МОДЕЛИРОВАНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ В ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

УДК 621.311, 621.331 DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-56-65

Мультиагентные технологии управления в системах электроснабжения магистральных железных дорог

Ю.Н. Булатов[1 a], А.В. Крюков[2, 3 b], А.П. Куцый[2 c]

[1]Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[2]Иркутский государственный университет путей сообщения, ул. Чернышевского 15, Иркутск, Россия
[3]Иркутский национальный исследовательский технический университет, ул. Лермонтова 83, Иркутск, Россия
[a]bulatovyura@yandex.ru, [b]and_kryukov@mail.ru, [c]tosha1993irc@yandex.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-3716-5357, [b]https://orcid.org/0000-0001-6543-1790,
[c]https://orcid.org/ 0000-0002-7878-7400
Статья поступила 15.01.2018, принята 26.01.2018

В статье рассмотрены вопросы применения мультиагентных технологий для управления системой электроснабжения магистральной железной дороги с тяговой сетью переменного тока. В исследованиях использовались методы моделирования режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) и систем электроснабжения железных дорог в фазных координатах, разработанные в Иркутском государственном университете путей сообщения. В основу методов положены модели элементов ЭЭС в виде решетчатых схем, имеющих полносвязную топологию. Методика моделирования реализована на базе программного комплекса Fazonord, предназначенного для моделирования режимов ЭЭС и систем тягового электроснабжения. Кроме того, использовалась модель, созданная на основе программной платформы мультиагентного моделирования AnyLogic. По результатам имитационного моделирования определены параметры эффекторов, в качестве которых выступали регулируемые источники реактивной мощности. С использованием разработанной модели на базе платформы AnyLogic проведена серия экспериментов, позволивших оценить эффективность взаимодействия агентов при вариации мощностей установок распределенной генерации. Полученные результаты показали значительное улучшение качества процессов управления при использовании мультиагентных технологий. Достигнуто заметное сокращение времени регулирования и величины перерегулирования. Результаты проведенных исследований позволили сформулировать следующие выводы: на основе мультиагентного подхода возможно эффективное решение сложной задачи управления электроснабжением магистральной железной дороги; параметры эффекторов мультиагентной системы управления могут быть определены на основе методов моделирования в фазных координатах; применение мультиагентного подхода дает возможность значительно улучшить качество процессов управления установками распределенной генерации, которые могут использоваться для электроснабжения нетяговых и нетранспортных потребителей железных дорог.

Ключевые слова: системы электроснабжения железных дорог; мультиагентные технологии управления режимами; моделирование.

Multi-agent control technologies in power systems of main railways

Yu.N. Bulatov[1 a], A.V. Kryukov[2, 3 b], A.P. Kucij[2 c]

[1]Bratsk State University; 40, Makarenko St., Bratsk, Russia
[2]Irkutsk State Transport University; 15, Chernyshevsky St., Irkutsk, Russia
[3]Irkutsk National Research Technical University; 83, Lermontov St., Irkutsk, Russia
[a]bulatovyura@yandex.ru, [b]and_kryukov@mail.ru, [c]tosha1993irc@yandex.ru
[a]https://orcid.org/0000-0002-3716-5357, [b]https://orcid.org/0000-0001-6543-1790,
[c]https://orcid.org/ 0000-0002-7878-7400
Received 15.01.2018, accepted 26.01.2018

In the article the questions of application multi-agent technologies for control of power supply system of the main railway with traction network of alternating current are considered. The research used methods of modeling the modes of electric power systems (EPS) and power supply systems of railways in phase coordinates, developed at the Irkutsk State Transport University. The methods are based on the models of EPS elements in the form of lattice circuits with a fully connected topology. The modeling technique is implemented on the basis of the Fazonord software complex, designed for modeling EPS modes and traction power supply systems. In addition, a model based on the AnyLogic multi-agent modeling software platform was used. Based on the results of simulation, the parameters of the effectors were determined, which were regulated sources of reactive power. Using the developed model on the basis of the AnyLogic platform, a series of experiments was performed, which made it possible to evaluate the effectiveness of the interaction of agents with a variation in the power of distributed generation units. The obtained results showed a significant improvement in the quality of control *processes when using multi-agent technologies. A significant reduction in the regulation time and overshoot has been achieved. The results of the conducted studies allowed us to formulate the following conclusions: on the basis of the multi-agent approach, the complex task of managing the electricity supply of the main railway can be effectively solved; the parameters of the effectors of the multi-agent control system can be determined on the basis of modeling methods in phase coordinates; the use of multi-agent approach makes it possible to significantly improve the quality of control processes for distributed generation plants that can be used to power non-traction and non-transport consumers.*

Keywords: railroad power supply systems; multi-agent control technologies; simulation.

Введение

Объекты, обеспечивающие электроснабжение магистральной железной дороги, образуют сложную техническую систему, формализованное описание, а тем более моделирование которой затруднены из-за значительной размерности и большого числа взаимосвязанных параметров. В состав этой системы входят следующие объекты: контактная сеть (КС) протяженностью более тысячи километров; десятки тяговых подстанций (ТП), включающих огромное количество электрических аппаратов различного назначения; сети связи и телемеханики и целый ряд других устройств. Система электроснабжения железной дороги (СЭЖД) характеризуется стохастическим множеством состояний и сложными взаимодействиями с окружающей средой.

СЭЖД представляет собой объединение трех сложных подсистем: сегмент электроэнергетической системы (ЭЭС), электрические сети которого примыкают к ТП; система тягового электроснабжения (СТЭ), которая может иметь тяговые сети (ТС) 25 кВ или 2×25 кВ; районы электроснабжения (РЭС) нетяговых и нетранспортных потребителей.

Функциональное назначение СЭЖД состоит в бесперебойном электроснабжении тяги поездов и инфраструктурных объектов транспорта при соблюдении следующих требований: достижение максимальной эффективности и минимума затрат на производство, передачу и распределение электроэнергии (ЭЭ); обеспечение необходимой надежности электроснабжения и нормативных показателей качества ЭЭ.

Особенности функционирования СЭЖД. Особенности функционирования СЭЖД, отличающие ее от систем электроснабжения общего назначения, можно разделить на структурные и режимные. Структурными особенностями являются:

- значительная протяженность, так как магистральная железная дорога проходит, как правило, по территории нескольких регионов, и общая длина ТС сети может достигать нескольких тысяч километров;
- структурная разнородность, вызванная тем, что ЭЭС и РЭС образуют трехфазные электрические сети различного напряжения, а СТЭ построена на основе однофазной сети напряжением 25 или 2х25 кВ.

