

Подход к комплексной оценке эффективности функционирования микроэнергосистемы на основе ФАЗЗИ-МОДЕЛИ

В.А. Шихин, А.К. Абд Эльрахим, Г.П. Павлюк (НИУ МЭИ)

Предлагается подход для оценки показателей эффективности функционирования микроэнергосистемы (microgrid), представленной в виде мультиагентной системы (МАС). Введено унифицированное представление агентов, применимое к классу динамических систем, формализуемых в виде непрерывных, дискретных и дискретно-событийных моделей. Разработанная схема оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы является основой для оптимизации показателей работы микрогрид в реальном времени. В качестве критериев эффективности рассмотрены типовые технические, экономические и экологические критерии. Как инструмент свертки разнородных критериев предложено использовать фаззи-модель на основе теории нечетких множеств. Предложенный алгоритм апробирован на примере проектирования гибридно-генерирующей и экологически безопасной теплоэлектроснабжающей системы арктического анклава.

Ключевые слова: мультиагентная система, микрогрид, арктический анклав, эффективность микроэнергосистемы, нечеткие множества, многокритериальная оптимизация.

Введение

В настоящее время вопрос проектирования высокоэффективных локальных энергосистем, в том числе включающих разнотипные возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и накопители энергии (СНЭ), является актуальным. При этом важно учитывать совокупность технических, экономических и экологических показателей функционирования. Важно, что повышение эффективности связано как с функционированием микроэнергосистемы в целом, так и ее отдельных субъектов.

Микроэнергосистеме [1] как объекту управления присущи следующие особенности: единое объединение разнородных распределенных и централизованных источников энергии и разнотипных потребителей. При этом микроэнергосистема должна обеспечивать надежное снабжение потребителей также в условиях полного отделения от централизованного внешнего источника, то есть в изолированном режиме. Отметим, что микроэнергосистема представляет собой комбинацию управляемых и неуправляемых источников энергии, что затрудняет достижение баланса мощности, повышает актуальность регулирования напряжения и соотношения активной и реактивной мощности в распределительной сети. Стратегии управления микроэнергосистемой могут существенно отличаться от стратегий управления традиционными энергосистемами, включая SmartGrid [2]. Это объясняется существенными различиями динамических характеристик энергоустановок субъектов микроэнергосистемы, дисбалансов из-за наличия значительных однофазных нагрузок, наличия неуправляемых или частично-управляемых источников, из-за существенно различающейся частоты коммутаций и перекоммутаций и др. В рамках микроэнергосистемы принимаемые решения по управлению каким-либо субъектом оказывают, как правило, существенное влияние на принимаемые решения по отношению к другим субъектам, а приоритет часто отдается в пользу децентрализованного управления.

Примером таких микроэнергосистем, проектирование и создание которых является актуальной задачей не только в России, но и за рубежом являются изо-

лированные (автономные или частично автономные) системы генерации и энергоснабжения в труднодоступных регионах (например, в зонах высокогорья), в районах Крайнего Севера и Арктики, островные системы, бортовые системы крупных судов [3] и т. д. В составе указанных микроэнергосистем различные субъекты системы активно взаимодействуют в реальном времени в процессе функционирования единой технологически объединенной системы.

Мульти-агентное представление микроэнергосистемы

Решение оптимизационных задач, связанных с многоцелевым управлением, при наличии разнородных и противоречивых критериев, а также неравновесным распределением критериев между существенно различающимися субъектами динамической системы можно связать с мульти-агентным представлением исходной системы. Мульти-агентная (МАС) форма представления многокомпонентных динамических систем находит все большее применение, в том числе для исследования микроэнергосистем [4], позволяя создавать иерархические системы управления на основе распределения функций управления между автономными и кооперативными агентами, реализуя такие важные характеристики, как модульность, гибкость, надежность, реконфигурируемость и т. п.

На рис. 1 приведено формализованное представление агента, предложенное в данной работе с учетом введенных основных функциональных черт, присущих агенту: рассуждение, самонастройка, самооптимизация, коммуникабельность, активность. В таблице приведен перечень агентов, отражающих основные субъекты микроэнергосистемы, который может быть расширен для более подробного описания или в связи с конкретными специфическими чертами конкретно рассматриваемой системы.

