
ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

*СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ
И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ (05.13.01)*

УДК 621.311: 681.518

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-88-97

Формулировка и решение оптимизационной задачи с разнородными критериями оптимальности при оценивании эффективности функционирования динамической системы

А.К. Абд Эльрахим, В.А. Шихин

Предложен подход к формулировке и решению задачи комплексного оценивания показателей эффективности функционирования динамической системы на примере микроэнергосистемы (MicroGrid) в мультиагентном представлении (МАС). Введено унифицированное определение агентов, применимое к классу динамических систем, формализуемых в виде непрерывных, дискретных и дискретно-событийных моделей. Проведена оценка эффективности функционирования как системы MicroGrid в целом, так и отдельных ее субъектов (агентов).

Разработанная схема оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы является основой для оптимизации показателей работы MicroGrid в реальном времени. Предложенное решение позволяет формализовать процесс интеграции разнородных целевых функций в единые критерии по определенным типам, а также с учетом оценок эффективности функционирования отдельных субъектов во взаимосвязанной системе. В качестве типовых критериев эффективности взяты технические, экономические и экологические критерии. С целью получения обобщенного решения и с учетом разнородности рассматриваемых критериев эффективности, в качестве инструмента свертки критериев предложена нечеткая (Fuzzy) модель, создаваемая на основе теории нечетких множеств. Схема алгоритма оценки эффективности функционирования микроэнергосистемы построена на примере проектирования гибридно-генерирующей и экологически безопасной системы энергоснабжения арктического анклава заданной конфигурации.

Ключевые слова: мультиагентная система, MicroGrid, эффективность микроэнергосистемы, нечеткие множества.

Для цитирования: Абд Эльрахим А.К., Шихин В.А. Формулировка и решение оптимизационной задачи с разнородными критериями оптимальности при оценивании эффективности функционирования динамической системы // Вестник МЭИ. 2021. № 2. С. 88—97. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-88-97.

Formulating and Solving an Optimization Problem with Heterogeneous Optimality Criteria in Evaluating the Dynamic System Performance

A.K. Abd Elraheem, V.A. Shikhin

An approach to formulating and solving the problem of comprehensively evaluating the dynamic system performance is proposed. A MicroGrid represented in a multi-agent system (MAS) form is taken as an example. A unified definition of agents applied to the class of dynamic systems formalized in the form of continuous, discrete and discrete-event models is introduced. The performance efficiency of both the MicroGrid and its individual components (agents) is assessed. The developed flowchart for MicroGrid performance assessment serves as a basis for optimizing the

MicroGrid performance indicators in the online mode. By using the proposed solution, it becomes possible to formalize the integration of heterogeneous objective functions into unified criteria by certain types and also taking into account the performance assessments of individual components in the interconnected system. Technical, economic and environmental criteria are considered as standard performance criteria. To obtain a generalized solution with taking into account the heterogeneity of the considered efficiency criteria, a fuzzy model based on the fuzzy sets theory is proposed as a tool for convolution of these criteria. The flowchart of the algorithm for MicroGrid performance assessment is developed taking as an example the design of a hybrid-generating and environmentally safe power supply system for the Arctic enclave with a specified configuration.

Key words: multi-agent system, MicroGrid, MicroGrid efficiency, fuzzy sets.

For citation: Abd Elraheem A.K., Shikhin V.A. Formulating and Solving an Optimization Problem with Heterogeneous Optimality Criteria in Evaluating the Dynamic System Performance. Bulletin of MPEI. 2021;2:88—97. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-88-97.

Введение

Решение оптимизационных задач, связанных с многоцелевым управлением, при наличии противоречивых критериев и с неравновесным распределением критериев между разнородными субъектами динамической системы, можно связать с мультиагентным представлением исходной системы. Мультиагентная (МАС) форма представления многокомпонентных динамических систем находит все большее применение в исследованиях микроэнергосистем, позволяя создавать иерархические системы управления на основе распределения функций управления между автономными и кооперативными агентами, реализуя модульность, гибкость, надежность, реконфигурируемость и т. п. [1 — 4].

В настоящее время вопрос проектирования высокоэффективных локальных энергосистем, в том числе включающих разнотипные возобновляемые источники энергии (ВИЭ) и накопители энергии, чрезвычайно актуален, особенно при анализе совокупности технических, экономических и экологических показателей функционирования. При этом повышение эффективности связано с работой как микроэнергосистемы в целом, так и ее отдельных субъектов.

Микроэнергосистеме [5], как объекту управления, присущи следующие особенности: единое объединение разнородных распределенных и централизованных источников энергии, возобновляемых источников энергии, накопителей энергии и разнотипных потребителей. При этом она должна гарантировать надежное снабжение потребителей при условии полного отделения от централизованного источника, т. е. в изолированном режиме.