Режимные особенности связаны со следующими факторами:

- потоки активной и реактивной мощностей имеют значительные вариации и пульсирующий характер;
- основные потребители ЭЭ (электровозы) перемещаются в пространстве;
- токи на вводах тяговых подстанций характеризуются значительной несимметрией и несинусоидальностью;
- несбалансированная тяговая сеть создает существенные электромагнитные поля.
- линии электропередачи и связи, а также протяженные металлические конструкции, проложенные вблизи тяговой сети, подвержены электромагнитному влиянию ТС.

Из-за электрического влияния на проводах ЛЭП 6-10-35 кВ с изолированной нейтралью появляется напряжение нулевой последовательности, а также увеличиваются погрешности учета электрической энергии для потребителей, которые получают питание от специализированных ЛЭП «провод – рельс» и «два провода – рельс». Напряжение магнитного влияния имеет значительные гармонические искажения; при этом величина результирующего напряжения высших гармонических составляющих соизмерима по амплитуде с наведенным напряжением первой гармоники.

Отмеченные особенности СЭЖД необходимо учитывать при разработке методов управления режимами.

Характеристика мультиагентной системы управления СЭЖД. Новые и более эффективные подходы к управлению режимами СЭЖД могут быть реализованы на основе применения мультиагентных технологий [1–13], в которых управляющие реакции формируются в результате взаимодействия отдельных агентов, представляющих собой программно-аппаратные модули с развитой архитектурой.

Взаимодействующие агенты, образующие мультиагентную систему управления (МАСУ), должны обладать следующими характеристиками [5; 11; 12]:

- агенты являются автономными, т. е. обладают определенной независимостью;
- объект управления достаточно сложен, и полное знание о нем не имеет практического значения для агента; поэтому отдельный агент не обладает полной информацией как об объекте управления, так и об окружающей среде;
- в отличие от централизованных иерархических систем в МАСУ не имеется агентов, которые осуществляют управление всем объектом.

Указанные характеристики, даже при простых стратегиях отдельных агентов, обеспечивают реализацию в МАСУ свойств самоорганизации и сложного поведения. Информацию об объекте управления и внешней среде мультиагентная система получает с помощью датчиков и каналов связи. После обработки данных вырабатываются воздействия на исполнительные элементы — эффекторы.

Структурная схема МАСУ СЭЖД показана на рис. 1, схема взаимодействия агентов — на рис. 2.

Цель управления режимами СЭЖД состоит в бесперебойном электроснабжении тяги поездов и объектов, обеспечивающих процессы перевозок. Реализация этой цели требует решения следующих задач:

• обеспечение уровней напряжения на токоприемниках электровозов, не выходящих за нормативные пределы;

• максимально возможное снижение уравнительных токов в ТС, а также потерь электроэнергии в СТЭ и РЭС;

• соответствие нормативным требованиям показателей качества электроэнергии на шинах 110-220 кВ ТП, а также на зажимах электроприемников РЭС.

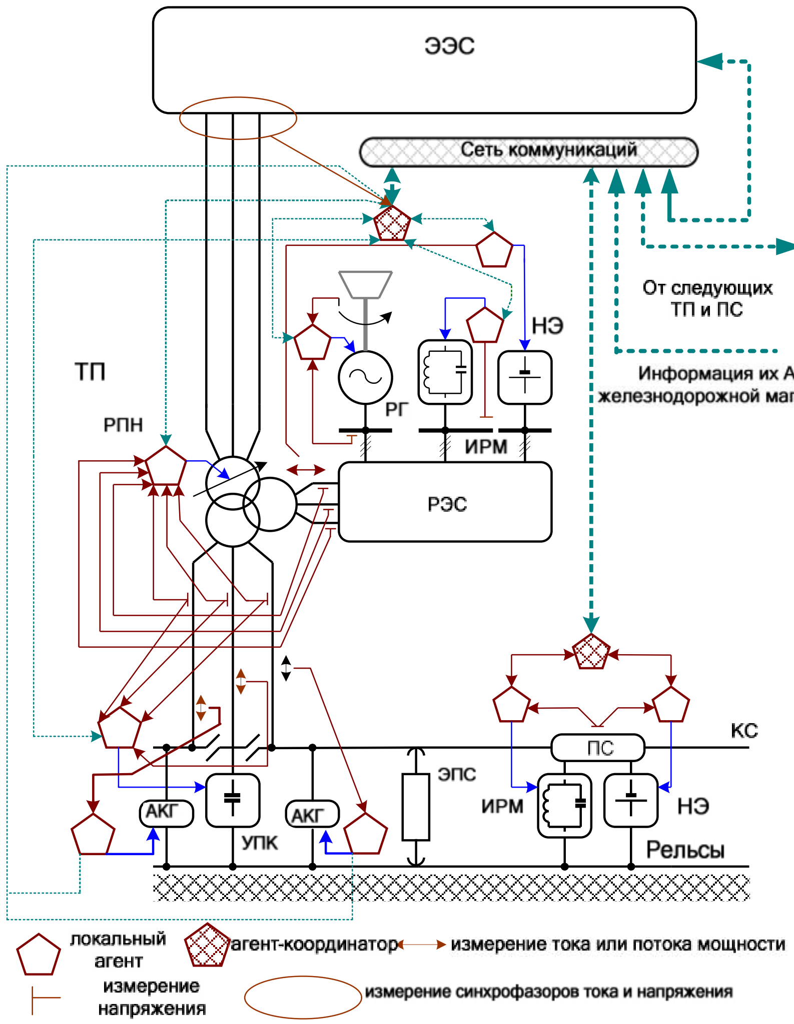


Рис. 1. Структурная схема МАСУ: АКГ — активный кондиционер гармоник; ИРМ — управляемый источник реактивной мощности; КС — контактная сеть; НЭ — накопитель энергии; ПС — пост секционирования; РГ — установка распределенной генерации; РПН — регулятор напряжения под нагрузкой; УПК — управляемая установка продольной компенсации; КС — контактная сеть; ЭПС — электроподвижной состав

