом шаг считается успешным, если

$$(\forall r=1, \dots, q): \mu_{A_r}(P^{(m+1)}) > \min_{1 \leq r \leq q} \mu_{A_r}(P^{(m)}), \quad (19)$$

и не успешным – при условии

$$(\exists r=1, \dots, q): \mu_{A_r}(P^{(m+1)}) \leq \min_{1 \leq r \leq q} \mu_{A_r}(P^{(m)}). \quad (20)$$

Таким образом, в процессе реализации данного этапа расчетов определяется точка  $P^{(1)*}$  с соответствующими значениями функций принадлежности  $\mu_{A_r}(P^{(1)*})$ ,  $r=1, \dots, q$ .

Очевидно, что при этом движение идет по склону оврага. При его соответствующей крутизне каждый шаг приводит к заметному изменению целевой функ-

ции. По мере приближения ко дну оврага изменения целевой функции становятся все меньше. Локальный спуск продолжается до тех пор, пока изменение значений функций принадлежности не окажется меньше некоторого заранее заданного порога  $\epsilon_\mu$ .

6. По аналогии с предыдущим пунктом алгоритма осуществляется локальный поиск, но уже из точки  $P^{(l+1)}$ , что позволяет определить точку  $P^{(l+1)*}$ , которая характеризуется функциями принадлежности  $\mu_{A_r}(P^{(l+1)*})$ ,  $r=1, \dots, q$ .

7. Проводится следующий анализ:

- если  $P^{(l)*} \neq P^{(l+1)*}$ , то осуществляется переход к пункту 8 алгоритма;
- если  $P^{(l)*} = P^{(l+1)*}$  для  $l \neq q-1$ , то возвращаемся к пункту 6 алгоритма, приняв  $l=l+1$ ;
- если  $P^{(l)*} = P^{(l+1)*} = P^{(q)*}$ , то переход к пункту 11 алгоритма, приняв  $P^* = P^{(l)*}$ .

8. Проводим линию между точками  $P^{(l)*}$  и  $P^{(l+1)*}$ . На полученной прямой определяем три точки  $P_s^{(l,l+1)}$ ,  $s=1, 2, 3$  (рис. 1), соблюдая выполнение ограничений (14), (15). Очевидно, что все указанные точки лежат на дне оврага. Среди полученных точек выбираем ту, которая отвечает условию

$$P^{(l,l+1)*} = \arg \max_s \min_{1 \leq r \leq q} \mu_{A_r}(P_s^{(l,l+1)}). \tag{21}$$

Данная точка определяет направление для дальнейшей реализации процедуры поиска.

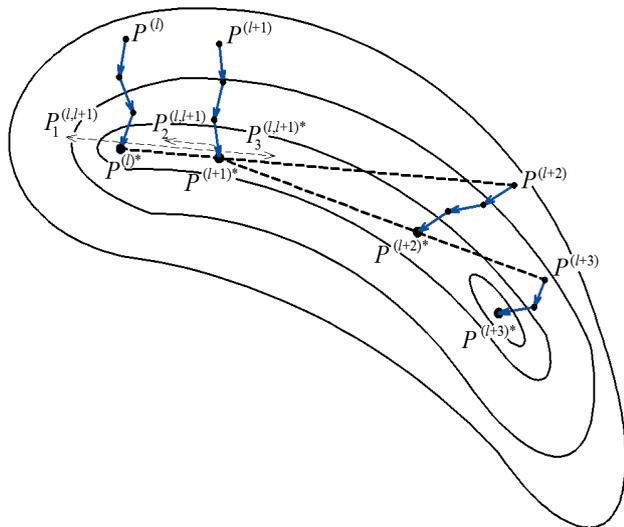


Рис. 1. Иллюстрация алгоритма нелокального поиска

9. Вдоль прямой соединяющей точки  $P^{(l)*}$  и  $P^{(l+1)*}$ , в направлении определенном на предыдущем этапе, делаем большой шаг. Полученная при этом точка  $P^{(l+2)}$  (рис. 1) оказывается на склоне оврага и выбирается в качестве начальной для реализации очередной процедуры локального спуска, в результате выполнения которой получаем точку  $P^{(l+2)*}$ .