Следует отметить, что микроэнергосистема представляет собой комбинацию управляемых и неуправляемых источников энергии, что затрудняет достижение баланса мощности, повышает актуальность регулирования напряжения и соотношения активной и реактивной мощностей в распределительной сети. Стратегии управления такой системой существенно отличаются от стратегий управления традиционными энергосистемами и SmartGrid [6, 7]. Основные причины связаны с существенными различиями динамических характеристик мощных энергоустановок от субъектов микроэнергосистем, дисбалансами из-за наличия серьез-

ных однофазных нагрузок, возникновением 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, как правило, существенно влияют на принимаемые решения по отношению к другим субъектам, а приоритет отдается в пользу децентрализованного управления.

Примером микроэнергосистем являются изолированные (автономные или частично автономные) системы генерации и энергоснабжения в труднодоступных районах (например, высокогорье), районах Крайнего Севера и Арктики, островные системы, бортовые системы крупных судов и т. д. [8]. В рамках таких микроэнергосистем различные субъекты системы активно взаимодействуют в реальном времени в процессе функционирования единой технологически объединенной системы.

Мультиагентное представление микроэнергосистемы

На рисунке 1 приведено формализованное представление агента, предложенное с учетом основных функциональных черт, присущих агенту: рассуждения, самонастройки, самооптимизации, коммуникабельности, активности. В таблице 1 дан перечень агентов, отражающих основные субъекты микроэнергосистемы, который может быть расширен для более подробного описания или в связи с конкретными специфическими чертами рассматриваемой системы.

Формулировка целевых функций эффективности функционирования MicroGrid

Большинство известных подходов к решению оптимизационных задач, применительно к управлению MicroGrid, сформулированы в рамках однокритериальной постановки [9 — 12], но в то же время имеются описания оптимизационных задач в многокритериальной постановке [13, 14]. Однако во всех указанных подходах выполнено 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,

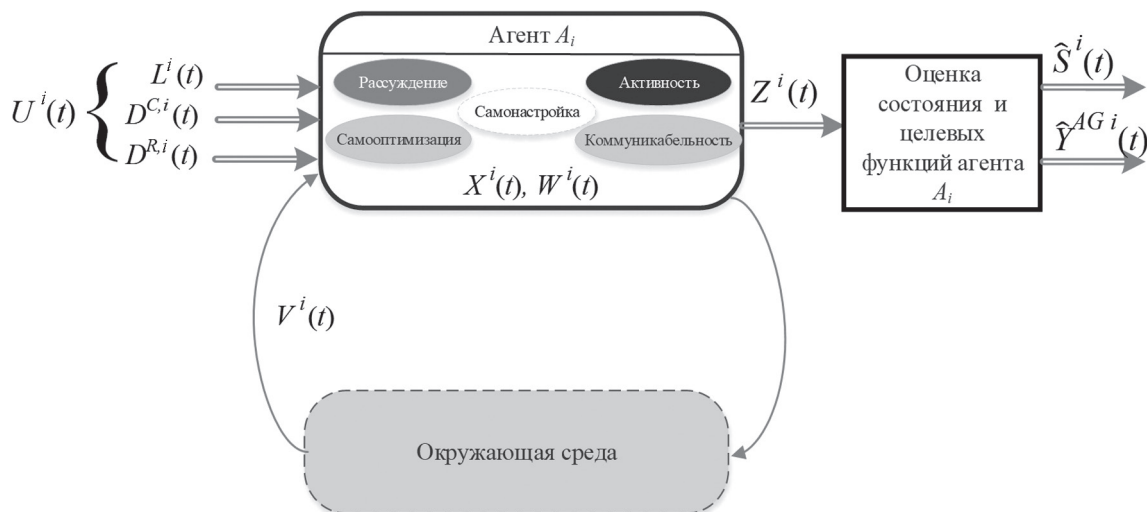


Рис. 1. Формализованное представление агента MAC:

$U^i(t)$ — вектор входных ограничений и уставок, связанный с функциональной чертой «коммуникация», $U^i(t) = [L^i, D^{C,i}, D^{R,i}]^T$, где L — технологические ограничения агента; $D^{C,i}, D^{R,i}$ — векторы входных команд и 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 (активностью), а также показателями качества его функционирования Y^{AG} ; $X(t)$ — вектор параметров и событийно-изменяющихся констант агента, связанный с его самонастройкой (в отношении параметров) и рассуждением (в отношении констант); $W(t)$ — вектор внутренних генерируемых управлений агента, связанный с его самооптимизацией; $V^i(t)$ — вектор возмущающих воздействий (неконтролируемых)

Таблица 1

Формализованные агенты и их функциональность в составе MAC — MicroGrid

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

недопустимо [15]. Эффективность функционирования микроэнергосистемы не рекомендуется оценивать единым интегрированным показателем и, как минимум, следует подразделять на относительно обособленный анализ технической и экономической эффективности с введением соответствующих целевых показателей и групп критериев. Это является особенностью подхода в настоящей работе. Кроме того, предложенное мультиагентное представление микроэнергосистемы позволяет перейти к совокупному учету показателей

эффективности как отдельных агентов, так и системы в целом.

Основные критерии эффективности функционирования микроэнергосистемы представлены в табл. 2. На их основе сформулированы целевые функции эффективности функционирования микроэнергосистемы.

Рассмотрим подробнее предложенные критерии эффективности.