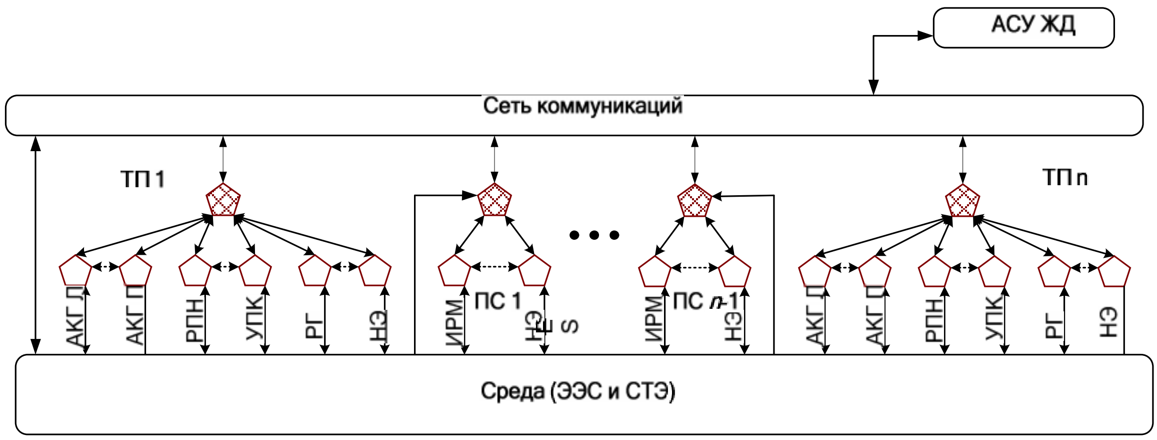


Рис. 2. Схема взаимодействия агентов

Для целей МАСУ СЭЖД можно использовать следующую формализованную запись:

$$U_i^{(ers)} \in D_{Uers};$$

$$\left\|\mathbf{I}_{LC}\right\| \to \min;\ \Delta P \to \min;$$

$$\mathbf{IQEP} \in \mathbf{D}_{IQEP},$$

где $U_i^{(ers)}$ — напряжение на токоприемнике *i*-го поезда, *кВ*; D_{Uers} = 21…29 кВ; I_{LC} — вектор модулей уравнительных токов, *А*; ΔP — потери мощности, *МВт*; **IQEP** — вектор показателей качества электроэнергии; $\mathbf{D}_{IQEP}$ — допустимая область для ПКЭ, определяемая по таблицам ГОСТ 32144–2013.

Для того, чтобы агент мог осуществлять целенаправленное поведение, необходимо оснащение МАСУ специальными устройствами:

- рецепторами, воспринимающими воздействия, приходящие из внешней среды;
- эффекторами, воздействующими на объект управления.

На схемах, показанных на рис. 1 и 2, рецепторами являются средства измерений, позволяющие определять синхрофазоры токов и напряжений, а также потоки активных и реактивных мощностей [14]. К эффекторам можно отнести активные кондиционеры гармоник, накопители энергии, регуляторы установок РГ, источники реактивной мощности и т. д.

Определение параметров эффекторов. Первый этап создания МАСУ требует наличия инструментов, которые позволяют определять параметры эффекторов, а также точки их рационального подключения к сетям СЭЖД. Такие инструменты могут быть реализованы на базе методов моделирования СЭЖД, предложенных в работе [15].

Ниже в качестве примера рассмотрено применение этих методов для определения параметров эффекторов в виде регулируемых источников реактивной мощности. Моделирование проводилось для схемы СЭЖД, включающей четыре ТП с тремя межподстанционными зонами (МПЗ), которые были оснащены постами секционирования (ПС). Вычислительные эксперименты проводились с помощью программного комплекса Fazonord [15] для шести вариантов использования ИРМ, представленных в табл. 1. Для сравнения проведено моделирование СЭЖД при отключенных источниках реактивной мощности. Принципиальная схема фазы ИРМ показана на рис. 3*а*. Однофазные ИРМ подключались на ПС между ТП2 и ТП3, а также на районных обмотках (РО) 10 кВ тяговых трансформаторов этих подстанций (рис. 3*б*).

Моделировалось движение 10 грузовых поездов весом 5 000 т в четном и нечетном направлениях с интервалом в 35 мин. Результаты сведены в табл. 2 и проиллюстрированы на рис. 4, 5.

Таблица 1

Варианты установки ИРМ

Вариант	Цель регулирования	Пределы изменения реактивной мощности (на фазу), *Мвар*	
		Районные обмотки 10 кВ	Пост секционирования
1	–	–	–
2	*U* = const	–	–10…10
3	*U* = const	–5…5	–
4	*U* = const	–5…5	–10…10
5	*U* = const	0…5	0…10
6	*Q* = const	5	10
7	Нерегулируемые ИРМ в виде батареи конденсаторов	Емкость батареи 433 мкФ на фазу	Емкость батареи 51 мкФ

Таблица 2

Результаты моделирования

Номер варианта	*U*, кВ			Δ*U*, %			k_{2U}, %	
	Min	Mid	Max	Min	Mid	Max	ТП2	ТП3
1	14,6	23,4	27,3	*–30,11*	–5,88	2,9	0,6	0,6
2	19,3	24,1	27,3	*–20,01*	–4,61	2,1	0,5	0,5
3	18,0	24,4	27,2	*–17,01*	–2,01	0,1	0,4	0,4
4	**20,7**	**24,8**	**27,2**	***–13,16***	**–4,11**	**0,0**	**0,3**	**0,3**
5	**21,1**	**24,8**	**27,3**	***–12,83***	**–0,82**	**3,6**	**0,3**	**0,4**
6	21,6	26,1	31,3	–8,68	5,7	*13,7*	0,5	0,6
7	21,7	26,7	34,2	–9,42	8,1	*19,3*	0,6	0,7

Примечания. *U* — напряжения на токоприемниках; Δ*U* — отклонение напряжения на районных обмотках; k_{2U} — среднее значение коэффициента несимметрии на шинах 220 кВ ТП. Подчеркиванием выделены неприемлемые, а курсивом — нежелательные параметры, жирным шрифтом — лучшие варианты.

