UDC 621.311.001.57:681.51
DOI: 10.24411/2658-4255-2020-00005

ФОРМУЛИРОВКА КОМПЛЕКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ ПОСТРОЕНИЯ МИКРОГРИД АРКТИЧЕСКОГО АНКЛАВА В МУЛЬТИАГЕНТНОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ

Г.П. Павлюк[1], А.К. Абд-Эльрахим[1], В.А. Шихин[1]

[1] Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия

PavliukGP@mpei.ru, Aminkamal90@hotmail.com, ShikhinVA@mpei.ru

Предлагается подход для формулировки задачи многокритериальной оптимизации при управлении генерацией в микро-энергосистеме (microgrid), представленной в виде мультиагентной системы (МАС). Предлагаемый в работе подход основан на схеме, разработанной для оценки эффективности функционирования как микрогрид в целом, так и отдельных её фрагментов (агентов-субъектов), что позволяет формализовать процесс интеграции разнородных целевых функций в единые критерии по определенным типовым индексам эффективности функционирования микроэнергосистемы: технические, экономические и экологические критерии. Схема алгоритма оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы построена на примере проектирования гибридно-генерирующей и экологически безопасной тепло-электро-снабжающей системы арктического анклава.

Ключевые слова: мультиагентная система, микрогрид, арктический анклав, эффективность микро-энергосистемы.

FORMULATION OF COMPLEX OPTIMIZATION PROBLEM OF CONSTRUCTING MICROGRIDS IN THE ARCTIC ENCLAVE BASED ON MULTI-AGENT REPRESENTATION

G.P. Pavliuk[1], A.K. Abd Elraheem[1], V.A. Shikhin[1]

[1] National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia

In this paper, an approach for multi-objective optimization for agent-based microgrid energy production is proposed. The approach represented in this paper is based on analyzing microgrid objects as distributed agents forming a multi-agent system (MAS), which gives the possibility to evaluate the efficiency of microgrid as a whole, as well as the functioning efficiency of each separate agent. The elaborated scheme also gives the possibility to formalize the process of integrating heterogeneous objective functions into certain combined criteria. The construction of the algorithm for evaluating the efficiency of the micro-energy system is carried out in relation to the example of designing a hybrid-generating and environmentally safe heat-electric supply system of the Arctic enclave.

Keywords: multi-agent system, microgrid, arctic enclave, microgrid efficiency.

Статья получена: 14.11.2019
Принята к публикации:14.01.2020
Опубликована онлайн: 27.03.2020

Введение

В настоящее время широко обсуждаются перспективы развития энергетики и возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в удаленных населенных пунктах, в том числе в арктических регионах. На законодательном уровне предусмотрены меры по поддержке ВИЭ как на оптовом, так и на розничном рынках. Вместе с тем, ведется работа по повышению энергетической эффективности хозяйствующих субъектов в Арктике в соответствии с Федеральным законом «Об энергосбережении и повышении энергетической эффективности».

В удаленных регионах, таких как арктические, внедрение возобновляемых источников энергии (ВИЭ) является одним из применимых решений проблемы обеспечения энергии. Однако вопрос повышения эффективности локальных энергосистем, в том числе с ВИЭ, остаётся актуальным. Повышение эффективности связано не только с внедрением эффективных источников энергии, но и с совершенствованием способов и технологий работы и управления локальными микро-энергосистемами (микрогрид).

Микрогрид [1] является разновидностью смарт грид, которой присущи следующие особенности: единое объединение разнородных распределенных и централизованных источников энергии, возобновляемых источников энергии, накопителей энергии и разнотипных потребителей. При этом микрогрид функционирует как при гибридном энергоснабжении, так и обеспечивается надёжное снабжение потребителей при условии полного отделения от централизованного источника, т.е. в изолированном режиме. Важно отметить, что микрогрид представляет собой комбинацию управляемых и неуправляемых источников энергии, что затрудняет достижение баланса мощности в микрогрид, повышает актуальность регулирования напряжения и соотношения активной и реактивной мощности в распределительной сети.

Особенности локальных микро-энергосистем

Стратегии управления микроэнергосистемы могут существенно и даже концептуально отличаться от стратегий управления традиционными энергосистемами. Основные причины заключаются в следующем [2]:

- стационарные и динамические характеристики субъектов микрогрид существенно отличаются от аналогичных характеристик мощных энергоустановок;
- микроэнергосистемы подвержены значительному дисбалансу из-за наличия однофазных нагрузок и / или нестабильности распределенной генерации;
- значительная часть выработки электроэнергии в микрогрид может поступать от «неуправляемых» источников (например, ветроэлектрические установки ВЭУ), когда для максимизации выходной мощности возобновляемого источника энергии используется стратегия управления на базе максимальной точки отслеживания мощности (MPPT) [2];
- широко применяемые в микрогрид накопители энергии могут играть важную роль в реализации управления микроэнергосистемой и обеспечением ее устойчивой работы, однако следует учитывать то, что они являются частично-управляемыми источниками;
- субъекты микроэнергосистемы подвержены частым коммутациям и перекоммутациям по условиям обеспечения надежности энергоснабжения и качества электроэнергии;
- в дополнение к выработке и поставке электрической энергии, микро-энергосистема, как правило, отвечает за производство и подачу тепла ко всем или части потребителей;
- в рамках микрогрид предусматриваются более широкие возможности по децентрализации управления передачей и потреблением электроэнергии, однако сохраняется принцип сочетания централизованного и децентрализованного управления.

© G.P. Pavliuk, A.K. Abd Elraheem, V.A. Shikhin
This in an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

- Существующие погрешности измерений и ошибки при передаче информации по линиям связи являются более чувствительными в мелкомасштабных локальных системах, каковыми являются микроэнергосистемы.
- В рамках микрогрид, решения, принимаемые для какого-либо субъекта, оказывают, как правило, существенное влияние на принимаемые решения и управление процессами на других участках микроэнергосистемы.