Технический критерий Y_1^{SYS} . Под ним рассматриваются как качество производимой и отпускаемой

Таблица 2

Критерии и показатели эффективности функционирования микроэнергосистемы

Критерий эффективности функционирования	Целевая функция	Оптимизационная задача на минимум или максимум	Входные переменные и параметры	Допустимый предел погрешности измерений				
Технический критерий Y_1^{SYS}	Отклонение частоты $y_1^{SYS} \triangleq \Delta f$	Поддержание в заданных пределах $\Delta f^+, \Delta f^-$	f_{nom} — номинальная частота; f — текущее значение основной частоты напряжения; $\Delta f^+, \Delta f^- = \pm 0,2$ Гц	$\pm 0,03$ Гц				
	Отклонение напряжения $y_2^{SYS} \triangleq \delta U$				Min	Суммарное время отключения потребителей T_{Σ} ; общее число отключений OUT_{Σ}	Погрешность измерения длительности не должна превышать $\pm 0,01$ с	
	Индекс средней продолжительности отключения одного потребителя, $y_3^{SYS} \triangleq CAIDI$	Суммарное время отключения потребителей T_{Σ} ; общее количество потребителей N_{Σ}	1%					
	Индекс средней продолжительности перерыва в электроснабжении потребителей, $y_4^{SYS} \triangleq SAIDI$			Общее число отключений OUT_{Σ} ; количество потребителей N_{Σ}				1%
	Индекс средней частоты перерывов в электроснабжении потребителей, $y_5^{SYS} \triangleq SAIFI$							
Стоимость генерируемой электроэнергии $y_6^{SYS} \triangleq C^{EN}$	Max	Цена продажи электроэнергии P^{rC} ; объем проданной электроэнергии P^{MG}	5%					
Цена для потребителя $y_7^{SYS} \triangleq PR$				Фиксированный многозонный тарифный график	1%			
Прибыль владельца микроэнергосистемы $y_8^{SYS} \triangleq REV$						Min	Фактическое потребление топлива M^{fuel} ; объем выбросов углекислого газа PO^{CO_2} ; фактическое потребление топлива M^{fuel} ; объем выбросов оксидов азота от источников энергии PO^{NO_x}	10%
Экологичность Y_3^{SYS}	Количество выбросов парниковых газов: углекислый газ $y_9^{SYS} \triangleq CO_2$	Min	Фактическое потребление топлива M^{fuel} ; объем выбросов углекислого газа PO^{CO_2} ; фактическое потребление топлива M^{fuel} ; объем выбросов оксидов азота от источников энергии PO^{NO_x}	10%				
	оксиды азота $y_{10}^{SYS} \triangleq NO_x$							

потребителям электроэнергии, так и надежность процесса электроснабжения. Качество электрической энергии — один из основных показателей при оценке эффективности функционирования любой энергосистемы и регулируется в соответствии с [16], где приведены более 10 показателей. Выберем из них два в качестве целевых функций (без потери общности математической постановки задачи) с указанием допустимых пределов погрешности их измерений в соответствии с международными стандартами (см. табл. 2). Надежность процесса электроснабжения в микроэнергосистеме оценивается с использованием нормативно-установленных показателей [17]. Допустимый предел погрешности (1%), указанный в пп. 1.3, 1.4 и 1.5 в табл. 2, считается допустимым пределом погрешности при оценке показателей надежности процесса электроснабжения, согласно [18].

Экономический критерий Y_2^{SYS} формируется из трех составляющих: стоимости генерируемой электроэнергии $y_6^{SYS} \triangleq C^{EN}$, цены для потребителя $y_7^{SYS} \triangleq PR$, прибыли владельца микроэнергосистемы $y_8^{SYS} \triangleq REV$. Указанные в табл. 2 допустимые пределы погрешности для целевых функций экономического критерия соответствуют нормам, установленным экспертами [19 — 20].

Экологичность Y_3^{SYS} . Ее можно ограничить изучением выброса парниковых газов (CO_2 , NO_x и др.), хотя данные показатели не являются единственными. Допустимый предел погрешности (10%), указанный в пп. 3.1, 3.2 табл. 2 — допустимый предел погрешности (например, при расчете выбросов парниковых газов) [19].

Пример оценки эффективности функционирования системы энергообеспечения арктического анклава

На рисунке 2 изображена 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 теплоэлектроснабжающей микроэнергосистемой с высокими техноэкономическими показателями». Представленное на рис. 2 разработанное техническое решение можно использовать в качестве базового при работе с задачами обеспечения надежного снабжения энергоресурсами объектов арктических регионов, включающих здания как промышленного строительства, так и жилой инфраструктуры. Вместе с тем, предлагаемое решение с зависимой и независимой от поставок топлива генерациями тепла и электроэнергии применимо к любым труднодоступным зонам, и реализуется при полном отсутствии магистральных линий электропередач.

Разобьем решение задачи оценки эффективности функционирования проектируемой микроэнергосистемы на несколько этапов (рис. 3).