Формулировка целевых функций эффективности функционирования микрогрид

Хотя большинство известных из литературы [5, 6] подходов к решению оптимизационных задач применительно к управлению микрогрид формулируется в рам-

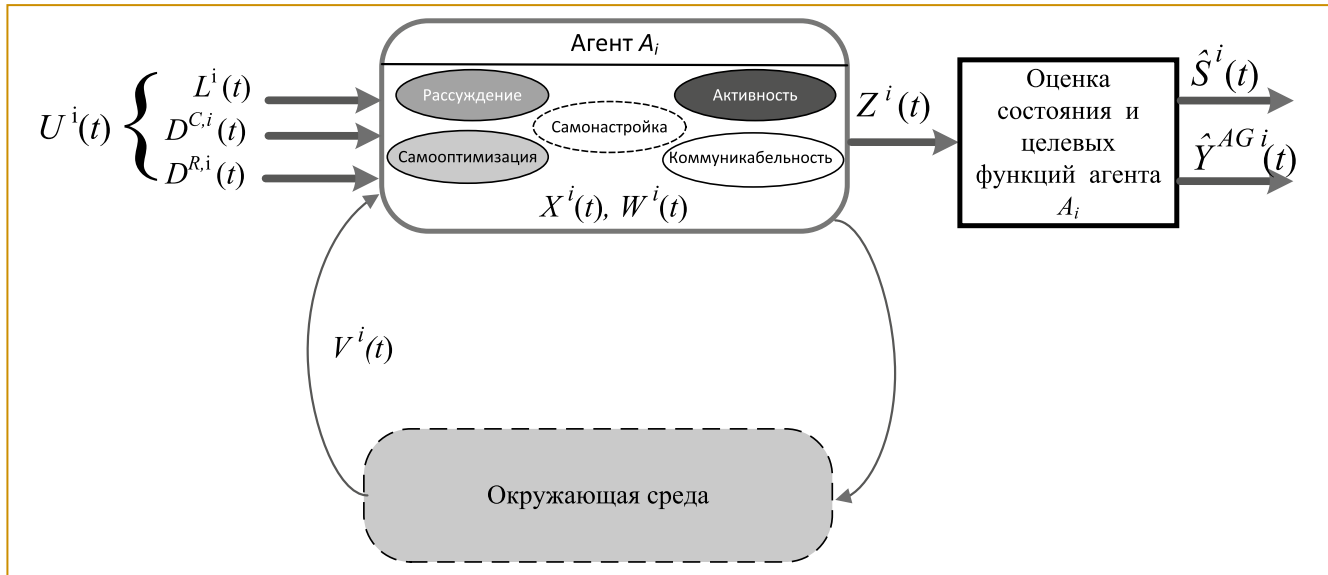


Рис. 1. Формализованное представление агента МАС:

$U^i(t)$ – вектор входных ограничений и уставок, связанный с функциональной чертой «коммуникация», при этом $U^i(t) = [L^i, D^{C,i}, D^{R,i}]^T$, где L – технологические ограничения агента; $D^{C,i}$ – вектор входных команд; $D^{R,i}$ – вектор входных рекомендаций; $Z(t)$ – вектор выходных переменных, характеризующих протекание физических процессов во времени, по которым идентифицируется состояние агента; $S^i(t)$ – вектор состояний агента, связанный с его функциональной чертой «активность»; Y^{AG} – показатели качества функционирования; $X(t)$ – вектор параметров и событийно-изменяющихся констант агента, связанный с его функциональными чертами «самонастройка» (в отношении параметров) и «рассуждение» (в отношении констант); $W^i(t)$ – вектор внутренних генерируемых управлений агента, связанный с его функциональной чертой «самооптимизация»; $V^i(t)$ – вектор условий окружающей среды, влияющих на функционирование агента

Таблица. Формализованные агенты и их функциональность в составе МАС-микросетей

Агент, A_i	Функциональность, F_{ij}	Агент, A_i	Функциональность, F_{ij}
1. Центр управления и связи (ЦУС) микросетей, агент A_1	$F_{1,1}$ – ответственность за управление микросетью;	5. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнечная электростанция (СЭС), агент A_5	$F_{5,1}$ – ответственность за генерацию соответствующей СЭС
	$F_{1,2}$ – отслеживание и планирование режимов распределенных и возобновляемых источников энергии;	6. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): ветровая электростанция (ВЭС), агент A_6	$F_{6,1}$ – ответственность за генерацию соответствующей ВЭС
	$F_{1,3}$ – прогнозирование генерируемой мощности соответствующего источника ВИЭ;	7. Система накопления энергии (СНЭ), агент A_7	$F_{7,1}$ – участие в покрытии дефицита мощности;
2. Распределительная электросеть (РЭС), включающая подстанцию, агент A_2	$F_{1,4}$ – прогнозирование состояния накопителей энергии;	8. Спрос потребителя (ПЭЭ), агент A_8	$F_{7,2}$ – участие в поглощении избытка мощности;
	$F_{1,5}$ – стабилизация частоты в микросетях;		$F_{7,3}$ – участие в регулировании частоты;
3. Распределенные дизель-генераторные установки (ДГУ), агент A_3	$F_{1,6}$ – обеспечение динамической устойчивости микросетей	9. Спрос ценозависимого потребителя (ЦЗП), агент A_9	$F_{7,4}$ – повышение динамической устойчивости микросетей
	4. Распределенные газопоршневые установки (ГПУ), агент A_4	$F_{2,1}$ – ответственность за внешнее по отношению к микросети электроснабжение,	10. База данных реального времени (БДРВ), агент A_{10}
$F_{2,2}$ – прием излишков электроэнергии от микросети во внешнюю электросеть		11. Система имитационного моделирования (SIM), агент A_{11}	$F_{9,1}$ – целевое использование электроэнергии;
$F_{3,1}$ – ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределенного генератора или группы генераторов	$F_{9,2}$ – участие в регулировании мощности		
4. Распределенные газопоршневые установки (ГПУ), агент A_4	$F_{4,1}$ – ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределенного генератора или группы генераторов	11. Система имитационного моделирования (SIM), агент A_{11}	$F_{10,1}$ – сбор, хранение, обмен данными и архивами
	$F_{4,1}$ – ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределенного генератора или группы генераторов		$F_{11,1}$ – моделирование, тестирование режимов функционирования микросетей