Таким образом, указанные специфические черты отдельных субъектов и микроэнергосистемы в целом приводят к тому, что данная динамическая система может быть охарактеризована как нелинейная непрерывно-дискретно-событийная система с переменными слабо-предсказуемыми параметрами и перекрестными связями. Проведение аналитических исследований таких систем крайне затруднительно и возможно только при существенных упрощениях, которые, как правило, не допустимы по соображениям потери важной информации.

В связи с указанными выше характеристиками подобных систем, относящихся к рассматриваемому классу, задача нахождения эффективных, применимых подходов для решения задачи многокритериальной оптимизации микроэнергосистем в реальном времени является актуальной проблемой.

Примером таких микро-энергосистем, автоматизация и оптимальное управление которыми на сегодня является актуальной задачей не только в России, но и за рубежом (используется термин «смарт-грид» или «микрогрид»), являются обособленные (автономные или частично автономные) системы генерации и энергоснабжения в труднодоступных районах (например, высокогорье), в районах Крайнего Севера и Арктики, островные системы, бортовые системы крупных судов [3] и т.д. В рамках указанных микро-энергосистем различные субъекты системы активно взаимодействуют в реальном времени в процессе функционирования единой технологически объединенной системы.

Для целей повышения эффективности функционирования микроэнергосистемы в соответствии с устанавливаемыми применительно к конкретным условиям критериями, очевидна необходимость перехода к интеллектуальному автоматизированному управлению, гибко учитывающему множество факторов, разнопланово влияющих на протекающие процессы в единой системе.

Важным фактором, определяющим формат решения задач оптимизации функционирования микро-энергосистем, является необходимость следования нормам международного стандарта по интеграции систем управления предприятием ГОСТ Р МЭК 62264-1-2010 «Интеграция систем управления предприятием» [4] как это показано в [5].

Применение МАС в задачах управления микрогрид

В последние годы мультиагентная форма представления многокомпонентных динамических систем находит всё большее применение [6, 7], в том числе для исследования микро-энергосистем [8, 9], позволяя создавать иерархические системы управления на основе распределения функций управления между автономными и кооперативными агентами, реализуя такие важные характеристики, как модульность, гибкость, надёжность, реконфигурируемость и т. п. Применение МАС-технологии в приложении к рассмотрению микро-энергосистем позволяет по-новому подойти к решению задачи создания систем с комбинированным централизованным и децентрализованным управлением.

Решение оптимизационных задач, связанных с многоцелевым управлением, при наличии противоречивых критериев и неравновесным распределением критериев между разнородными субъектами динамической системы можно связать с мультиагентным представлением исходной системы и предложить эффективные методы решения по оптимизации её функционирования.

Как известно, решение задач управления в сложных динамических системах, под которыми обычно понимаются

системы высокой размерности, с наличием разветвлённой структуры с перекрестными связями, наличием неопределённости различных типов, нелинейностей и др., связано с подходами на основе декомпозиции систем такого рода. В этом смысле МАС-технология предлагает именно такую декомпозицию на основе введения в рассмотрение взаимосвязанных агентов. Итак, применение мультиагентных подходов является перспективной технологией для управления и принятия решений в системах, где существуют распределённое управление и неопределённость, связанная как с реализуемым каждым агентом законом управления, слабопредсказуемым поведением внешней среды, возможными потерями в полной наблюдаемости и управляемости объектами.

Следует отметить, что применение мультиагентного подхода позволяет более полно отразить наличие данных по отдельным субъектам (агентам) системы, что обусловливает возможность получения более обоснованных решений, что ведет к повышению эффективности функционирования как системы в целом, так и каждого агента в отдельности.

На рис. 1 приведено формализованное представление агента, принятое в данной работе с учётом основных функциональных черт, присущих агенту: рассуждение, самонастройка, самооптимизация, коммуникабельность, активность.

Предлагается набор агентов, отражающих основные субъекты микрогрид (Табл. 1). Однако перечень агентов может быть расширен для более подробного описания или в связи с конкретными специфическими чертами рассматриваемой системы. Например, для наногрид (малая микроэнергосистема) необходимо учитывать инвертеры в качестве отдельного субъекта системы, поскольку они оказывают более значимое влияние на устойчивость и качество процессов [10].