10. Проводится анализ: если различие значений характеристик трех последних найденных точек  $P^{(l)*}$ ,  $P^{(l+1)*}$ ,  $P^{(l+2)*}$ , соответственно  $\min_{1 \leq r \leq q} \mu_{A_r}(P^{(l)*})$ ,  $\min_{1 \leq r \leq q} \mu_{A_r}(P^{(l+1)*})$ ,  $\min_{1 \leq r \leq q} \mu_{A_r}(P^{(l+2)*})$ , меньше некоторой заданной величины  $\epsilon_\Delta$ , то осуществляется переход к пункту 11 алгоритма, приняв

$$P^* = \arg \max \{ \min_{1 \leq r \leq q} \mu_{A_r}(P^{(l)*}), \min_{1 \leq r \leq q} \mu_{A_r}(P^{(l+1)*}), \min_{1 \leq r \leq q} \mu_{A_r}(P^{(l+2)*}) \}, \tag{22}$$

в противном случае переход к пункту 8 алгоритма, приняв  $l=l+1$ .

11. Полученное решение является оптимальным. При этом данное решение принадлежит как области допустимых решений, так и области компромиссов, что позволяет его рассматривать в качестве окончательного.

Представленный выше алгоритм оптимального управления режимами работы генерирующих источников позволяет достаточно гибко формулировать и решать указанную задачу. Вместе с тем, уже сейчас можно показать, что предложенная методология позволяет еще в большей степени расширить возможности представляемые лицу, принимающему решение, в плане влияния на процесс постановки и реализации задачи. В частности, это связано с возможностью введения ряда лингвистических характеристик, которые при необходимости будут дополнительно использоваться для задания желаемой загрузки отдельных генерирующих источников в отдельные периоды времени.

Например, для данной цели можно использовать такие лингвистические оценки как «приблизительно», «не больше», «меньше», «не меньше», «больше». Соответствующие функции принадлежности указанных оценок имеют следующий вид [25]

$$\mu(p_i) = e^{-k(p_{0i}-p_i)^2}, \tag{23}$$

$$\mu(p_i) = \begin{cases} 1 - e^{-k(p_{0i}-p_i)^2} & \text{при } p_i \leq p_{0i} \\ 0 & \text{при } p_i > p_{0i} \end{cases}, \tag{24}$$

$$\mu(p_i) = \begin{cases} 1 - e^{-k(p_i-p_{0i})^2} & \text{при } p_i \geq p_{0i} \\ 0 & \text{при } p_i < p_{0i} \end{cases}, \tag{25}$$

где  $k$  – коэффициент, отражающий «чувствительность» функций принадлежности, определяется экспериментальным путем в процессе настройки данного алгоритма лицом принимающим решение;

$p_0$  – параметр, определяемый конкретными условиями решения задачи и характеризующий согласно лингвистической оценке, соответственно, какую приблизительно величину должен иметь параметр  $p_i$ , какую величину не должен превышать параметр  $p_i$  и т. д. согласно мнению лица принимающего решение.

Таким образом, очевидно, что функция принадлежности (23) соответствует терм-множеству «приблизительно», (24) – «не больше» и «меньше», (25) – «не меньше» и «больше».

Указанные лингвистические оценки можно, например, использовать для задания желаемой мощности генерирующих источников: «нагрузка  $i$ -го источника в  $t$ -м режиме должна составлять приблизительно  $p$  кВт», «нагрузка  $i$ -го источника в  $t$ -м режиме должна быть не больше  $p$  кВт», «нагрузка  $i$ -го источника в  $t$ -м режиме должна быть не меньше  $p$  кВт» и т.д. Это осуществляется путем включения соответствующих функций принадлежности (23)–(25) в выражения (3), (4), (6)–(8). В частности, при учете  $f$  дополнительных условий вида (23)–(25), выражение (9) связанное с

нахождением оптимального решения задачи трансформируется к виду

$$X^* = \arg \min_{g=1, \dots, q+f} \mu_{A_g}(X), X \in L. \quad (26)$$

Учитывая, что предложенный алгоритм предназначен для оперативного управления режимами работы микросистем, естественным выглядит стремление к сокращению времени выполнения всех вычислительных процедур. В связи с этим обоснованными являются попытки применения на стадии локального поиска различных алгоритмов. Имеющиеся исследования показывают, что значительный интерес в этом плане могут представлять различные эвристические методы, в частности генетические алгоритмы. Однако, учитывая многокритериальный характер рассматриваемой задачи естественно, что при этом указанные алгоритмы потребуют соответствующей модификации.