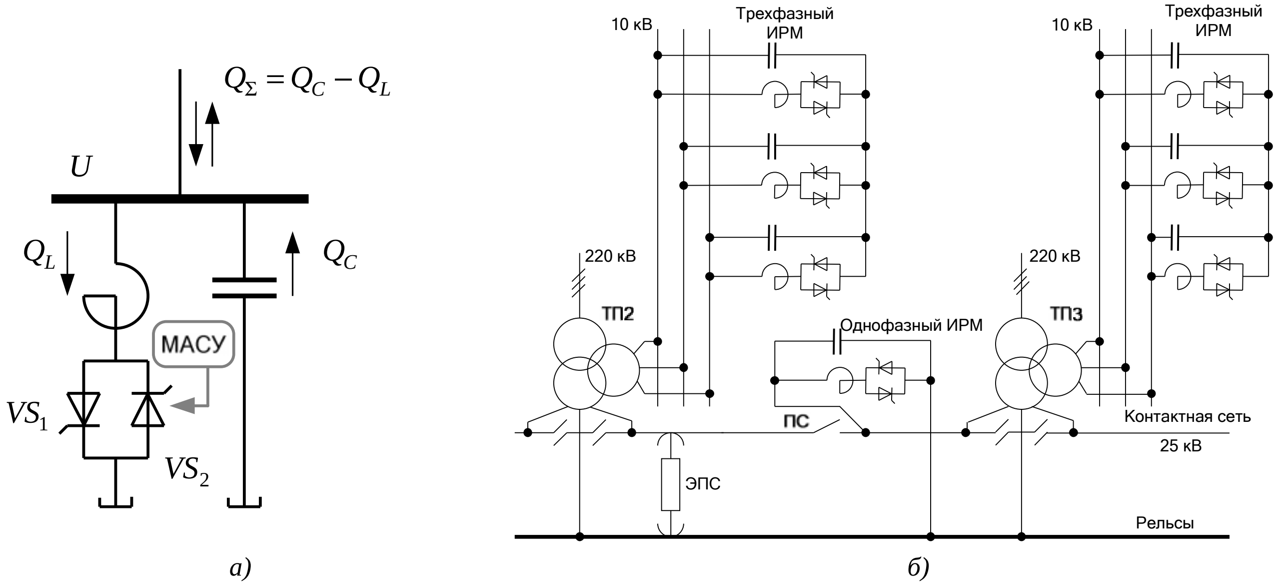


Рис. 3. ИРМ, управляемый тиристорами, и фрагмент схемы СТЭ: *а* — схема ИРМ; *б* — фрагмент схемы СТЭ

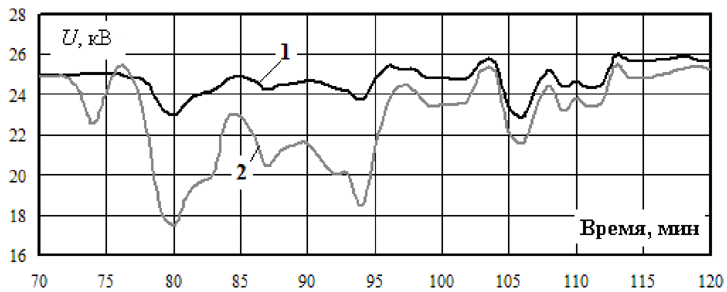


Рис. 4. Зависимость напряжения на токоприемнике от времени для поезда 1: 1 — включены ИРМ по варианту 4; 2 — ИРМ отключены

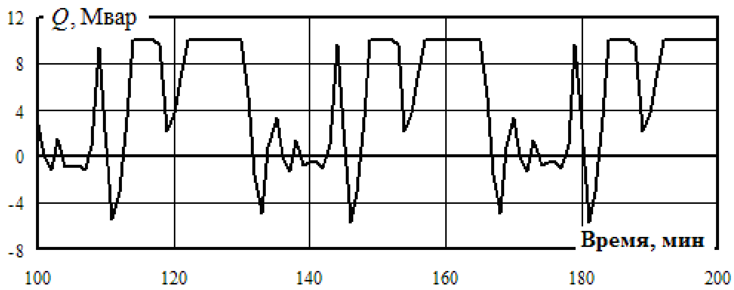


Рис. 5. Зависимость реактивной мощности ИРМ, установленного на ПС, от времени для варианта 4

Анализ данных, полученных в результате многовариантного моделирования, позволил сформулировать следующие выводы:

• приемлемый уровень напряжений в тяговой сети и на районных обмотках не удается обеспечить при отсутствии ИРМ;

• при наличии нерегулируемых ИРМ имеет место сверхнормативное повышение напряжений на токоприемниках; аналогичный негативный эффект наблюдается при использовании регулируемых ИРМ, обеспечивающих стабилизацию генерируемой реактивной мощности (Q = const);

• приемлемые уровни напряжений на токоприемниках ЭПС и зажимах нетяговых потребителей могут быть обеспечены только при размещении эффекторов на районных обмотках и постах секционирования ТС;

• лучший результат достигается при подключении регулируемых источников, обеспечивающих выполнение условия U = const и размещенных на РО и ПС (рис. 4, 5);

• силовые элементы трехфазных ИРМ можно соединять по схемам звезды или треугольника; при этом схема соединения практически не влияет на режим СЭЖД.

МАСУ для установок распределенной генерации. В качестве примера применения мультиагентных технологий рассмотрена МАСУ (рис. 6) для установок распределенной генерации, размещенных в РЭС.

Рецепторами в предлагаемой системе являются измерители электрических и механических параметров, а также анализаторы показателей качества электроэнергии. В качестве эффекторов используются автоматические регуляторы возбуждения (АРВ) и частоты вращения (АРЧВ) синхронных генераторов установок РГ. Основные агенты в системе взаимозаменяемы, что обеспечивает высокую живучесть.