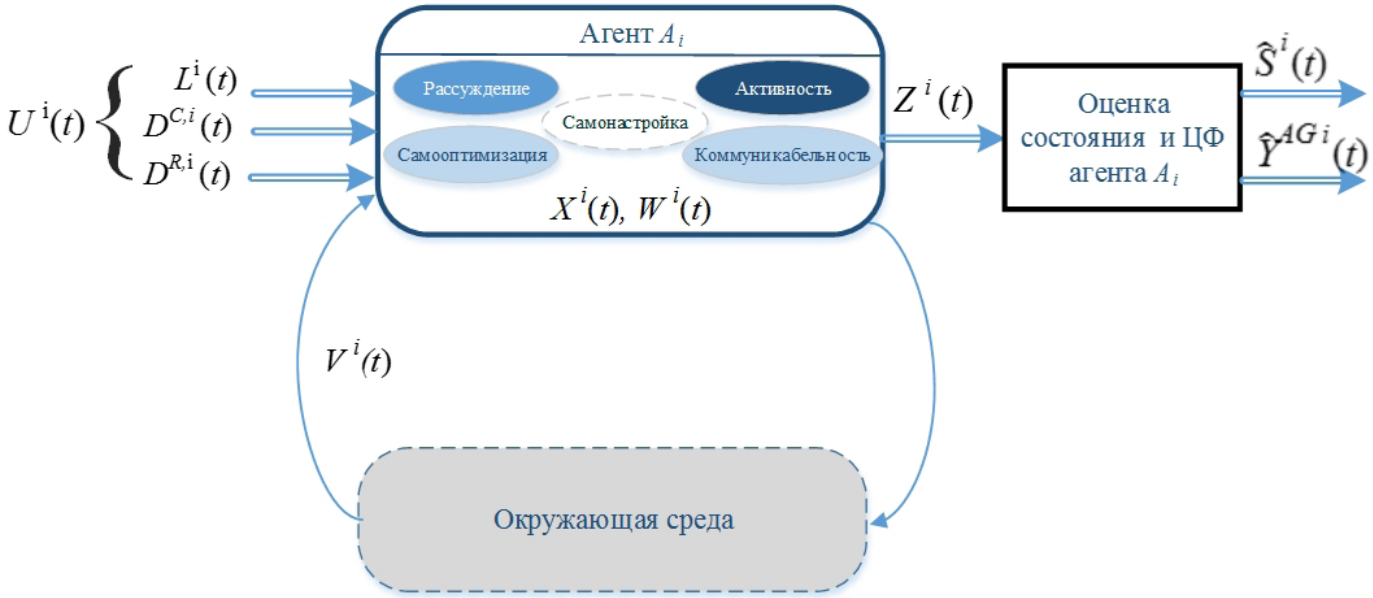

Рисунок 1 – Формализованное представление агента МАС:
U i (t) — вектор входных ограничений и уставок, связанный с функциональной чертой «коммуникация», при этом U i (t) = [L i, DC, i, DR, i]T, где
L — технологические ограничения агента;
DC, i — вектор входных команд;
DR, i — вектор входных рекомендаций;
Z(t) – вектор выходных переменных, характеризующих протекание физических процессов во времени, по которым идентифицируется состояние агента;
S(t) — вектор состояний агента, связанный с его функциональной чертой «активность», а также показатели качества его функционирования Y AG;
X(t) — вектор параметров и событийно-изменяющихся констант агента, связанный с его функциональными чертами «самонастройка» (в отношении параметров) и «рассуждение» (в отношении констант);
W(t) — вектор внутренних генерируемых управлений агента, связанный с его функциональной чертой «самооптимизация»

© G.P. Pavliuk, A.K. Abd Elraheem, V.A. Shikhin
This in an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

Таблица 1

Формализованные агенты и их функциональность в составе МАС-микрогрид

Агент, Ai	**Функциональность, Fij1**	**Агент, Ai**	**Функциональность, Fij**
1. Центр управления и связи (ЦУС) микрогрид, агент A_1	$F_{1,1}$ – ответственность за управление микрогрид; $F_{1,2}$ – отслеживание и планирование режимов распределенных и возобновляемых источников энергии; $F_{1,3}$ – прогнозирование генерируемой мощности соответствующего источника ВИЭ; $F_{1,4}$ – прогнозирование состояния накопителей энергии; $F_{1,5}$ – стабилизация частоты в микрогрид; $F_{1,6}$ – обеспечение динамической устойчивости микрогрид	5. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): солнечная электростанция (СЭС), агент A_5	$F_{5,1}$ – ответственность за генерацию соответствующей СЭС
		6. Возобновляемые источники энергии (ВИЭ): ветровая электростанция (ВЭС), агент A_6	$F_{6,1}$ – ответственность за генерацию соответствующей ВЭС
		7. Накопители энергии (НЭ), агент A_7	$F_{7,1}$ – участие в покрытии дефицита мощности; $F_{7,2}$ – участие в поглощении избытка мощности; $F_{7,3}$ – участие в регулировании частоты; $F_{7,4}$ – повышение динамической устойчивости микрогрид
2. Распределительная электросеть (РЭС), включающая подстанцию, агент A_2	$F_{2,1}$ – ответственность за внешнее по отношению к микрогрид электроснабжение, $F_{2,2}$ – прием излишков электроэнергии от микрогрид во внешнюю электросеть	8. Спрос потребителя (ПЭЭ), агент A_8	$F_{8,1}$ – целевое использование электроэнергии
		9. Спрос ценозависимого потребителя (ЦЗП), агент A_9	$F_{9,1}$ – целевое использование электроэнергии; $F_{9,2}$ – участие в регулировании мощности
3. Распределенные дизель-генераторные установки (ДГУ), агент A_3	$F_{3,1}$ – ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределённого генератора или группы генераторов	10. База данных реального времени (БДРВ), агент A_{10}	$F_{10,1}$ –сбор, хранение, обмен данными и архивами
4. Распределенные газопоршневые установки (ГПУ), агент A_4	$F_{4,1}$ – ответственность за генерируемую мощность соответствующего распределённого генератора или группы генераторов	11. Система имитационного моделирования (SIM), агент A_{11}	$F_{11,1}$ – моделирование, тестирование режимов функционирования микрогрид