На первом этапе (см. рис. 3) нужно решить задачу выбора моделей описания агентов, адекватно соответствующих исследуемым целевым функциям (ЦФ) и отвечающих ограничениям по точности (см. табл. 2) и информативности:

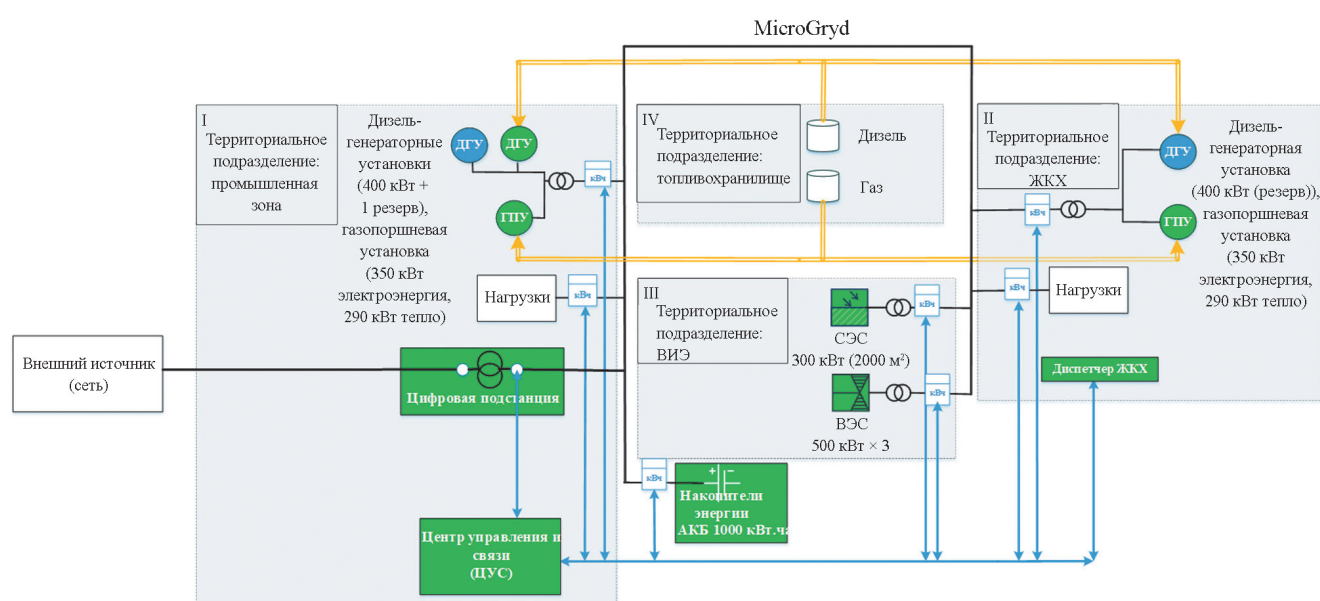


Рис. 2. Общая функциональная схема микроэнергосистемы для арктического анклава:

I — промышленная зона; II — жилищно-коммунальный комплекс; III — солнечная и ветровая электростанции; IV — топливохранилище; ●, ○ — активное и резервное оборудование; —, — — линии электропередачи и коммуникации; — — топливопровод