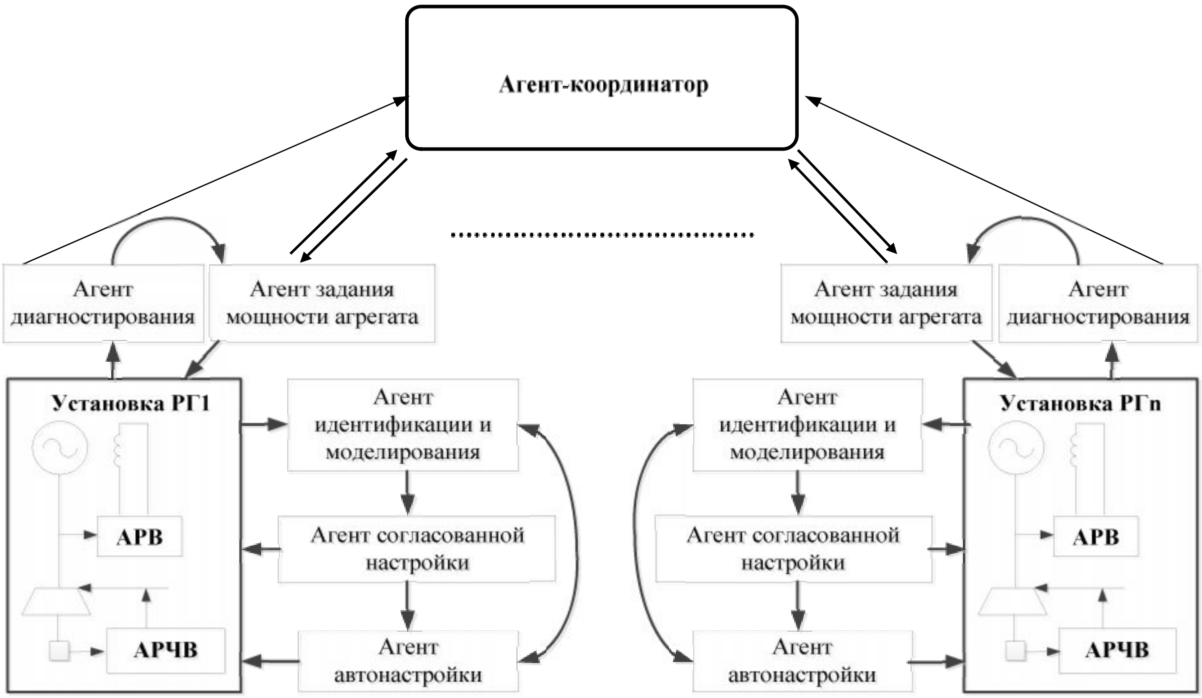


Рис. 6. Структура МАСУ для установок РГ: АРВ — автоматический регулятор возбуждения; АРЧВ — автоматический регулятор частоты вращения

Агент-координатор формирует графики нагрузок агрегатов, на основе которых дает команды агентам задания мощности (АЗМ). Кроме того, он принимает сообщения, посылаемые АЗМ и агентами диагностирования, путем анализа которых может корректировать задания для АЗМ. Агент-координатор имеет сегменты, которые интерпретируются как агенты:

– *агент прогнозирования*, осуществляющий прогноз графиков нагрузки и определение потерь мощности в сети;

– *агент оптимизации генерации*, выполняющий расчет оптимальной загрузки отдельных установок РГ;

– *агент рынка электроэнергии*, назначение которого состоит в формировании тарифов на отпускаемую установками РГ электроэнергию.

Назначение *агента диагностирования* состоит в контроле ряда параметров РГ; при выходе их за допустимые пределы агенту-координатору и АЗМ посылаются соответствующие сообщения.

Агент задания мощности на основе команд, посылаемых агентом-координатором, регулирует подачу энергоносителя. При необходимости он может корректировать задание, сообщая об этом агенту-координатору. АЗМ ограничивает мощность агрегата при поступлении соответствующего сообщения от агента диагностирования.

Агент идентификации и моделирования выполняет следующие вычислительные процедуры:

• при изменении режима работы агрегата проводит идентификацию путем выделения шума регуляторов на основе вейвлет-преобразования [16];

• построение на основе идентификации модели для определения оптимальных настроек АРВ и АРЧВ.

Полученные результаты направляются агентам согласованной настройки и автонастройки.

Агент согласованной настройки с помощью модели, полученной агентом идентификации и моделирования, определяет оптимальную настройку АРВ и АРЧВ с применением генетического алгоритма [17; 18] и посылает значения коэффициентов настройки агенту автонастройки.

Алгоритм функционирования *агента автонастройки* построен с использованием технологии нечетких систем управления [8; 19]. Основные функции агента автонастройки состоят в следующем: формирование базы знаний; проверка настроек регуляторов на виртуальной модели с помощью агента идентификации и моделирования; изменение текущих настроек АРВ и АРЧВ.

МАСУ может работать в условиях неопределенности и является самоорганизующейся системой, в которой агенты способны анализировать не предписанные заранее ситуации и инициировать диалог для выработки наиболее рационального решения.

АЗМ имеет эффектор, позволяющий изменять активную мощности генератора, а агент диагностирования оснащен рецепторами для измерения контролируемых параметров. Передача информации между агентами осуществляется по сети, образованной каналами связи.

Моделирование предлагаемой МАСУ выполнялось в системе AnyLogic [20] по системе дифференциальных уравнений, описанных в работах [5; 12]. Рассматривалась наиболее тяжелая ситуация при отключении связей РЭС с ТП.

Структура модели установки РГ с АРВ и АРЧВ, разработанная с помощью библиотеки системной динамики платформы AnyLogic, а также связи агентов показаны на рис. 7. Окружностями обозначены динамические переменные, которые могут изменяться в процессе моделирования, квадратами — накопители, позволяющие реализовать процесс дифференцирования.