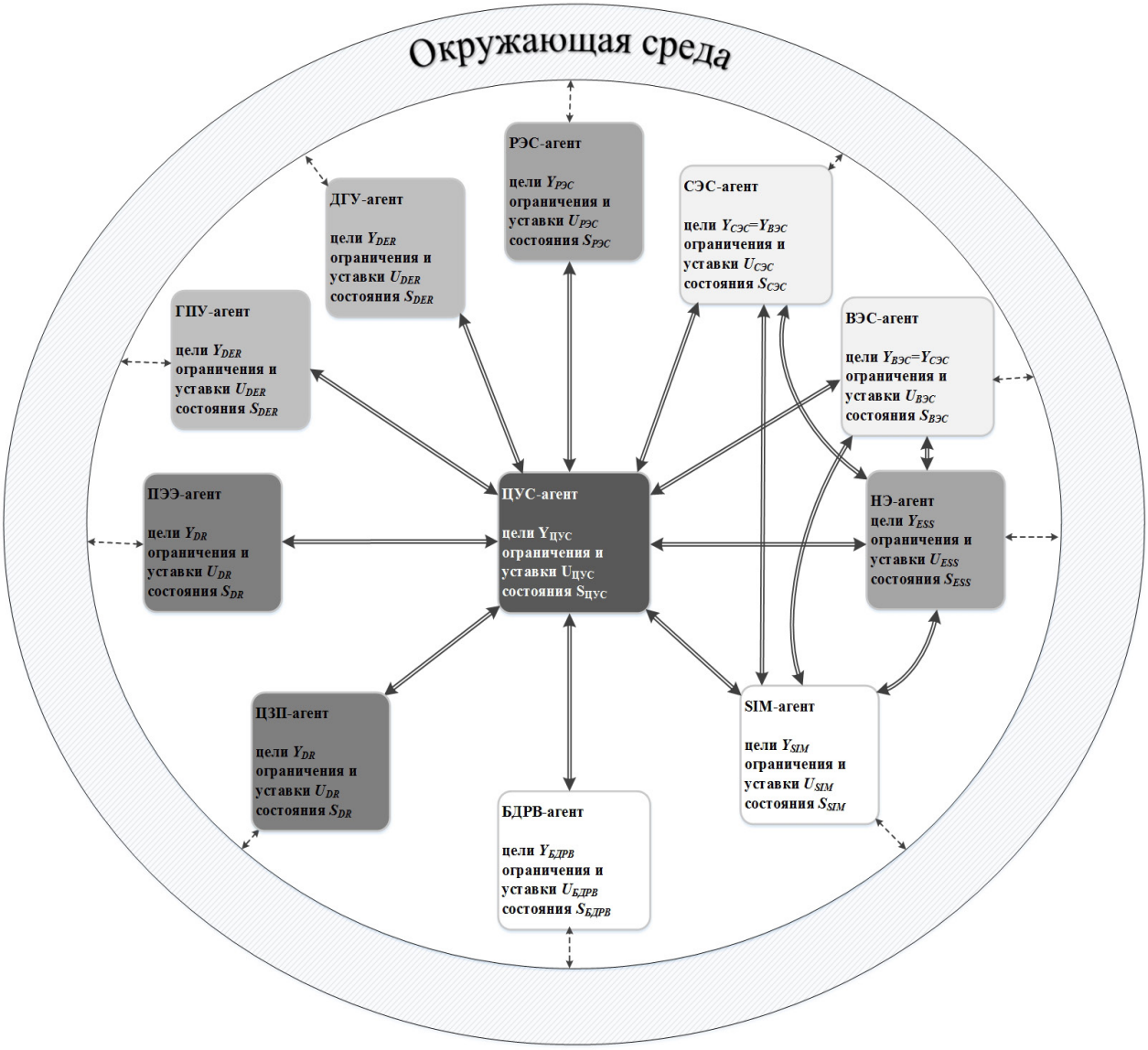

Рисунок 2 – Общая структура МАС микрогрид.

На рис. 2 показаны основные агенты типовой микроэнергосистемы и их взаимосвязь в процессе функционирования системы. Термин «окружающая среда» при этом имеет расширенное толкование, включая взаимодействие микрогрид с внешними, в том числе техническими системами.

Формулировка целевых функций эффективности функционирования микрогрид

Хотя большинство известных из литературы [11 –13, 17] подходов к решению оптимизационных задач применительно к управлению микрогрид формулируется в рамках однокритериальной постановки, а именно на минимизацию общих эксплуатационных затрат или минимизацию потерь, имеются формулировки оптимизационных задач в многокритериальной постановке [14]. Однако во всех этих подходах осуществляется сведение многокритериальной задачи к скалярному случаю, включая формальное объединение технических и экономических показателей, что, по мнению большинства специалистов в области создания и эксплуатации микро-энергосистем, недопустимо [15]. Эффективность функционирования микроэнергосистемы не рекомендуется оценивать единым интегрированным показателем и, как минимум, следует подразделять на относительно обособленное рассмотрение технической и экономической эффективности с введением соответствующих целевых показателей и критериев.

Соответственно, особенностью данной работы является то, что с учётом мнения отраслевых экспертов предлагается подход к формулированию

© G.P. Pavliuk, A.K. Abd Elraheem, V.A. Shikhin
This in an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

оптимизационных задач, связанных с повышением эффективности микроэнергосистемы и введением раздельного рассмотрения отдельных групповых показателей эффективности. В то же время, предложенное в работе мультиагентное представление микроэнергосистемы позволяет перейти к совокупному учёту показателей эффективности как отдельных агентов, так и системы в целом.

Основные критерии эффективности функционирования микроэнергосистемы представлены в табл. 2. На основе этих критериев были сформулированы целевые функции эффективности функционирования микроэнергосистемы (см. табл. 2).

Рассмотрим подробнее приведённые в табл. 2 критерии эффективности.

1. *Качество электроэнергии (КЭ).*

Качество производимой и отпускаемой потребителям электроэнергии является одним из основных критериев 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», где указаны более 10 показателей, из которых выберем два в качестве целевых функций (без потери общности математической постановки задачи):

- отклонение основной частоты напряжения от номинального $\Delta f = f - f_{nom}$, которое связано прежде всего с дефицитом активной мощности и не должно превышать ± 0,2 Гц в течение 95 % времени;
- отклонение напряжения ΔU. Величины провалов и перенапряжений связаны с множеством факторов, в том числе с их случайным характером, учесть которые в компактном математическом выражении в общем случае не представляется возможным, но в первую очередь они связаны с соотношением активной и реактивной мощности. Отклонение напряжения в сети определяется на основе сравнения значений напряжения общей шины U^{SYS} и опорного напряжения U_{ref}. Следовательно, $\Delta U = U_{ref} - U^{SYS}$.