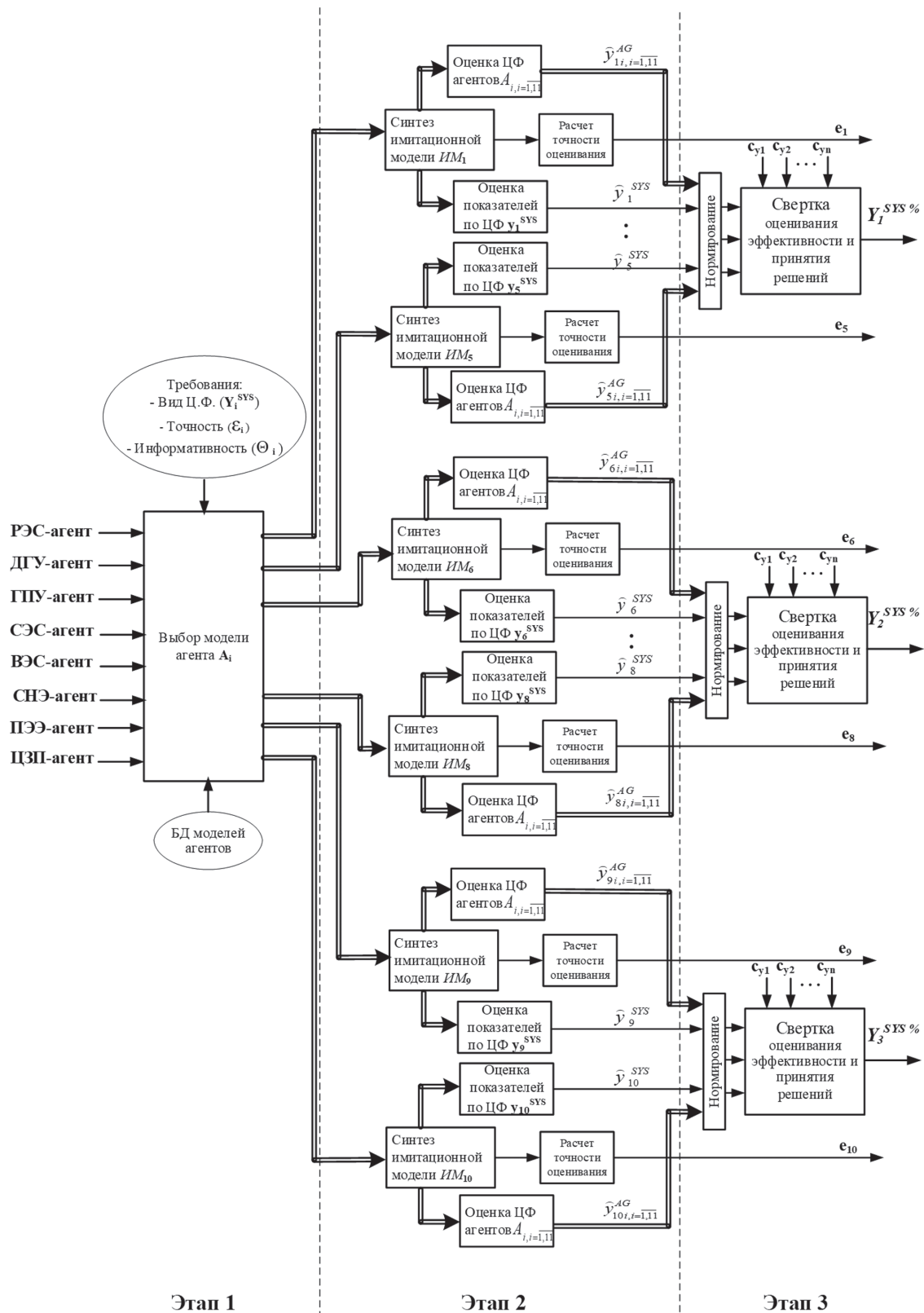


Рис. 3. Решение задачи оценивания эффективности функционирования микроэнергосистемы:

РЭС-агент — распределительная электрическая сеть; ДГУ-агент, ГПУ-агент — дизель-генераторная и газопоршневая установки; СЭС-агент, ВЭС-агент — солнечная и ветровая электростанции; СНЭ-агент — система накопления энергии; ПЭЭ-агент — спрос потребителя; ЦЗП-агент — спрос ценозависимого потребителя; ϵ_i , Θ_i — точность и 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} ; ИМ — имитационная модель; БД — база данных

$$MO^A \xleftrightarrow[\Theta_i]{\varepsilon_j} y_j^{SYS}$$

На втором этапе проведем синтез имитационной мультиагентной модели исследуемой системы с учетом специфики каждой ЦФ y_j^{SYS} , $j = 1 \dots 10$ из четырех групп критериев (см. табл. 2).

Показатели эффективности оценивают параллельно с расчетом точности оценивания e_j . В синтезированной мультиагентной модели описания отдельных агентов функционируют в условиях взаимодействия соответствующих моделируемых общесистемных процессов, что позволяет выполнить оценку их собственных ЦФ y_j^{AG} и решить задачи по самооптимизации и самонастройке (см. рис. 1).

Третий этап соответствует решению задачи получения численной оценки эффективности функциони-

рования микроэнергосистемы, сочетающей все три предложенных общесистемных критерия. По полученным оценкам показателей осуществляется расчет оценки соответствующих критериев эффективности для системы в целом Y_k^{SYS} , $k = 1 \dots 3$, 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

Проведем свертку многокритериальной задачи оценивания эффективности на основе fuzzy-моделей. Подобный подход позволяет преобразовать классическую задачу определения весовых коэффициентов для отдельных критериев, заменив ее на вывод единой ком-