ках однокритериальной постановки, а именно, направлены на минимизацию общих эксплуатационных затрат или минимизацию потерь, имеются также формулировки оптимизационных задач в многокритериальной постановке [7]. Однако во всех известных подходах осуществляется сведение многокритериальной задачи к скалярному случаю, включая формальное объединение технических и экономических показателей, что, по мнению большинства отраслевых экспертов в области создания и эксплуатации микроэнергосистем, недопустимо, согласно постановлению правительства РФ от 19 декабря 2016 г. № 1401. «О комплексном определении показателей технико-экономического состояния объектов электроэнергетики, в том числе показателей физического износа и энергетической эффективности объектов электросетевого хозяйства, и об осуществлении мониторинга таких показателей». Эффективность функционирования микроэнергосистемы не рекомендуется оценивать единым показателем и, как минимум, следует подразделять на относительно обособленное рассмотрение технической, экологической и экономической эффективности с введением соответствующих целевых показателей и критериев.

В данной работе предлагается подход к формулированию оптимизационных задач, связанных с повышением эффективности микроэнергосистемы с введением раздельного рассмотрения отдельных групповых показателей эффективности, а предложенное в работе мультиагентное представление микроэнергосистемы позволяет перейти к совокупному учету показателей эффективности как отдельных агентов, так и системы в целом.

Рассмотрим подробнее критерий эффективности.

1. *Технический критерий* Y_1^{SYS} . Под данным критерием рассматриваются как качество производимой

и отпускаемой потребителям электроэнергии, так и надежность процесса электроснабжения. Качество электрической энергии является одним из основных показателей при оценке эффективности функционирования любой энергосистемы и регулируется в соответствии с ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».

2. *Экономический критерий* Y_2^{SYS} формируется из трех составляющих: стоимость генерируемой электроэнергии $y_6^{SYS} \triangleq C^{EN}$, цена для потребителя $y_7^{SYS} \triangleq PR$, прибыль владельца микроэнергосистемы $y_8^{SYS} \triangleq REV$.

3. *Экологичность* Y_3^{SYS} . Экологичность функционирования микроэнергосистемы предлагается ограничить рассмотрением выброса парниковых газов (CO_2 , NOX и др.), хотя данные показатели не являются единственными.

Оценка эффективности функционирования системы энергообеспечения арктического анклава

На рис. 2 показана общая функциональная схема микроэнергосистемы, подготовленная в рамках НИОКР межведомственной комплексной целевой программы «Арктические технологии» по теме «Автоматизированный комплекс управления высоконадежной гибридно-генерирующей и экологически безопасной тепло-электро-снабжающей микроэнергосистемой с высокими техноэкономическими показателями». Представленное на рис. 2 разработанное техническое решение может рассматриваться как базовое при использовании в задачах обеспечения надежного снабжения энергоресурсами объектов арктических регионов, включающих объекты как промышленного строительства, так и жилой инфраструк-