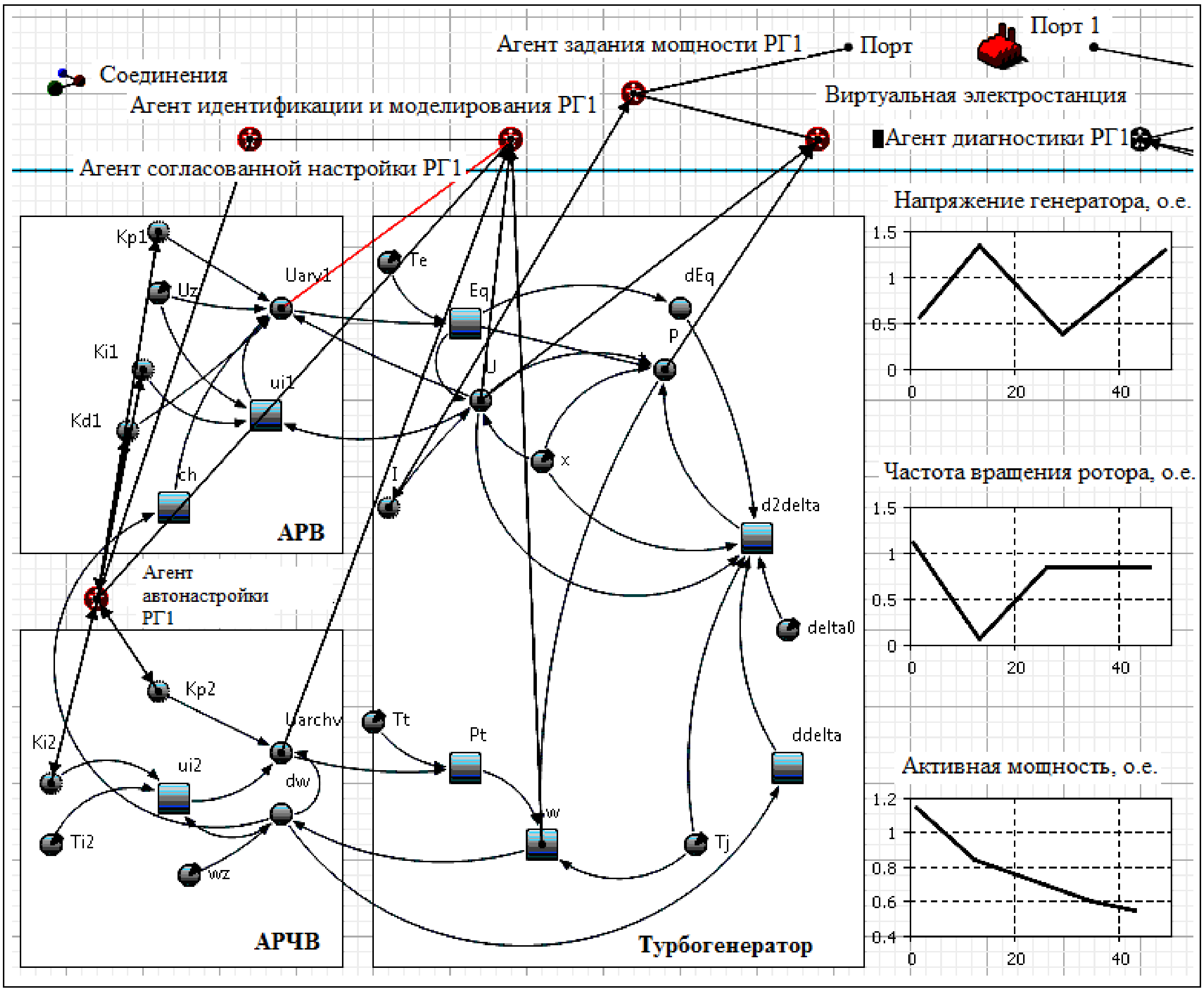


Рис. 7. Фрагмент модели МАСУ в системе AnyLogic

Модели агентов рассматриваемой системы функционируют в соответствии с приведенным выше описанием. В качестве примера на рис. 8 представлена структура модели агента-координатора, определяющая алгоритм его работы. Этот агент характеризуется динамическими переменными (*P*1 и *P*2), определяющими мощности установок РГ. Алгоритм вычисления *P*1 и *P*2 соответствует диаграмме состояний и реализуется через агенты прогнозирования, а также оптимизации генерации и рынка электроэнергии. Агент-координатор может изменять свое состояние и задания по мощности для установок РГ при получении сообщений от других агентов или в соответствии с заданным графиком нагрузки. Для этого он оснащен портами связи и сетью соединений. Элемент *event* имитирует появление какого-либо события, кардинально изменяющего поведение агентов МАСУ (см. рис. 8). Например, это может быть вызвано срабатыванием устройств релейной защиты или значительным ухудшением показателей качества электроэнергии.

Для определения эффективности взаимодействия агентов был выполнен эксперимент при изменении мощности одной из установок РГ. От агента-координатора была отправлена команда АЗМ для вариации активной мощности. Положительный ответ агента диагностирования позволил изменить этот параметр режима, далее агент автонастройки уточнил коэффициенты настройки регуляторов. Результаты моделирования приведены на рис. 9.

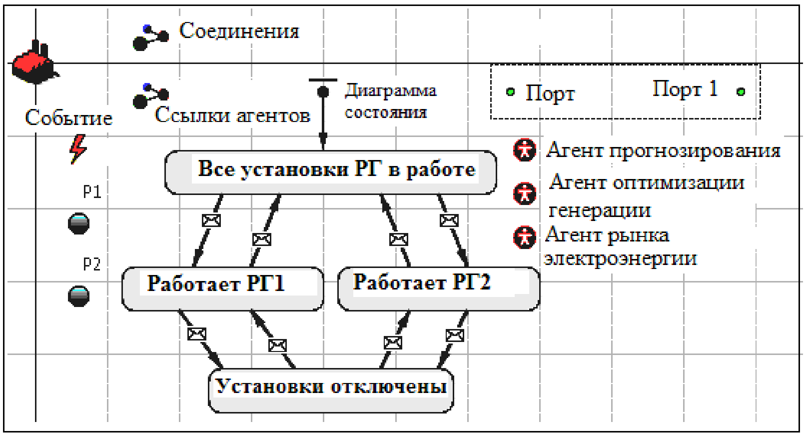
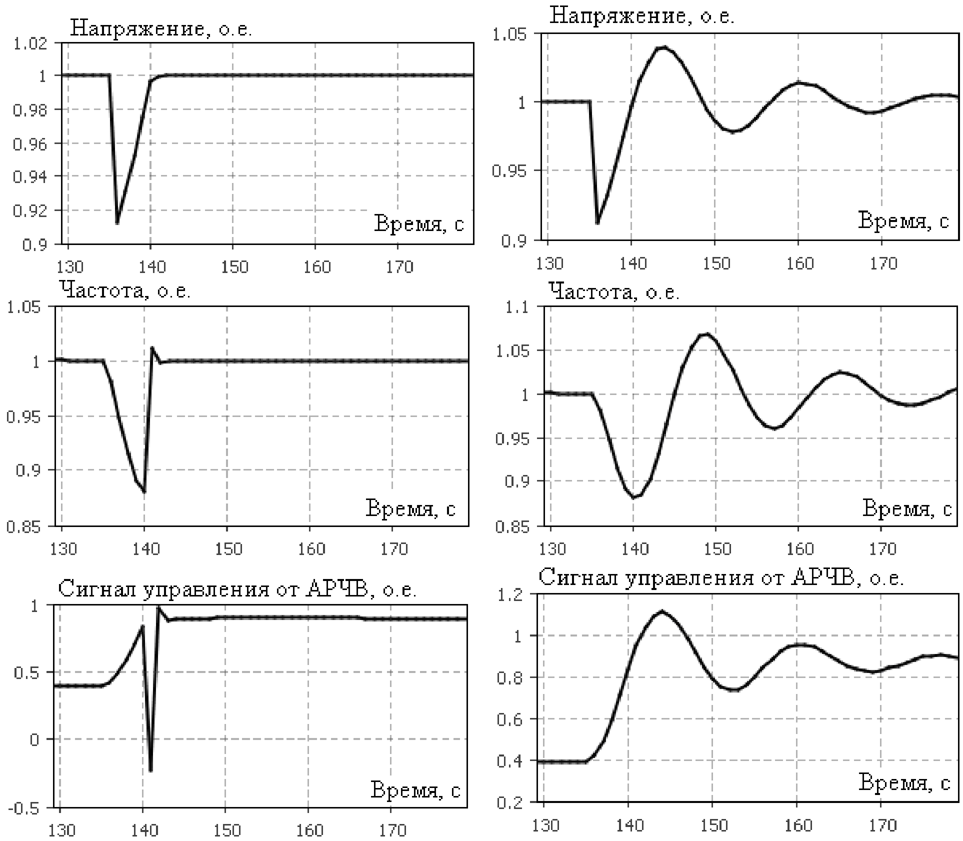