2. *Экономический критерий (ЭК).*

Экономический критерий Y_2^{SYS} формируется из трёх составляющих: стоимость генерируемой электроэнергии

$y_3^{SYS} \triangleq C^{EN}$, цена для потребителя

$y_4^{SYS} \triangleq PR$, прибыль владельца микроэнергосистемы $y_5^{SYS} \triangleq REV$.

3. *Надёжность процесса электроснабжения Y_3^{SYS}.*

Надежность процесса электроснабжения в микро-энергосистеме как и для больших электрических сетей оценивается с использованием нормативно установленных показателей. Возникновение технологических нарушений в элементах электрической сети и масштабы их последствий зависят от многих случайных факторов. Соответственно, исследование надёжности сетевых комплексов обосновано в рамках вероятностных категорий. Именно поэтому к настоящему времени накоплен отечественный и зарубежный опыт решения задач по оценке надёжности систем электроэнергетики со следующими тремя категориями, соответствующими международной классификации показателей надежности:

CAIDI – индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей (время ремонта);

SAIDI – индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей (продолжительность отказа);

SAIFI – индекс средней частоты перерывов в электроснабжении потребителей (частота отказов) [16].

4. *Экологичность Y_4^{SYS}.*

Экологичность функционирования микроэнергосистемы предлагается ограничить рассмотрением выброса парниковых газов (CO2, NOX и др.), хотя данные показатели не являются единственными.

Пример оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы для Арктического анклава

На рис. 3 показана общая функциональная схема микро-энергосистемы, подготовленная в рамках НИОКР межведомственной комплексной целевой

Таблица 2

Критерии и показатели эффективности функционирования микроэнергосистемы

Критерий эффективности функционирования	Целевая функция	Оптимизационная задача на min или max	Входные переменные и параметры	Допустимый предел погрешности измерений
1. Качество электроэнергии (КЭ), Y_1^{SYS}	1.1. Отклонение частоты $y_1^{SYS} \triangleq \Delta f$	Поддержание в заданных пределах $\Delta f^+, \Delta f^-$	1.1.1. f_{nom} – номинальная частота; 1.1.2. f – текущее значение основной частоты напряжения; 1.1.3. $\Delta f^+, \Delta f^- = \pm 0{,}2$ Гц	± 0,03 Гц
	1.1. Отклонение напряжения, $y_2^{SYS} \triangleq \Delta U$	Min	1.2.1. U_{nom} -номинальное напряжение; 1.2.2. U – текущее значение напряжения; 1.2.3. $\Delta U^+, \Delta U^- = \pm 10$ %	Погрешность измерения длительности не должна превышать ±0,01 с
2. Экономический критерий (ЭК), Y_2^{SYS}	2.1. Стоимость генерируемой электроэнергии $y_3^{SYS} \triangleq C^{EN}$	Min	2.1.1. стоимость топлива C^F; 2.1.2. расходы на эксплуатацию и техническое обслуживание C^{OM}; 2.1.3. плата / штрафы за выброс загрязняющих веществ C^{PO}	10 %
	2.2. Цена для потребителя $y_4^{SYS} \triangleq PR$	Min	2.2.1. Фиксированный многозонный тарифный график	1 %
	2.3.Прибыль владельца микроэнергосистемы $y_5^{SYS} \triangleq REV$	Max	2.3.1. цена продажи электроэнергии Pr^C; 2.3.2 объем проданной электроэнергии P^{MG}	5 %
3. Надежность процесса электроснабжения Y_3^{SYS}	3.1. Индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей, $y_6^{SYS} \triangleq CAIDI$	Min	3.1.1. суммарное время отключения потребителей, T_Σ; 3.1.2. общее число отключений, OUT_Σ	1 %
	3.2. Индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей, $y_7^{SYS} \triangleq CAIDI$	Min	3.2.1. суммарное время отключения потребителей, T_Σ; 3.2.2. общее количество потребителей, N_Σ	1 %
	3.3. Индекс средней частоты перерывов в электроснабжении потребителей, $y_8^{SYS} \triangleq SAIFI$	Min	3.3.1. общее число отключений, OUT_Σ; 3.3.2. общее количество потребителей, N_Σ	1 %
4. Экологичность Y_1^{SYS}	4.1. Количество выбросов парниковых газов (углекислый газ) $y_9^{SYS} \triangleq CO_2$	Min	4.1.1. фактическое потребление топлива, M^{fuel}; 4.1.2. Количество выбросов углекислого газа от источников энергии, PO^{CO_2}	10 %
	4.2. Количество выбросов парниковых газов (оксиды азота) $y_{10}^{SYS} \triangleq NOX$	Min	4.2.1. фактическое потребление топлива M^{fuel}; 4.2.2. Количество выбросов оксидов азота от источников энергии, PO^{NOX}	10 %

© G.P. Pavliuk, A.K. Abd Elraheem, V.A. Shikhin
This in an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

программы «Арктические технологии» по теме «Автоматизированный комплекс управления высоконадежной гибридно-генерирующей и экологически безопасной тепло-электроснабжающей микро-энергосистемой с высокими техноэкономическими показателями». Представленное на рис. 3 разработанное техническое решение может рассматриваться как базовое при использовании в задачах обеспечения надёжного снабжения энергоресурсами объектов арктических регионов, включающих объекты как промышленного строительства, так и жилой инфраструктуры. 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.

Образец создаваемой пилотной микро--энергосистемы в Арктике представлен на рис. 3. в виде компактного анклава из следующих четырех относительно обособленных территориальных образований: - (I) Промышленная зона; - (II) Жилищно-коммунальный комплекс; - (III) Солнечная и ветровая электростанции; - (IV) Топливохранилище.

Решение задачи оценки эффективности функционирования проектируемой пилотной микро-энергосистемы предлагается разбить на несколько этапов (рис.4) .