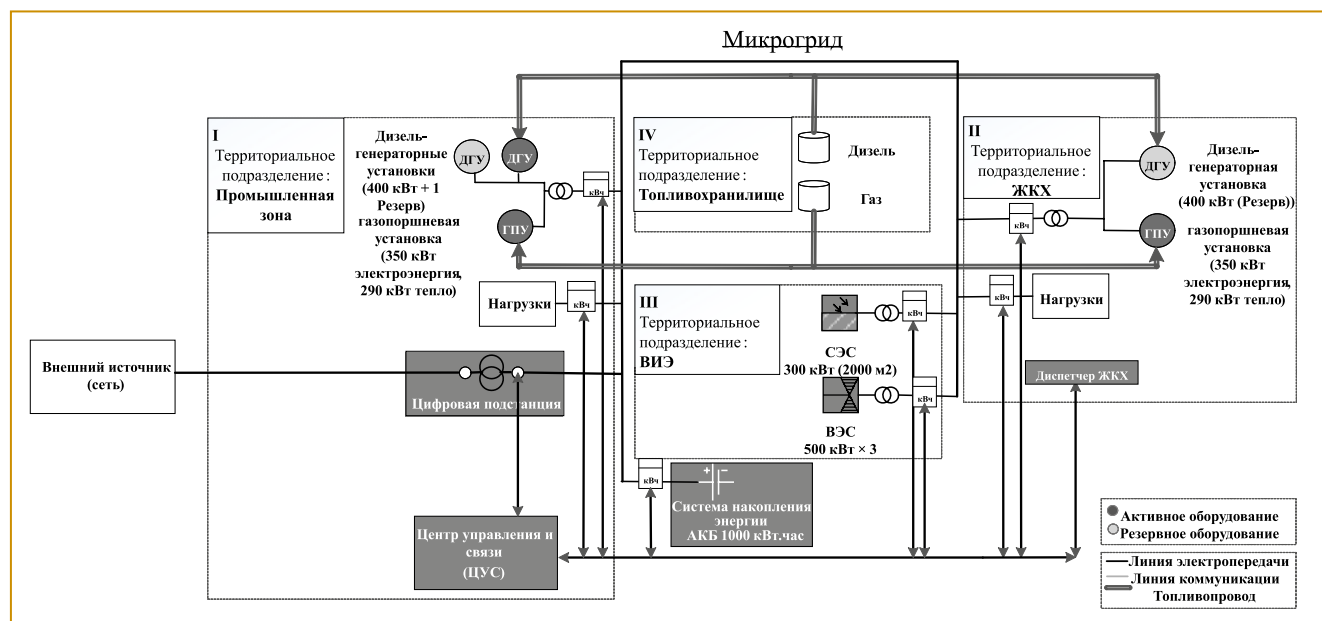


Рис. 2. Общая функциональная схема микроэнергосистемы для арктического анклава:

(I) — промышленная зона; (II) — жилищно-коммунальный комплекс; (III) — солнечная и ветровая электростанции; (IV) — топливохранилище