Рис. 8. Структура агента-координатора



а) *б)*

Рис. 9. Результаты моделирования: *а* — при работе МАСУ; *б* — при выключенной МАСУ

Положительный эффект МАСУ состоит в значительном снижении времени регулирования и величины перерегулирования напряжения и частоты (рис. 9). Ожидание заметного изменения мощности установки РГ приводит к небольшому запаздыванию вариации настроек. Необходимо также отметить, что резкого изменения управляющего сигнала АРЧВ можно избежать, если уменьшить величину вариации мощности генератора, при которой происходит изменение коэффициентов настройки регуляторов.

Заключение

На основе полученных результатов могут быть сформулированы следующие выводы.

1. На основе мультиагентных технологий можно решить сложную задачу управления электроснабжением магистральной железной дороги.

2. С помощью методов имитационного моделирования СЭЖД возможно определить параметры эффекторов мультиагентной системы управления.

3. Применение мультиагентных технологий для управления установками распределенной генерации РЭС обеспечивает значительное улучшение качества переходных процессов в системе.

Литература

1. Clark W. Gellings The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response. Published by The Fairmont Press, 2009. P. 300.

2. Morzhin Yu.I., Shakaryan Yu.G., Kucherov Yu.N. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia. CD. Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011, Manchester Dec. 5-7 2011. Manchester, GB: IEEE, The University of Manchester, 2011. Panel session 5D. С. 1-5.

3. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Intelligent Traction Power Supply System // The power grid of the future. Proceeding № 2. Otto–von–Guericke University Magdeburg. Magdeburg, 2013. P. 44–48.

4. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski. Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.

5. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Мультиагентная система управления установками распределённой генерации // Изв. высш. учеб. заведений. Проблемы энергетики. 2015. № 11-12. С. 97-107.

6. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Черепанов А.В. Интеллектуальные технологии управления качеством электроэнергии. Иркутск: Изд-во ИрНИТУ, 2015. 218 с.

7. Gerasimos R. Intelligent Renewable Energy Systems. Modelling and Control. Springer, 2016. P. 542.

8. Булатов Ю.Н. Интеллектуальные системы управления установками распределенной генерации // Вестн. Иркут. гос. техн. ун-та. 2017. Т. 21, № 10. С. 78–94.

9. Инновационная электроэнергетика – 21 / под ред. В.М. Батенина, В.В. Бушуева, Н.И. Воропая. М.: ИЦ «Энергия», 2017. 584 с.

10. Kryukovf A.V., Kargapol'cev S.K., Bulato Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation // Far East Journal of Electronics and Communications. 2017. Vol. 17, № 5. P. 1127-1140.

11. Bulatov Yu. N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Multi-agent technologies for control of distributed generation plants in the isolated power systems // Far East Journal of Electronics and Communications. 2017. Vol. 17, №. 5. P. 1197-1212.

12. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. A multi-agent control system of distributed generation plants // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017. IEEE Conference Publications. 2017. P. 1-7.

13. Wang R., Wang P., Xiao G. Intelligent Microgrid Management and EV Control Under Uncertainties in Smart Grid. Springer. 2018. P. 218.

14. Закарюкин В.П., Крюков А.В., Кушов А.А., Шульгин М.С. Определение параметров элементов электроэнергетических систем по данным измерений. Иркутск: ИрГУПС, 2015. 184 с.

15. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Методы совместного моделирования систем тягового и внешнего электроснабжения железных дорог переменного тока. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 170 с.

16. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Применение вейвлет-преобразования и генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации // Науч. вестн. Новосиб. гос. техн. ун-та. 2016. Т. 63, № 2. С. 7-22.

17. Bulatov Yu. N., Kryukov A.V. Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE Conference Publications. 2016. P. 1-6.

18. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Применение генетических алгоритмов для настройки автоматических регуляторов установок распределенной генерации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2016. № 2. С. 30-45.

19. Булатов Ю.Н., Крюков А.В. Интеллектуальная настройка регуляторов установок распределенной генерации // Информационные и математические технологии в науке и управлении. 2017. № 3 (7). С. 122-135.

20. Инструмент имитационного моделирования AnyLogic [Электронный ресурс] // AnyLogic: сайт. URL. http://www.anylogic.ru/ (дата обращения: 08.01.2018).

References

1. Clark W. Gellings. The Smart Grid: Enabling Energy Efficiency and Demand Response. Published by The Fairmont Press, 2009. P. 300.

2. Morzhin Yu.I., Shakaryan Yu.G., Kucherov Yu.N. Smart Grid Concept for Unified National Electrical Network of Russia. CD. Preprints of proceedings of IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe 2011, Manchester Dec. 5-7 2011. Manchester, GB: IEEE, The University of Manchester, 2011. Panel session 5D. P. 1-5.

3. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Intelligent Traction Power Supply System // The power grid of the future. Proceeding № 2. Otto–von–Guericke University Magdeburg. Magdeburg, 2013. P. 44-48.

4. Bernd M. Buchholz, Zbigniew A. Styczynski. Smart Grids - Fundamentals and Technologies in Electricity Networks // Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2014. 396 p.

5. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Distributed generation plants multi-agent controlling system // Proceedings of the higher educational institutions. Energy Sector Problems. 2015. № 11-12. P. 97-107.

6. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Cherepanov A.V. Intelligent technologies of power quality management. Irkutsk: Izd-vo IrNITU, 2015. 218 p.

7. Gerasimos R. Intelligent Renewable Energy Systems. Modelling and Control. Springer, 2016. P. 542.

8. Bulatov Yu.N. Intelligent control systems for distributed generation plants // Bulletin of Irkutsk State Technical University. 2017. T. 21, № 10. P. 78-94.

9. Innovative electric power industry - 21 / pod red. V.M. Batenina, V.V. Bushueva, N.I. Voropaya. M.: ITs «Energiya», 2017. 584 p.

10. Kryukov A.V., Kargapol'cev S.K., Bulato Yu.N., Skrypnik O.N., Kuznetsov B.F. Intelligent control of the regulators adjustment of the distributed generation installation // Far East Journal of Electronics and Communications. 2017. Vol. 17, № 5. P. 1127-1140.

11. Bulatov Yu. N., Kryukov A.V., Suslov K.V. Multi-agent technologies for control of distributed generation plants in the isolated power systems // Far East Journal of Electronics and Communications. 2017. Vol. 17, №. 5. P. 1197-1212.

12. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. A multi-agent control system of distributed generation plants // Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), 2017. IEEE Conference Publications. 2017. P. 1-7.

13. Wang R., Wang P., Xiao G. Intelligent Microgrid Management and EV Control Under Uncertainties in Smart Grid. Springer. 2018. P. 218.

14. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V., Kushov A.A., Shul'gin M.S. Determination of the parameters of elements of electric power systems based on measurement data. Irkutsk: IrGUPS, 2015. 184 p.

15. Zakaryukin V.P., Kryukov A.V. Methods of joint modeling of traction and external power supply systems for AC railways. Irkutsk: IrGUPS, 2011. 170 p.

16. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Application of the wavelet transform and genetic algorithms for tuning automatic regulators

of distributed generators // Scientific Bulletin of NSTU. 2016. T. 63, № 2. P. 7-22.

17. Bulatov Yu. N., Kryukov A.V. Optimization of automatic regulator settings of the distributed generation plants on the basis of genetic algorithm // 2016 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM). IEEE Conference Publications. 2016. P. 1-6.

18. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Application of genetic algorithms for setting adjustment controllers of distributed generation plants // Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. 2016. № 2. P. 30-45.

19. Bulatov Yu.N., Kryukov A.V. Intelligent tuning of distributed generators regulators // Informatsionnye i matematicheskie tekhnologii v nauke i upravlenii. 2017. № 3 (7). P. 122-135.

20. The instrument of simulation modeling AnyLogic [Elektronnyi resurs] // AnyLogic: sait. URL. http://www.anylogic.ru/ (data obrashcheniya: 08.01.2018).

УДК 681.5

DOI: 10.18324/2077-5415-2018-1-65-71

Декомпозиция передаточной функции в цепную дробь для заданных параметров

Ю.Н. Алпатов[a], Л.В. Веревкин[b]

Братский государственный университет, ул. Макаренко 40, Братск, Россия
[a]iipm@brstu.ru, [b]leo_proxy@mail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0003-4942-3349, [b] https://orcid.org/0000-0002-9581-6306
Статья поступила 30.01.2018, принята 5.02.2018

Производственный процесс может быть описан математической моделью, а параметры производства возможно представить в виде передаточных функций. Полученные постоянные времени могут иметь большие величины, что будет свидетельствовать о вялотекущем процессе производства. В примере, приведенном в статье, постоянная времени для звена $W_1(S)$ равна 24 472,22 ч, для звена $W_2(S)$ — 44 313,72 ч. Управление таким процессом вызывает большие трудности. Для управления процессом производства необходимо, чтобы постоянные времени были в допустимых пределах $T \leq 1$ ч. Авторами статьи предложен метод разложения передаточной функции с большими постоянными времени на две составляющие: передаточную функцию с необходимыми постоянными времени ($T \leq 1$) и оставшуюся передаточную функцию. Разложение исходной передаточной функции было реализовано для трех видов соединений: последовательного, параллельного и соединения звеньев с обратной связью. С помощью данного метода построена структурная схема, эквивалентная исходной, получена постоянная времени в допустимых пределах, а также осуществлено преобразование неустойчивого звена в устойчивое при помощи соединения звеньев с обратной связью. Произведены проверка и моделирование исходной и полученной системы.

Ключевые слова: постоянная времени; передаточная функция; структурная схема; цепная дробь.

Decomposition of the transfer function into a continued fraction for specified parameters

Yu.N. Alpatov[a], L.V. Verevkin[b]

Bratsk State University; 40 Makarenko St., Bratsk, Russia
[a]iipm@brstu.ru, [b]leo_proxy@mail.ru
[a]https://orcid.org/0000-0003-4942-3349, [b]https://orcid.org/0000-0002-9581-6306
Received 30.01.2018, accepted 5.02.2018

The manufacturing process can be described by a mathematical model. Production parameters can be represented in the form of transfer functions. The obtained time constants can have large values, which indicates a slow production process. In this case time constant for a link of $W_1(S)$ is equal to 24 472,22 hours, for $W_2(S)$ 44 313,72 hours respectively. Management of such process causes great difficulties. To control the production process, it is necessary that the time constants are within the permissible limits $T \leq 1$ h. In the considered article the method of decomposition of transfer function with big time constants for two components is offered: transfer function with necessary constants of time ($T \leq 1$) and the remained transfer function. Decomposition of initial transfer function has been realized for three types of connections: consecutive, parallel and connections of links with feedback. Using this method, a structured scheme equivalent to the original one is constructed, a time constant is obtained within the permissible limits, and the unstable link is transformed into a stable one by connecting the links with feedback. The verification and modeling of the initial and received system have been made.

Key words: time constant; transfer function; structural scheme; continued fraction.