На этапе 1 (см. рис. 4) решается задача выбора таких моделей описания агентов, которые адекватно соответствуют исследуемым целевым функциям (ЦФ) и отвечают ограничениям по точности (см. табл. 2) и информативности:

$$\mathrm{MO}^{A_i} \underset{\Theta_i}{\overset{\varepsilon_i}{\leftrightarrow}} y_j^{SYS}$$

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

Оценка показателей эффективности осуществляется параллельно с расчётом 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 (см. рис.1).

Этап 3 соответствует решению задачи получения численной оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы, сочетающей все четыре предложенных общесистемных критерия. По полученным оценкам показателей осуществляется расчёт оценки соответствующих критериев эффективности для системы в целом (см. табл. 2) Y_k^{SYS}, k = 1, 4 а также значений индивидуальных показателей эффективности функционирования отдельных агентов y_j^{AG} , приведённых в табл. 3. Представленная на рис. 4 схема отражает формализованный процесс интеграции разнотипных ЦФ в установленные критерии.

Заключение

Разработано унифицированное представление агента, применимое к микроэнергосистемам, представляющим собой композицию из субъектов, формализуемых в виде непрерывных, дискретных и дискретно-событийных моделей.

Разработана схема решения задачи оценивания эффективности микрогрид. Представленная схема позволяет формализовать процесс интеграции разнородных ЦФ в единые критерии по определённым типам, а также с учётом оценок эффективности функционирования отдельных агентов в взаимосвязанной системе.

Как показано в примере, предлагаемое решение оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы для Арктического анклава ведёт к решению многокритериальных оптимизационных задач, с учётом разнородных критериев.

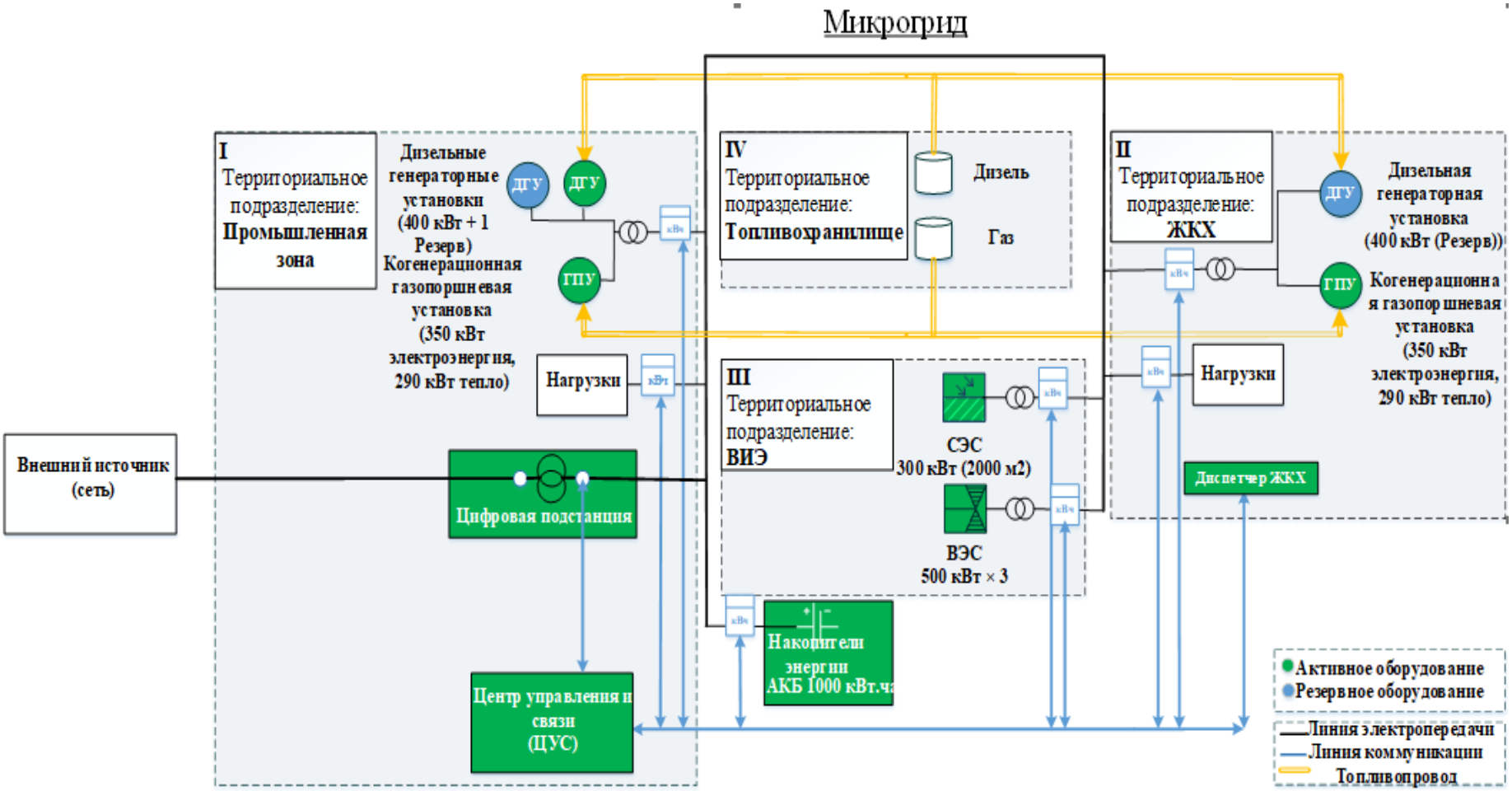

Рисунок 3 – Общая функциональная схема микроэнергосистемы для арктического анклава:
(I) — промышленная зона;
(II) — жилищно-коммунальный комплекс;
(III) — солнечная и ветровая электростанции;
(IV) — топливохранилище.