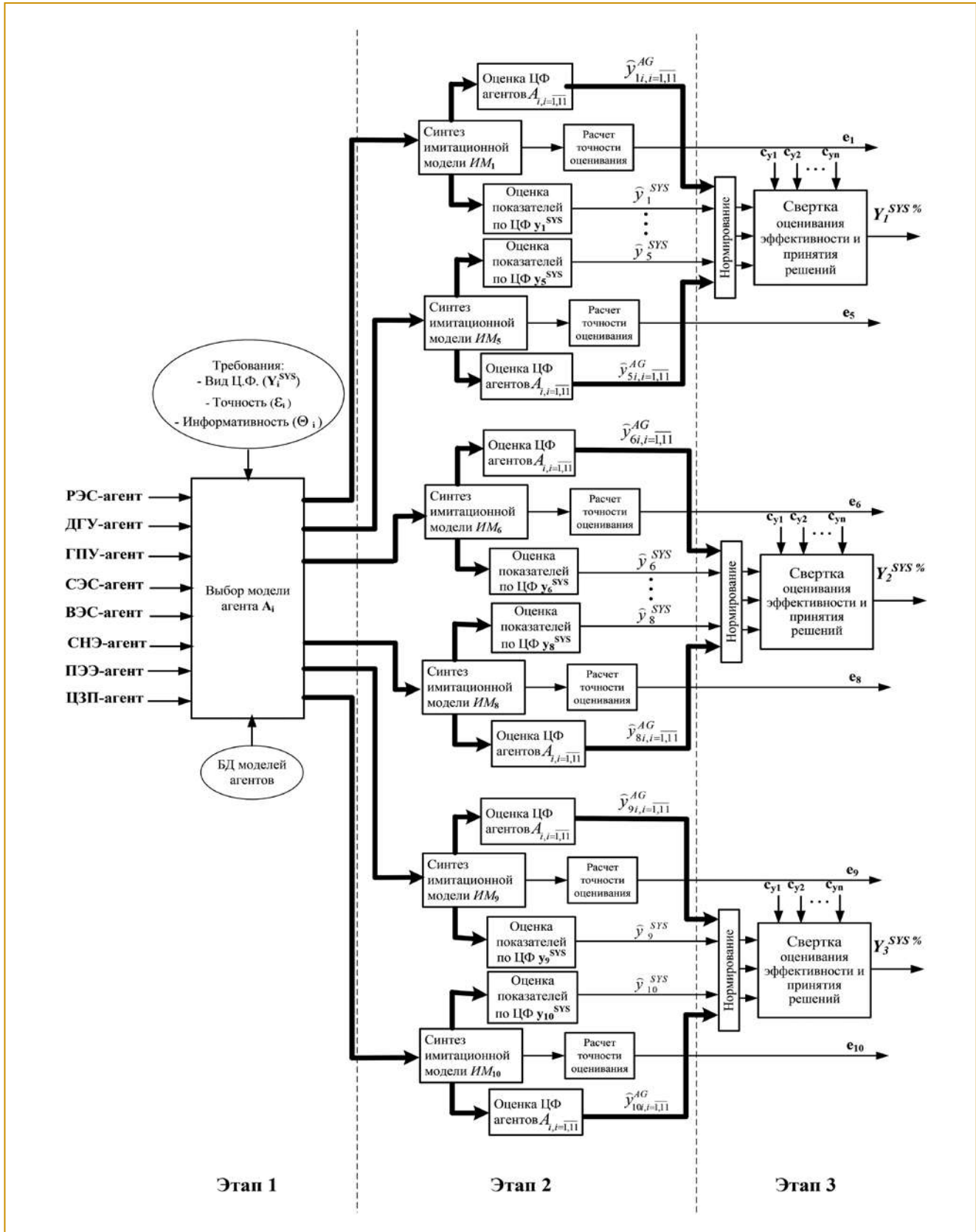


Рис. 3. Решение задачи оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы: РЭС-агент – распределительной электрической сети; ДГУ-агент – дизель-генераторная установка; ГПУ-агент – газопоршневая установка; СЭС-агент – солнечная электростанция; ВЭС-агент – ветровая электростанция; СНЭ-агент – система накопления энергии; ПЭЭ-агент – спрос потребителя; ЦЗП-агент – спроса ценозависимого потребителя; ϵ_i – точность модели агента A_i ; Θ_i – информативность модели агента A_i ; ϵ_k – погрешность расчета целевой функции Y_k^{SYS} ; c_{yk} – весовой коэффициент целевой функции Y_k^{SYS} ; ИМ – имитационная модель; БД – база данных

туры. Вместе с тем предлагаемое решение с зависимой и независимой от поставок топлива генерацией тепла и электроэнергии применимо к любым труднодоступным зонам, и может быть реализовано также при полном отсутствии магистральных линий электропередач.

Решение задачи оценки эффективности функционирования проектируемой микроэнергосистемы предлагается разбить на несколько этапов (рис. 3).

На этапе 1 (рис. 3) решается задача выбора таких моделей описания агентов MO^i , которые адекватно соответствуют исследуемым целевым функциям (ЦФ) и отвечают ограничениям по точности ε_i и информативности θ_i .

На этапе 2 производится синтез имитационной мультиагентной модели исследуемой системы с учетом специфики каждой ЦФ y_j^{SYS} , $j = 1...10$ из вышеприведенных групп критериев.

Оценка показателей эффективности осуществляется параллельно с расчетом точности оценивания e_j , что является важной выходной информацией. В синтезированной мульти-агентной модели описания отдельные агенты функционируют в условиях взаимодействия соответствующих моделируемых общесистемных процессов, что позволяет произвести оценку их собственных ЦФ y_j^{AG} и решать задачи по самооптимизации и самонастройке (рис. 1).

Этап 3 соответствует решению задачи получения численной оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы, сочетающей все три предложенных общесистемных критерия. По полученным оценкам показателей осуществляется расчет оценки соответствующих критериев эффективности для системы в целом Y_k^{SYS} , $k = 1...3$, а также значений индивидуальных показателей эффективности функционирования отдельных агентов y_j^{AG} . Представленная на рис. 3 схема отражает формализованный процесс интеграции разнотипных ЦФ в установленные критерии.

Свертка многокритериальной задачи оценивания эффективности

Предлагается произвести свертку многокритериальной задачи оценивания эффективности на основе фаззи-моделей. Подобный подход позволяет преобразовать классическую задачу определения весовых коэффициентов для отдельных критериев, заменив ее на получение единой комбинации разнотипных и разно-размерных показателей в форме модели нечеткого логического вывода.

Основой для проведения операции нечеткого логического вывода являются решающие правила и функции принадлежности. Алгоритмы нечеткого вывода различаются главным образом видом используемых правил, логических операций и разновидностью метода дефаззификации. Наиболее распространенным способом логического вывода в нечетких системах является модель Мамдани. Ее главными достоинствами в сравнении с другими моделями является способность работать с лингвистическими терминами вход-

ных/выходных переменных. При этом достигается достаточная прозрачность логического вывода.

Комплексная оценка эффективности позволяет определить ситуации, где необходимо принимать решения в виде управляющих команд и рекомендаций для улучшения эффективности функционирования микроэнергосистемы, то есть когда значение показателей эффективности является ниже удовлетворительного. Разработаны модели свертки многокритериальной задачи оценивания технической (ТЭ) (рис. 4), экономической (ЭЭ), и экологической эффективности (ЭКО).