---

## 7. Выводы

---

В соответствии с сформулированной в работе целью, разработан эвристический метод управления в

реальном времени режимами работы генерирующих источников, входящих в структуру автономной микросети. В основу положена модифицированная авторами процедура нелокального поиска, ориентированная на решение задач распределения ресурсов. В статье предложен конкретный механизм, позволяющий учесть неопределенность исходной информации и условий, в которых решается данная задача, за счет применения наряду с количественными и качественными факторами, задаваемых, в том числе, и в лингвистической форме. Данный факт принципиально отличает предложенный подход от существующих аналогов.

Многокритериальность рассматриваемой проблемы учтена путем применения подхода Беллмана-Заде, позволяющего получить решение достаточно гармоничное по всем критериям и принадлежащее области компромиссов.

Учитывая перечисленные характеристики, разработанные метод и алгоритм позволяют обеспечить адекватность и обоснованность решений задачи управления работой микросетей, формирование и оптимальное использование которых является актуальным и перспективным направлением развития энергетической отрасли Украины.

---

## Литература

1. Стогній, Б. С. Еволюція інтелектуальних електричних мереж та їхні перспективи в Україні [Текст] / Б. С. Стогній, О. В. Кириленко, А. В. Праховник, С. П. Денисюк // Технічна електродинаміка / Наук.-прикл. журнал. – 2012. – № 5. – С. 52–67.
2. Hatzigargyriou, N. Microgrids: An overview of ongoing research, development and demonstration projects [Text] / N. Hatzigargyriou, N. Asano, R. Iravani, Ch. Marnay // IEEE power and energy magazine. – 2007. – P. 78–94.
3. Кобец, В. В. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid [Текст] / В. В. Кобец, И. О. Волкова. – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – 208 с.
4. Qiao, L. A summary of optimal methods for the planning of state alone Microgrid System [Text] / L. Qiao // Energy and Power Engineering. – 2013. – № 5. – P. 992–998.
5. Hu, M. Operating Strategies and Management for Smart Microgrid Systems [Text] / M. Hu, Y. Chen, Y. Chang // Journal of Energy Engineering. – 2014. – Vol. 140, Issue 1. – P. 356–364.
6. Дилигенский, Н. В. Нечеткое моделирование и многокритериальная оптимизация производственных систем в условиях неопределенности: технология, экономика, экология [Текст] / Н. В. Дилигенский, Л. Г. Дымова, П. В. Севастьянов. – М.: Машиностроение, 2004. – 397 с.
7. Asai, K. Applied Fuzzy Systems [Text] / K. Asai, M. Sugeno, T. Terano. – New York: Academic Press, 1994. – 302 p.
8. Hanss, M. Applied fuzzy arithmetic [Text] / M. Hanss // An introduction with engineering applications. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – 270 p.
9. Жолен, Л. Прикладной интервальный анализ [Текст] / Л. Жолен, М. Кифер, О. Дидри, Э. Вальтер. – М., Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2005. – 468 с.
10. Дубов, Ю. А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем [Текст] / Ю. А. Дубов, С. И. Травкин, В. Н. Якимец. – М.: Наука, 1986. – 296 с.
11. Hwang, C. L. Multiple Objective Decision Making: Methods and Applications [Text] / C. L. Hwang, A. S. Masud. – Berlin: Springer-Verlag, 1979. – P. 366–375.
12. Ehrgott, M. Multicriteria optimization [Text] / M. Ehrgott. – Berlin: Springer-Verlag, 2005. – 323 p.
13. Ногин, В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде: количественный подход [Текст] / В. Д. Ногин. – М.: Физматлит, 2004. – 176 с.
14. Попов, В. А. Fuzzy logic in real time state estimation of distribution systems [Text] / V. A. Popov, P. Ya. Ekel, M. Fuchs // Methodologies for the Conception, Design, and Application of Intelligent Systems. – 1998. – Vol. 2. – P. 136–139.
15. Попов, В. А. Принципы учета неопределенности исходной информации при моделировании нагрузок в распределительных сетях [Текст] / В. А. Попов, Е. С. Ярмолюк, С. Банузаде Сахрагард, А. А. Журавлев // Энергетика: економіка, технології, екологія / Наук. журнал. – 2011. – № 1. – С. 61–66.
16. Попов, В. А. Евристичний алгоритм моделювання режимів інтегрованих систем електропостачання з урахуванням невизначеності вихідної інформації [Текст]: зб. наук. пр. / В. А. Попов, О. С. Ярмолюк // Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України. Спецвипуск. – 2012. – С. 40–46.