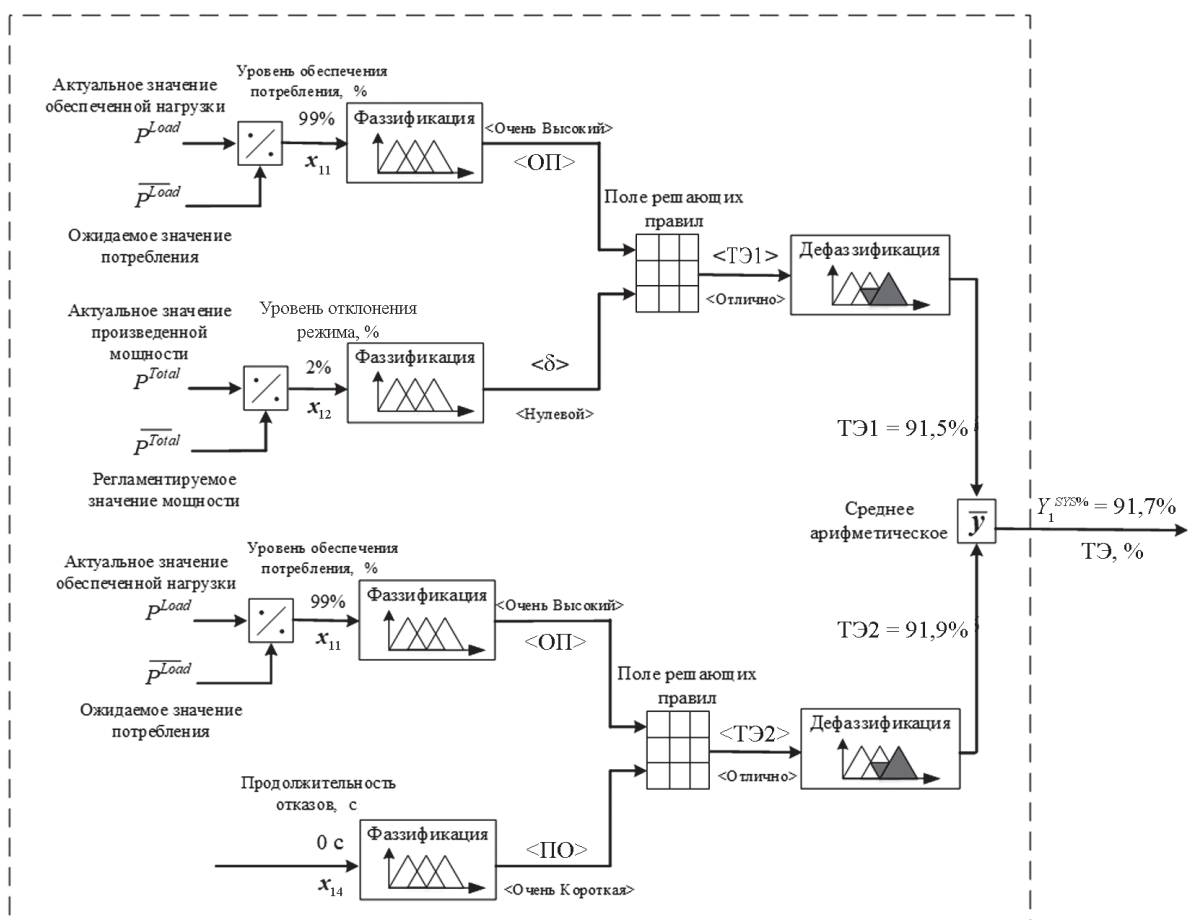


Рис. 4. Фрагмент модели свертки многокритериальной задачи оценивания технической эффективности (ТЭ):

<обеспечение потребления> ОП — уровень обеспечения потребления электроэнергии, связанный с производством энергии и управлением спросом, является показателем надежности процесса энергоснабжения в рамках системы; (производства энергии); <отклонение режима> δ — отклонение от номинального режима работы, определяющее отклонение выдаваемой мощности от прогнозируемой, является показателем наличия недостатков в функционировании субъектов микроэнергосистемы; <продолжительность отказов> ПО — продолжительность отказов в электроснабжении потребителей, отражающая часть показателей надежности процесса энергоснабжения; <прибыль> ПР — прибыль от продажи электрической энергии; <стоимость> C^{EN} — стоимость генерируемой электроэнергии; <цена> PR — цена для потребителя; <количество выбросов> KB — количество выбросов парниковых газов; <отклонение от доли ВИЭ> $\delta_{ВИЭ}$ — отклонение от ожидаемой доли энергии, произведенной из ВИЭ

бинации разнотипных и разноразмерных показателей в форме модели нечеткого логического вывода.

Основа для операции нечеткого логического вывода — решающие правила и функции принадлежности. Алгоритмы нечеткого вывода различаются, главным образом, видом используемых правил, логических операций и разновидностью метода дефазификации. В модели Мамдани значения выходных переменных задают нечеткими множествами, т. е. в композиции объединяются найденные усеченные функций, что ведет к получению итогового нечеткого подмножества для переменной выхода с функцией принадлежности, в отличие от других моделей, например, модели Сугено, где заключения правил вводят не нечеткими термами, а линейной функцией от входов, и модели Цукамото, где определяют четкие значения для каждого из исходных правил, и затем находят четкое значение переменной вывода. Указанное свойство модели Мамдани позволяет упрощать процесс вычисления в системе нечеткого логического вывода. Следует отметить, что существуют и другие модели, где также выделяют итоговое нечеткое подмножество с функцией принадлежности, как в модели Ларсена.

В настоящей работе использована модель Мамдани, как одна из наиболее распространенных и, в сравнении с другими подходами, позволяющая избежать большого объема вычислений при отсутствии жестких ограничений на точность получаемых результатов. При этом достигается достаточная прозрачность логического вывода.

Комплексная оценка эффективности позволяет определить ситуации, в которых решения принимаются

в виде управляющих команд и рекомендаций для повышения эффективности функционирования микроэнергосистемы, т. е. когда значение показателей эффективности ниже требуемого. На рисунке 4 в качестве примера дан фрагмент модели свертки многокритериальной задачи оценивания технической эффективности.