Введем входные лингвистические переменные, сформированные путем комбинации вышеописанных системных целевых функций под каждый критерий эффективности: уровень обеспечения потребления электроэнергии: <обеспечение потребления> *ОП*, которая связана с производством энергии и с управлением спросом и является показателем надежности процесса энергоснабжения в рамках системы; отклонение от номинального режима работы (производства энергии): <отклонение режима> *δ*, которая определяет отклонение выдаваемой мощности от прогнозируемой, и является показателем наличия недостатков в функционировании субъектов микроэнергосистемы; продолжительность отказов в электроснабжении потребителей: <продолжительность отказов> *ПО*, которая отражает часть показателей надежности процесса энергоснабжения; прибыль от продажи электрической энергии: <прибыль> *ПП*; стоимость генерируемой электроэнергии: <стоимость> *СЕН*; цена для потребителя: <цена> *PR*; количество выбросов парниковых газов: <количество выбросов> *KB*; отклонение от ожидаемой доли энергии, произведенной из ВИЭ: <отклонение от доли ВИЭ> $\delta_{ВИЭ}$.

Для входных лингвистических переменных введем три группы термов:

— для относительных отклонений переменных от заданных значений, измеряемых в процентах, введем термы: «очень низкое» (ОН), «низкое» (Н), «среднее» (С), «высокое» (В), «очень высокое» (ОВ);

— для переменных, отражающих уровень отклонения, введем термы: «отрицательное значительное» (ОЗ), «отрицательное» (О), «нулевое» (НУЛ), «положительное» (П), «положительное значительное» (ПЗ).;

— для переменных, отражающих продолжительность введем термы: «очень короткая» (ОК), «короткая» (К), «средняя» (С), «длинная» (Д), «очень длинная» (ОД).

При лингвистическом подходе к моделированию принятия решения нечеткие решающие правила рассматриваются как операции над нечеткими лингвистическими переменными. В качестве примера такой операции рассмотрим нечеткий вывод по входным переменным <обеспечение потребления> *ОП* = В и <отклонение режима> δ = ОЗ. При этом нечеткий вывод (FR) будет иметь следующий вид:

$$FR [OЗ; В]: [\delta = OЗ] \wedge [OП = В] \Rightarrow FR = OТЛ.$$

Таким образом, значение показателя качества электроэнергии будет принадлежать терму «отличный».

Практическая апробация на примере арктической микроэнергосистемы

Практическая апробация предложенного алгоритма решения задачи оценивания эффективности и разработанных моделей описания агентов проведена на примере арктической микроэнергосистемы (рис. 3). Используемые при моделировании погодные данные соответствуют погодным условиям поселка Амдермы, взятым в качестве примера. Соответствующие данные по возобновляемым источникам энергии и графики нагрузки за рассмотренный год использованы в качестве входных актуальных значений для моделей свертки.

Для определения актуальных значений при оценке экономической эффективности воспользуемся следующими расчетами. Без потери общности принимаем, что на величину стоимости генерируемой электроэнергии C^{EN} главным образом влияют три фактора: стоимость топлива C^{FU} , расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание C^{OM} , плата/штрафы за выброс загрязняющих веществ C^{PO} . Данная целевая функция может быть выражена как комбинация затрат для генерирующих субъектов микроэнергосистемы:

$$C^{EN} \triangleq \int_{T_1}^{T_2} \sum_{j=1}^m C_j P_j \delta_j + \sum_{i=1}^n C^{OM}_i + C^{FU} V^{FU} + \sum_{k=1}^o C^{OM}_k E_k + Pr^{Grid} P^{main} + C^{CL} + C^{NCL} + \sum_{j=1}^m C^{PO} PO_j dt$$

где C_j — стоимость выработки электроэнергии от j -го распределенного генератора, [руб.]; P_j — мощность j -го распределенного генератора, [кВт]; δ_j — состояние j -го распределенного генератора:

$$\delta = \begin{cases} 1, & \text{если соответствующий генератор включен} \\ 0, & \text{если соответствующий генератор выключен} \end{cases}; \quad (4)$$

где T_1 — начало рассматриваемого интервала, [с]; T_2 — конец временного интервала, [с]; C^{OM}_i — расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание i -го распределенного энергетического ресурса, [руб.]; C^{OM}_k — расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание k -ой аккумуляторной батареи, [руб.]; E_k — заряженная/разряженная электрическая энергия на k -ой аккумуляторной батареи за один час, [кВт.ч]; C^{FU} — стоимость топлива, [руб.]; V^{FU} — объем покупаемого топлива, [руб.]; Pr^{Grid} — цена покупки или продажи электроэнергии в сеть, [руб.], где:

$$Pr^{Grid} = \begin{cases} Pr^s, & \text{если } \delta_{pr} = 1 (\text{мощность продается в сети}) \\ Pr^p, & \text{если } \delta_{pr} = 0 (\text{мощность покупается из сети}) \end{cases}; \quad (4)$$