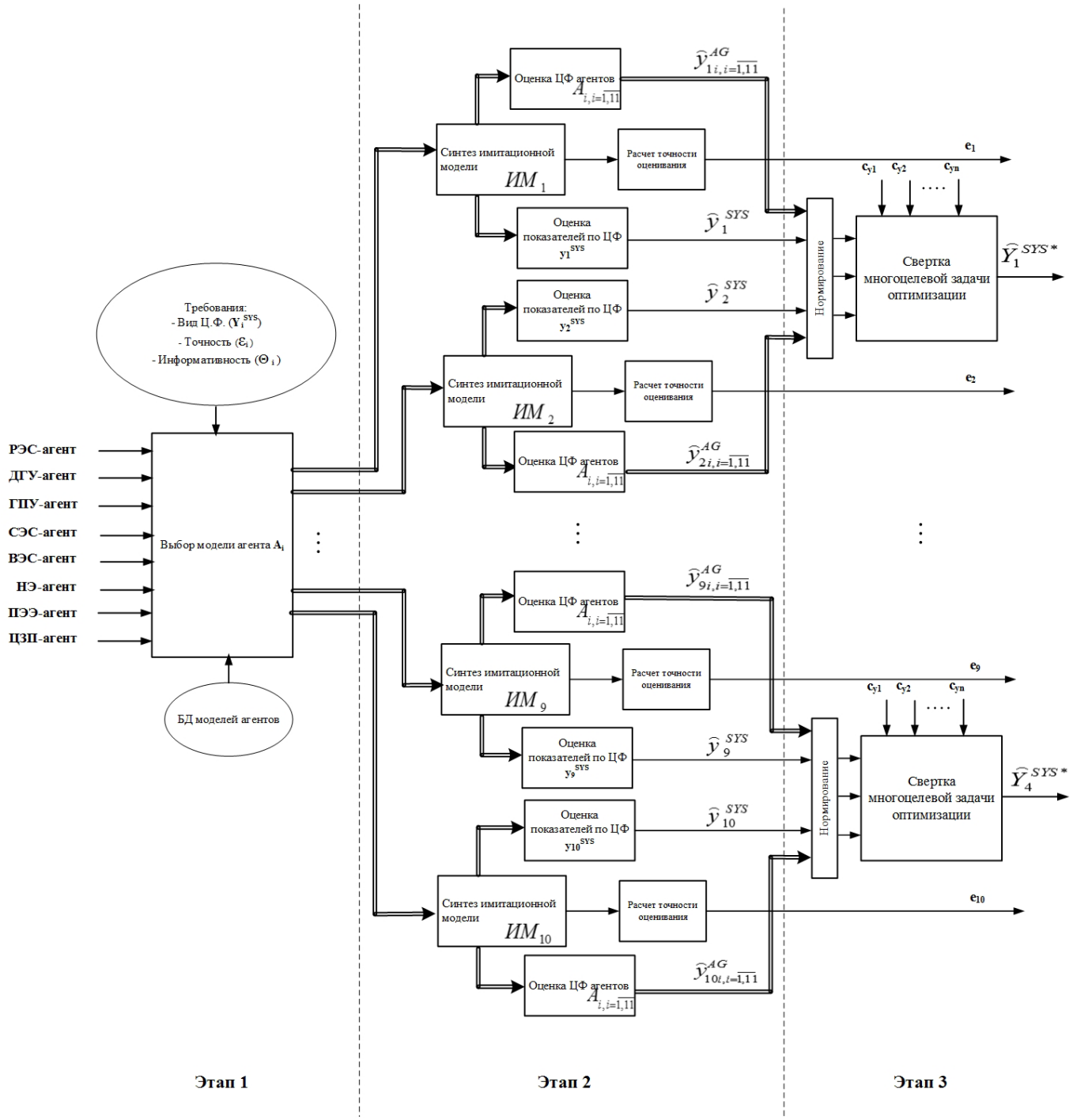

Рисунок 4 – Решение задачи оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы:
РЭС-агент – агент распределительной электрической сети;
ДГУ-агент – агент дизель-генераторной установки;
ГПУ-агент – агент газопоршневой установки;
СЭС-агент – агент солнечной электростанции;
ВЭС-агент – агент ветровой электростанции;
НЭ-агент – агент накопителей энергии;
ПЭЭ-агент – агент спроса потребителя;
ЦЗП-агент – агент спроса ценозависимого потребителя;
εi – точность модели агента A_i;
Θi – информативность модели агента A_i;
e_k – погрешность расчета показателя эффективности целевой функции Y_k^{SYS};
c_{yk} – весовой коэффициент показателя эффективности целевой функции Y_k^{SYS}
.