17. Pedrycz, W. Fuzzy Multicriteria Decision-Making: Models, Methods, and Applications [Text] / W. Pedrycz, P. Ekel, R. Parreiras. – New York : John Wiley & Sons, 2011. – 338 p.
18. Bellman, R. E. Decision-making in a fuzzy environment [Text] / R. E. Bellman, L. A. Zadeh // Management Science. – 1970. – № 17. – P. 141–164.
19. Zimmermann, H. J. Fussy set theory and its application [Text] / H. J. Zimmermann. – Boston : Kluwer Academic, 1990. – 400 p.
20. Beliakov, G. Appropriate choice of aggregation operators in fuzzy decision support systems [Text] / G. Beliakov, J. Warren // IEEE Transactions on Fuzzy Systems. – 2001. – № 9. – P. 773–784.
21. Bellman, R. On the analytic formalism of the theory of fuzzy sets [Text] / R. Bellman, V. Giertz // Information Science. – 1974. – № 5. – P. 149–157.
22. Жаркин, А. Ф. Функциональное эквивалентирование электрических сетей при оценке влияния источников распределенной генерации на их режимы [Текст] / А. Ф. Жаркин, В. А. Попов, В. В. Ткаченко, С. Банузаре Сахрагард // Электронное моделирование / Наук.-теор. журнал. – 2013. – Т. 35, № 3. – С. 99–111.
23. Раскин, Л. Г. Анализ сложных систем и элементы теории оптимального управления [Текст] / Л. Г. Раскин. – М. : Советское радио, 1976. – 344 с.
24. Гельфанд, И. М. О некоторых способах управления сложными системами [Текст] / И. М. Гельфанд, М. Л. Цетлин // Успехи математических наук. – 1962. – Т. 17, № 1 (103). – С. 3–25.
25. Ekel, P. Ya. Fuzzy set based multiobjective allocation of resources and its application [Text] / P. Ya. Ekel, C. A. P. S. Martins, J. G. Pereira Jr. // Computers and Mathematics with Applications. – 2006. – № 52. – P. 197–210

*Наведено результати синтезу модального управління багатомірним процесом вирощування великогабаритних монокристалів. Оптимізація системи управління проведена шляхом параметризації, на основі узагальненого підходу Ван дер Воуда. Отримано стабілізуючий регулятор по виходу, який забезпечує в замкнутій системі високу динамічну якість управління для інерційних об'єктів, яким є процес вирощування*

*Ключові слова: оптимізація, модальне управління, монокристал, кристалізація, параметризація, синтез регуляторів, багатозв'язний процес*

*Приведены результаты синтеза модального управления многомерным процессом выращивания крупногабаритных монокристаллов. Оптимизация системы управления проведена путем параметризации, на основе обобщенного подхода Ван дер Воуда. Получен стабилизирующий регулятор по выходу, который обеспечивает в замкнутой системе высокое динамическое качество управления для инерционных объектов, каким является процесс выращивания*

*Ключевые слова: оптимизация, модальное управление, монокристалл, кристаллизация, параметризация, синтез регуляторов, многосвязный процесс*

УДК 621.3.078.3

# СИНТЕЗ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПО ВАН ДЕР ВОУДУ МНОГОМЕРНЫМ ПРОЦЕССОМ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ

Ю. С. Козьмин

Кандидат технических наук,  
научный сотрудник

Лаборатория систем управления

Институт сцинтилляционных материалов

НАН Украины

пр. Ленина, 60, г. Харьков, Украина, 61001

E-mail: ukoz55@mail.ru

## 1. Введение

Современные системы выращивания монокристаллов представляют собой сочетание одноосвязных и многоосвязных, стационарных и нестационарных динамических систем. Для решения задач управления и обеспечения отказоустойчивости в таких системах

широко используются компьютерные технологии. Эти технологии позволяют реализовать сложные и разветвленные алгоритмы управления. К таким алгоритмам относятся алгоритмы, реализующие модальные законы управления.

Характер переходных процессов в системе определяется расположением корней ее характеристического