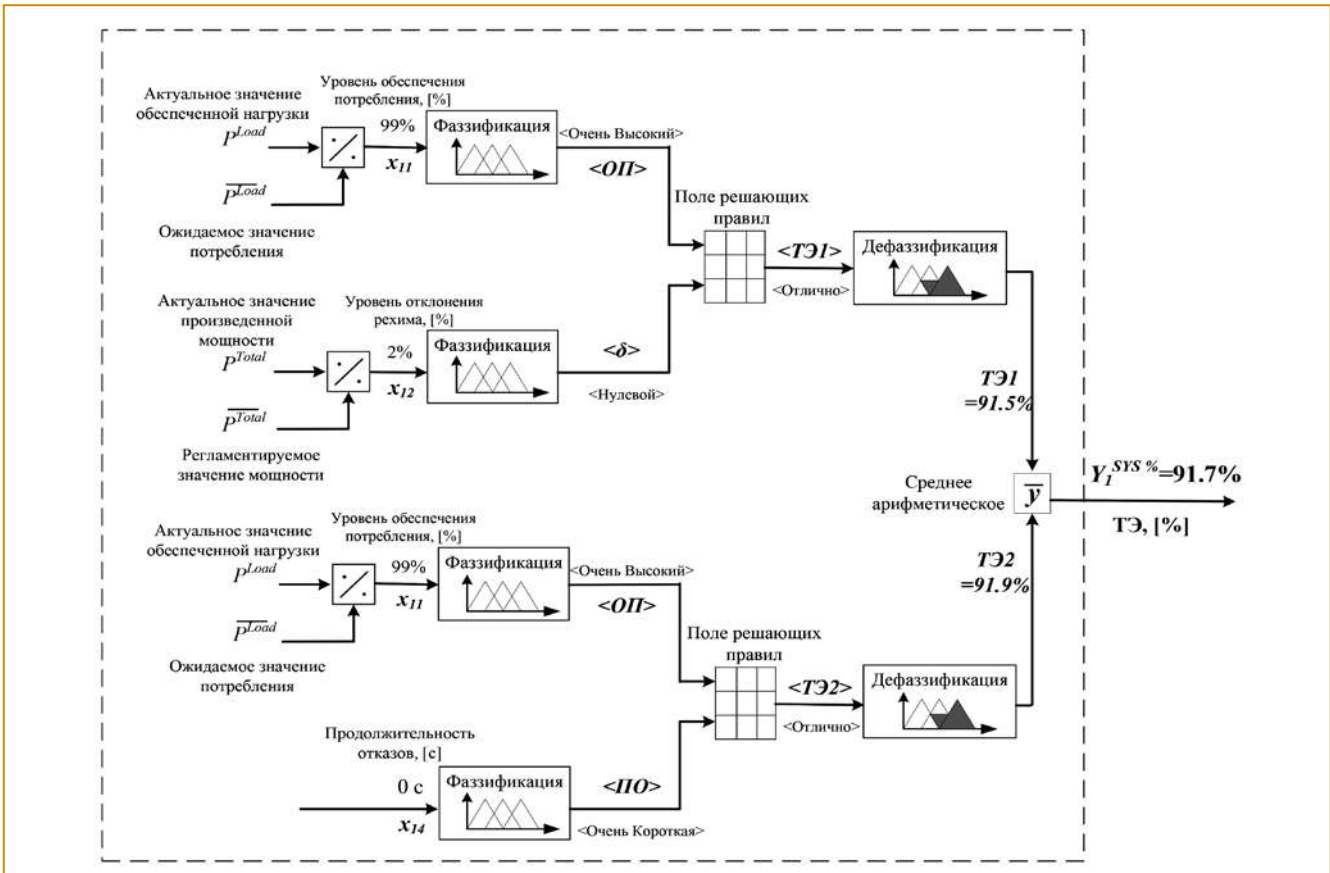


Рис. 4. Фрагмент модели свертки многокритериальной задачи оценивания технической эффективности (ТЭ) x_{ij} – входные переменные системы нечеткого вывода; P^{Load} – актуальное значение обеспеченной нагрузки; P^{Total} – актуальное значение произведенной мощности

где P^{main} — объем электроэнергии, экспортированной или импортированной из основной сети, [кВт]; C^{CL} — затраты на потерю регулируемой нагрузки, [руб.]; C_{NCL} — затраты на потерю нерегулируемой нагрузки, [руб.]; C^{PO} — стоимость/штрафы за выброс загрязняющих веществ, [руб.]; PO_j — уровень выбросов загрязняющих веществ от j -го распределенного генератора, [кг/ч].