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. Katiraei F., Iravani R., Hatziargyriou N., Dimeas A. “Microgrids management,” IEEE Power Energy Mag., vol. 6, no. 3, pp. 54–65, May/Jun. 2008.
3. Guerrero J.M., Jin Z., Liu W., Othman M.B., Savaghebi M., Anvari-Moghaddam A., Meng L., Vasquez J.C. Shipboard Microgrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies: Proceedings of the International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Asia 2016), Shanghai, China, 28–30 June 2016. P. 1–8.
4. ГОСТ Р МЭК 62264-1-2014 «Интеграция систем управления предприятием. Часть 1. Модели и терминология». – М. : Стандартинформ, 2016.
5. Luis I. Minchala-Avila, Luis E. Garza-Castanon, Adriana Vargas-Martınez, and Youmin Zhangc, “Review of Optimal Control Techniques Applied to the Energy Management and Control of Microgrids,” in: Procedia Computer Science 52 (2015) pp. 780 – 787.
6. Leitao P., Marik V., Vrba P. Past present and future of industrial agent applications // IEEE Trans. Ind. Inf. 2013. Vol. 9. No. 4, P. 2360–2372.
7. Metzger M., Polaków G. A survey on applications of agent technology in industrial process control // IEEE Trans. Ind. Inf. 2011. Vol. 7. No. 4. P. 570–570.
8. McArthur S., Davidson E., Catterson V., Dimeas A., Hatziargyriou 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.
9. Kantamneni A., Brown L., Parker G., Weaver W. Survey of multi-agent systems for microgrid control // Engineering applications of artificial intelligence. 2015. No. 45. P. 192–203.
10. Guarderas G., Francés A., Asensi R., Uceda J. Large-signal black-box behavioral modeling of grid-supporting power converters in AC microgrids: IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2017. P. 153–158.
11. Dulau L.I., Bica, D. Optimization of Generation Cost in a Microgrid // Procedia Manufacturing. 2018. No. 22. P. 703-708.
12. Nafisi H., Agha M.M., Abyaneh H.A., Abedi M.. Two-stage optimization method for energy loss minimization in microgrid based on smart power management scheme of phevs // IEEE Trans. Smart Grid. 2016. Vol. 7. No. 3. P. 1268–1276.
13. 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.
14. Dehghanpour K., Nehrir H. Real-Time Multiobjective Microgrid Power Management Using Distributed Optimization in an Agent-Based Bargaining Framework // IEEE Trans. Smart Grid. 2017. Vol. 9. No. 6. P. 6318–6327.
15. Постановление 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».
16. V. A. Shikhin, A. K. A. Elraheem, J. Ren, "Multi-agent approach for real-time optimal control of electro microgrid", 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), pp. 1-6, Oct 2018.
17. Shikhin V.A., Pavluk G. P. Sensitive boarder method for control performance indices adjustment: Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference, Saint Petersburg, Russia, 2017, DOI:10.1109/ICIEAM.2017.8076417.

References

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. Katiraei F., Iravani R., Hatziargyriou N., Dimeas A. “Microgrids management,” IEEE Power Energy Mag., vol. 6, no. 3, pp. 54–65, May/Jun. 2008.
3. Guerrero J.M., Jin Z., Liu W., Othman M.B., Savaghebi M., Anvari-Moghaddam A., Meng L., Vasquez J.C. Shipboard Microgrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies: Proceedings of the International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management (PCIM Asia 2016), Shanghai, China, 28–30 June 2016. P. 1–8.
4. GOST R MEK 62264-1-2014. Integraciya sistem upravleniya predpriyatiem. CHast' 1. Modeli i terminologiya [State Standard 62264-1-2014. Integration of enterprise management systems. Part 1. Models and terminology]. Moscow, Standartinform Publ., 2007. 10 p. (in Russian) . Moscow, Standartinform Publ., 2016. (In Russian).
5. Luis I. Minchala-Avila, Luis E. Garza-Castanon, Adriana Vargas-Martınez, and Youmin Zhangc,

© G.P. Pavliuk, A.K. Abd Elraheem, V.A. Shikhin
This in an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0)

"Review of Optimal Control Techniques Applied to the Energy Management and Control of Microgrids," in: Procedia Computer Science 52 (2015) pp. 780 – 787.
6. Leitao P., Marik V., Vrba P. Past present and future of industrial agent applications // IEEE Trans. Ind. Inf. 2013. Vol. 9. No. 4, P. 2360–2372.
7. Metzger M., Polaków G. A survey on applications of agent technology in industrial process control // IEEE Trans. Ind. Inf. 2011. Vol. 7. No. 4. P. 570–570.
8. McArthur S., Davidson E., Catterson V., Dimeas A., Hatziargyriou 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.
9. Kantamneni A., Brown L., Parker G., Weaver W. Survey of multi-agent systems for microgrid control // Engineering applications of artificial intelligence. 2015. No. 45. P. 192–203.
10. Guarderas G., Francés A., Asensi R., Uceda J. Large-signal black-box behavioral modeling of grid-supporting power converters in AC microgrids: IEEE International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2017. P. 153–158.
11. Dulau L.I., Bica, D. Optimization of Generation Cost in a Microgrid // Procedia Manufacturing. 2018. No. 22. P. 703-708.
12. Nafisi H., Agha M.M., Abyaneh H.A., Abedi M.. Two-stage optimization method for energy loss minimization in microgrid based on smart power management scheme of phevs // IEEE Trans. Smart Grid. 2016. Vol. 7. No. 3. P. 1268–1276.
13. 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.
14. Dehghanpour K., Nehrir H. Real-Time Multiobjective Microgrid Power Management Using Distributed Optimization in an Agent-Based Bargaining Framework // IEEE Trans. Smart Grid. 2017. Vol. 9. No. 6. P. 6318–6327.
15. Postanovlenie pravitel'stva RF ot 19 dekabrya 2016 g. № 1401. «O kompleksnom opredelenii pokazatelej tekhniko-ekonomicheskogo sostoyaniya ob"ektov elektroenergetiki, v tom chisle pokazatelej fizicheskogo iznosa i energeticheskoj effektivnosti ob"ektov elektrosetevogo hozyajstva, i ob osushchestvlenii monitoringa takih pokazatelej» [Decree of the Government of the Russian Federation of December 19, 2016 No. 1401. "On the comprehensive definition of indicators of the technical and economic condition of electric power facilities, including indicators of physical deterioration and energy efficiency of electric grid facilities, and on monitoring such indicators"]. (In Russian).
16. V. A. Shikhin, A. K. Abd Elraheem, J. Ren, "Multi-agent approach for real-time optimal control of electro microgrid", 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon), pp. 1-6, Oct 2018.
17. Shikhin V.A., Pavluk G. P. Sensitive boarder method for control performance indices adjustment: Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017 International Conference, Saint Petersburg, Russia, 2017, DOI:10.1109/ICIEAM.2017.8076417.