Заключение

Разработано унифицированное определение агента, применимое к анализу динамических систем, представляющих собой композицию из субъектов в виде непрерывных, дискретных и дискретно-событийных моделей и явлений. Показано представление агентов различных типов в предложенной формализации применительно к анализу микроэнергосистемы (MicroGrid), как типичного примера динамических систем указанного класса.

При оценке эффективности функционирования микроэнергосистемы введена модель свертки многокритериальной оптимизационной задачи. Ее реализация выполнена на основе теории нечетких множеств. Такое решение позволило преодолеть сложность определения приоритетности и получения расчетных весов для принимаемых критериев, что связано, главным образом, с разнородностью и разнонаправленностью сформулированных критериев и целевых функций. Предложенный комплекс моделей и алгоритмов позволяет перейти к решению задачи многокритериальной оптимизации функционирования MicroGrid при совместном изучении технических, экономических и экологических критериев.

Литература

1. **Leitao P., Marik V., Vrba P.** Past Present and Future of Industrial Agent Applications // *IEEE Trans. Ind. Information*. 2013. V. 9. No. 4. Pp. 2360—2372.
2. **SmartGrids SRA 2035** — Strategic Research Agenda: European Technology Platform SmartGrids. European Commission. Tech. Rep. Bruxelles, 2012. Pp. 20—27.
3. **Rohbogner G., Hahnel Ulf J.J., Benoit P., Fey S.** Multi-agent Systems' Asset for Smart Grid Applications // *Computer Sci. and Information Syst.* 2013. V. 10. Iss. 4. Pp. 1799—1822.
4. **McArthur S. e. a.** Multi-agent Systems for Power Engineering Applications. P. 1: Concepts, Approaches and Technical Challenges // *IEEE Trans. Power Syst.* 2007. V. 22. No. 4. Pp. 1743—1752.
5. **Kantamneni A., Brown L., Parker G., Weaver W.** Survey of Multi-agent Systems for MicroGrid Control // *Eng. Appl. Artificial Intelligence*. 2015. No. 45. Pp. 192—203.
6. **Abd Elraheem A.K., Shikhin V.A., Kouzalis A.** Optimization Problem Statement for Power Generation Management and Control in Multi-Agent Microid // *Proc. III Intern. Conf. Control Techn. Syst.* 2019. Pp. 176—179.

References

1. **Leitao P., Marik V., Vrba P.** Past Present and Future of Industrial Agent Applications. *IEEE Trans. Ind. Information*. 2013;9;4:2360—2372.
2. **SmartGrids SRA 2035** — Strategic Research Agenda: European Technology Platform SmartGrids. European Commission. Tech. Rep. Bruxelles, 2012:20—27.
3. **Rohbogner G., Hahnel Ulf J.J., Benoit P., Fey S.** Multi-agent Systems' Asset for Smart Grid Applications. *Computer Sci. and Information Syst.* 2013;10. Iss. 4: 1799—1822.
4. **McArthur S. e. a.** Multi-agent Systems for Power Engineering Applications. P. 1: Concepts, Approaches and Technical Challenges. *IEEE Trans. Power Syst.* 2007;22;4:1743—1752.
5. **Kantamneni A., Brown L., Parker G., Weaver W.** Survey of Multi-agent Systems for MicroGrid Control. *Eng. Appl. Artificial Intelligence*. 2015;45:192—203.
6. **Abd Elraheem A.K., Shikhin V.A., Kouzalis A.** Optimization Problem Statement for Power Generation Management and Control in Multi-Agent Microid. *Proc. III Intern. Conf. Control Techn. Syst.* 2019: 176—179.