За рассмотренный интервал времени (сут.):

$$C^{EN} = \sum_{j=1}^m C_j P_j \delta_j = C_{дгв} P_{дгв} + C_{гпв} P_{гпв} =$$

$$= 50 * 522.9 + 30 * 600 = 44145 \text{ руб.}$$

Имеем стоимость генерируемой электроэнергии, $C^{EN1} = 44145$ руб.; так как за рассмотренный интервал времени не возникли перерывы в электроснабжении, и учитывая, что потребление было обеспечено без потери в плане работы микроэнергосистемы (с ОП=99.9%), то SAIFI = SAIDI = 0.

Целевая функция, сформулированная как общая прибыль владельца микроэнергосистемы, REV , может быть представлена следующим образом:

$$REV = \int_{T_1}^{T_2} (PR \cdot P^{Load} - C^{EN}) \cdot dt =$$

$$= 5 * 14946 - 44145 = 30585 \text{ руб.}$$

где PR — цена электроэнергии для потребителей, [руб.]; P^{Load} — значение обеспеченной нагрузки, [кВт]. Отсюда имеем актуальное значение общей прибыли владельца микроэнергосистемы $REV = 30585$ руб.

Из результатов расчетов эффективности согласно разработанному алгоритму имеем по результатам свертки критерии качества ТЭ, ЭЭ, и ЭКО значения, соответственно, 91.7%, 92%, 90.4% что составляет более 80%. Данный уровень принят как допустимый по эффективности функционирования микроэнергосистем согласно [8]. Следовательно, принятие дополнительных решений по управлению и генерации управляющих команд не требуется. Считается, что микросистема функционирует с приемлемым уровнем эффективности по всем трем установленным группам критериев.

Выводы

1. Разработан комплекс моделей по решению задачи оценивания технической, экономической и экологической эффективности функционирования микроэнергосистемы на основе мультиагентного представления. Суть состоит в сведении оценки эффективности функционирования микрогрид к анали-

зу процессов, протекающих на уровне каждого агента, а затем к исследованию обобщенной математической модели микроэнергосистемы на основе моделей отдельных субъектов системы.

2. Разработана фаззи-модель в качестве инструмента свертки показателей эффективности на основе теории нечетких множеств. Такое решение позволило преодолеть сложность определения весов для целей свертки разнородных и разнонаправленных критериев и целевых функций, сведя задачу к получению числительных оценок критериев технической, экономической и экологической эффективности по результатам дефаззификации активированных функций принадлежности.

3. Представленное решение позволяет операторам энергосистемы оценить актуальное состояние функционирования системы и определить ситуации, при которых необходимо изменить ход работы энергообъектов путем генерации различных команд управления с целью повышения эффективности функционирования системы.

Список литературы

1. Marnay C., Chatzivasileiadis S., Abbey C., Iravani R., Joos G., Lombardi P., Mancarella P., Appen J. Microgrid Evolution Roadmap: International Symposium on Smart Electric Distribution Systems and Technologies (EDST), 2015 P. 139-144.
2. SmartGrids SRA 2035 – Strategic Research Agenda: European Technology Platform SmartGrids, European Commission, Tech. Rep., 2012. P. 20-27.
3. McArthur S., Davidson E., Catterson V., Dimeas A., Hatzigrygiou N., Ponci, F., Funabashi T. Multi-agent systems for power engineering applications. P. 1 : Concepts, approaches and technical challenges // IEEE Transactions on Power Systems. 2007. Vol. 22. No. 4. P. 1743-1752.
4. Abd Elraheem A. K., Shikhin V. A., Kouzalis A. Optimization Problem Statement for Power Generation Management and Control in Multi-Agent Microgrid. 2019 III International Conference on Control in Technical Systems (CTS), P. 176-179, 2019.
5. Wang Y., Huang Y., Wang Y., Li F., Zhang Y., Tian C. Operation Optimization in a Smart Micro-Grid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response // Sustainability. 2018. No. 10, P. 847-872.
6. Dulau L.I., Bica, D. Optimization of Generation Cost in a Microgrid // Procedia Manufacturing. 2018. No. 22. P. 703-708.
7. Березовский В.С., Матюнина Ю.В., Цырук С.А. Обеспечение повышенного уровня качества электроэнергии и надежности электроснабжения на договорной основе // Энергетик. 2018. № 9. С. 17-19.
8. D.T. Ton and M.A. Smith. The U.S. Department of Energy's Microgrid Initiative // The Electricity Journal. 2012. Vol. 25. № 8, pp. 84-94.

Шихин Владимир Анатольевич — канд. техн. наук, доцент,

Абд Эльрахим Амин Камаль — аспирант кафедры управления и интеллектуальных технологий НИУ МЭИ,

Павлюк Галина Прокофьевна — старший преподаватель кафедры безопасности и информационных технологий НИУ МЭИ.

E-mail: [HYPERLINK "mailto:ShikhinVA@mpei.ru"](mailto:HYPERLINK) ShikhinVA@mpei.ru; aminkamal90@hotmail.com; pavliukgp@mpei.ru