7. **Marnay C. e. a.** MicroGrid Evolution Roadmap // Proc. Intern. Symp. Smart Electric Distribution Syst. and Technol. 2015. Pp. 139—144.
8. **Guerrero J.M. e. a.** Shipboard MicroGrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies // Proc. Intern. Exhibition and Conf. Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Shanghai, 2016. Pp. 1—8.
9. **Wang Y., Huang Y., Wang Y., Li F., Zhang Y., Tian C.** Operation Optimization in a Smart MicroGrid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response // Sustainability. 2018. No. 10. Pp. 847—872.
10. **Dulau L.I., Bica, D.** Optimization of Generation Cost in a MicroGrid // Procedia Manufacturing. 2018. No. 22. Pp. 703—708.
11. **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. V. 7. No. 3. Pp. 1268—1276.
12. **Minchala-Avila L.I., Garza-Castanon L.E., Vargas-Martinez A., Zhange Y.** Review of Optimal Control Techniques Applied to the Energy Management and Control of MicroGrids // Procedia Computer Sci. 2015. V. 52. Pp. 780—787.
13. **Dehghanpour K., Nehrir H.** Real-time Multiobjective MicroGrid Power Management Using Distributed Optimization in an Agent-Based Bargaining Framework // IEEE Trans. Smart Grid. 2017. V. 9. No. 6. Pp. 6318—6327.
14. **Peigen Tian, Xi Xiao, Kui Wang, Ruoxing Ding.** A Hierarchical Energy Management System Based on Hierarchical Optimization for MicroGrid Community Economic Operation // IEEE Trans. Smart Grid. 2016. V. 7. Iss. 5. Pp. 2230—2241.
15. **Постановление** Правительства РФ № 1401 от 19 декабря 2016 г. 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. **ГОСТ 32144—2013.** Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
17. **Абд Эльрахим А.К., Шихин В.А.** Оценка показателей эффективности функционирования энергообъектов в мультиагентной микроэнергосистеме // Автоматизация. Современные технологии. 2019. Т. 73. № 10. С. 449—460.
18. **Bertling L., Wallnerstrom C.J.** Exercises on Reliability Assessment of Electric Power Systems. Stockholm: Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, 2007.
7. **Marnay C. e. a.** MicroGrid Evolution Roadmap. Proc. Intern. Symp. Smart Electric Distribution Syst. and Technol. 2015:139—144.
8. **Guerrero J.M. e. a.** Shipboard MicroGrids: Maritime Islanded Power Systems Technologies. Proc. Intern. Exhibition and Conf. Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management. Shanghai, 2016:1—8.
9. **Wang Y., Huang Y., Wang Y., Li F., Zhang Y., Tian C.** Operation Optimization in a Smart MicroGrid in the Presence of Distributed Generation and Demand Response. Sustainability. 2018;10:847—872.
10. **Dulau L.I., Bica, D.** Optimization of Generation Cost in a MicroGrid. Procedia Manufacturing. 2018;22:703—708.
11. **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;7;3:1268—1276.
12. **Minchala-Avila L.I., Garza-Castanon L.E., Vargas-Martinez A., Zhange Y.** Review of Optimal Control Techniques Applied to the Energy Management and Control of MicroGrids. Procedia Computer Sci. 2015;52:780—787.
13. **Dehghanpour K., Nehrir H.** Real-time Multiobjective MicroGrid Power Management Using Distributed Optimization in an Agent-Based Bargaining Framework. IEEE Trans. Smart Grid. 2017;9;6:6318—6327.
14. **Peigen Tian, Xi Xiao, Kui Wang, Ruoxing Ding.** A Hierarchical Energy Management System Based on Hierarchical Optimization for MicroGrid Community Economic Operation. IEEE Trans. Smart Grid. 2016;7;5:2230—2241.
15. **Postanovlenie** Pravitel'stva RF № 1401 ot 19 Dekabrya 2016 g. O Kompleksnom Opredelenii Pokazateley Tekhniko-ekonomicheskogo Sostoyaniya Ob'ektov Elektroenergetiki, v tom Chisle Pokazateley Fizicheskogo Iznoisa i Energeticheskoy Effektivnosti Ob'ektov Elektrossetevogo Khozyaystva, i ob Osushchestvlenii Monitoringa Takikh Pokazateley. (in Russian).
16. **GOST 32144—2013.** Elektricheskaya Energiya. Sovmestimost' Tekhnicheskikh Sredstv Elektromagnitnaya. Normy Kachestva Elektricheskoy Energii v Sistemakh Elektrosnabzheniya Obshchego Naznacheniya. (in Russian).
17. **Abd El'rakhim A.K., Shikhin V.A.** Otsenka Pokazateley Effektivnosti Funktsionirovaniya Energoob'ektov v Mul'tiagentnoy Mikroenergosisisteme. Avtomatizatsiya. Sovremennye Tekhnologii. 2019;73;10:449—460. (in Russian).
18. **Bertling L., Wallnerstrom C.J.** Exercises on Reliability Assessment of Electric Power Systems. Stockholm: Royal Institute of Technology, School of Electrical Engineering, 2007.

19. **EPA** Air Pollution Control Cost Manual. North Carolina: Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, 2002.

20. **Erdogdu E.** The Impact of Power Market Reforms on Electricity Price-Cost Margins and Cross-Subsidy Levels: a Cross-Country Panel Data Analysis // Energy Policy. 2011. V. 39(3). Pp. 1—35.

19. **EPA** Air Pollution Control Cost Manual. North Carolina: Office of Air Quality Planning and Standards Research Triangle Park, 2002.

20. **Erdogdu E.** The Impact of Power Market Reforms on Electricity Price-Cost Margins and Cross-Subsidy Levels: a Cross-Country Panel Data Analysis. Energy Policy. 2011;39(3):1—35.

Сведения об авторах:

Абд Эльрахим Амин Камаль — аспирант кафедры управления и интеллектуальных технологий НИУ «МЭИ», e-mail: aminkamal90@hotmail.com

Шихин Владимир Анатольевич — кандидат технических наук, доцент кафедры управления и интеллектуальных технологий НИУ «МЭИ», e-mail: ShikhinVA@mpei.ru

Information about authors:

Abd Elraheem Amin Kamal — Ph.D-student of Control and Intelligent Technologies Dept., NRU MPEI, e-mail: aminkamal90@hotmail.com

Shikhin Vladimir A. — Ph.D. (Techn.), Assistant Professor of Control and Intelligent Technologies Dept., NRU MPEI, e-mail: ShikhinVA@mpei.ru

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 21.10.2020

The article received to the editor: 21.10.2020