

# Информатика, вычислительная техника и управление

УДК 621.316

## ОБЗОР МЕТАЭВРИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ, ПРИМЕНЯЕМЫХ ПРИ РЕШЕНИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

*Р.А. Алехин<sup>1</sup>, Ю.П. Кубарьков<sup>1</sup>, Д.В. Закамов<sup>1</sup>, Д.В. Умяров<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

<sup>2</sup> Нижегородский государственный технический университет имени Р.Е. Алексеева  
Россия, 603950, г. Нижний Новгород, ул. Минина, 24

***Аннотация.** Быстрый рост электроэнергетических систем по всему миру в XX веке и несовершенство вычислительной техники того времени привели к появлению целого ряда проблем, связанных с управлением и распределением электроэнергии. Наиболее важными задачами, решаемыми при проектировании новых и модернизации уже существующих систем, являются задачи управления потоками мощности, планирования нагрузок и реактивной мощности, выбора конфигурации сети и другие. Все они относятся к ряду оптимизационных задач, которые на протяжении многих лет решались с помощью традиционных численных методов: ньютоновских, метода внутренней точки, ветвей и границ, нелинейного и квадратичного программирования и других. Поскольку энергосистемы являются нелинейными системами с большим количеством разнообразных устройств и особенностей их работы, то для решения указанных проблем исследователи использовали различные способы упрощения математических моделей. К тому же использование численных методов вызывало трудности при вычислении производных первого и второго порядка, что приводило к нахождению неоптимальных решений. Появление на свет эвристических, а затем и метаэвристических оптимизационных методов позволило существенно упростить подготовку математических моделей и сократить время выполнения расчетов, а универсальность новых алгоритмов обеспечила их применимость для широкого спектра задач. В статье рассмотрена общая последовательность выполнения оптимизационных задач с помощью метаэвристических методов, представлено описание наиболее важных проблем, с которыми сталкивается современная электроэнергетика, перечислены популярные метаэвристические оптимизационные алгоритмы, описаны их сильные и слабые стороны, а также перечислены основные области их применения.*

---

*Алехин Роман Александрович, аспирант.*

*Кубарьков Юрий Петрович (д.т.н.), профессор кафедры «Электрические станции».*

*Закамов Дмитрий Васильевич (к.т.н.), доцент кафедры «Металловедение, порошковая металлургия, наноматериалы».*

*Умяров Дамир Вафиевич, ст. преподаватель кафедры «Электрооборудование, электропривод и автоматика».*

**Ключевые слова:** *оптимизация, энергосистема, генетический алгоритм, оптимизация роением частиц, метод кукушкиного поиска.*

## **Введение**

Электроэнергетические системы являются одними из наиболее крупных и сложных комплексов, построенных человеком. Для поддержания надежной и безаварийной работы таких систем необходимо всестороннее изучение взаимосвязанных с ними процессов. Регулярный ввод в работу и вывод из эксплуатации старого оборудования, преобразование конфигурации системы, изменение потребления электроэнергии в зависимости от сезона и времени суток привели к разделению процесса управления энергосистемами на множество узконаправленных задач. К ним можно отнести задачи нахождения оптимальных перетоков активной и реактивной мощностей, а также уровней напряжения, задачи нахождения оптимальной конфигурации существующих и проектируемых электрических сетей, строительства устройств распределенной генерации и другие.

На сегодня многие задачи, стоящие перед электроэнергетическими компаниями и исследователями, относятся к задачам оптимизации. К таким задачам относится нахождение наилучшего варианта решения. Как правило, оптимизация проводится для получения наиболее приемлемого значения одного или нескольких параметров системы. Такие параметры включаются в целевую функцию, а критерием корректности найденного решения служит функция пригодности – фитнес-функция.

Решение оптимизационных задач выполняется, как правило, с помощью специализированных программ, использующих различные вычислительные алгоритмы. Традиционно в таких программах используются разработанные еще в XX веке математические методы, которые обладают высокой точностью решения поставленных задач. К ним можно отнести ньютоновские методы, метод внутренней точки, метод ветвей и границ, нелинейное и квадратичное программирование и другие [1]. Такие алгоритмы позволяют математически точно описывать поставленную задачу, находить верное решение, однако имеют и ряд недостатков:

- большие временные затраты на выполнение операций;
- недостаточный уровень знаний в исследуемой области у специалистов, выполняющих оптимизационную задачу;
- трудности в интерпретации полученных данных;
- сложность выполнения вычислений производных первого и второго порядка.

Указанные недостатки классических методов становятся весьма заметными при решении задач для систем большой размерности, коими являются модели современных энергосистем [2].

С целью решения проблем, возникающих при использовании указанных выше математических методов, в середине XX века были разработаны эвристические методы оптимизации.

Эвристические методы предполагают, что решение поставленной оптимизационной задачи будет найдено не вполне верно, но с приемлемой степенью точности. Такие методы позволяли решить главную проблему своего времени: снижение временных затрат и увеличение вычислительных мощностей техники. Поиск оптимального решения запускался лишь один раз, и при нахождении решения алгоритм прекращал свою работу. Существенным недостатком оказалось то, что большое количество эвристических методов создавалось под решение не-

большого ряда задач, как правило, из одной области знаний. В результате применение какого-либо метода в другой отрасли становилось очень затруднительным [2].

Существенный вклад в развитие оптимизации как раздела математики внесли созданные во второй половине XX века метаэвристические методы оптимизации, которые, судя по названию, находятся над эвристическими методами. Такие методы имеют следующие общие черты:

- направляют процесс поиска оптимума в необходимом направлении;
- не требуют глубоких знаний в исследуемой области;
- применимы для широкого круга оптимизационных задач;
- осуществляют эффективный поиск решения во всем пространстве поиска;
- используют все разнообразие алгоритмов работы: от простых процедур локального поиска до сложных процессов самообучения;
- являются недетерминированными алгоритмами;
- включают в себя алгоритмы, которые позволяют им выбираться из локальных оптимумов;
- большинство из них используют опыт поиска (память) для эффективного выполнения дальнейшего поиска [3].

В статье представлены наиболее популярные метаэвристические методы оптимизации, а также описаны задачи в области электроэнергетики, в которых они применяются.

### **Задачи оптимизации**

Бурный рост и развитие энергосистем по всему миру сформировали перед исследователями и электросетевыми компаниями множество задач, которые успешно решаются с помощью различных оптимизационных методов. К наиболее значительным относятся:

1. Реконфигурация сети. Подобная задача очень часто разбирается в распределительных сетях, там, где необходимо повышение эффективности работы энергосистемы. При этом топология сети изменяется с помощью изменения состояния коммутационных аппаратов или с помощью ввода в работу или вывода из эксплуатации подстанций или линий электропередачи [4]. Реконфигурация относится к разделу комбинаторных задач. В связи с крупными размерами распределительных сетей и, как следствие, большим набором возможных вариантов выбор оптимального решения становится непростой задачей.

2. Планирование нагрузки. Информация об объемах потребляемой в будущем мощности необходима для определения требуемой генерации мощности на электростанциях. Задачи планирования нагрузки могут рассматриваться как в краткосрочной перспективе, так и в долгосрочной. От качественной проработки объемов и локации потребления мощности зависит и оптимальность (экономичность) распределения генерации не только между станциями, но отдельными генераторами. Задача может решаться как для небольших, так и для крупных объединенных энергосистем. Для рассмотрения может быть выбрана активная, реактивная, а также полная мощность [2, 5].

3. Настройка параметров стабилизаторов энергосистемы. Стабилизаторы используются как вспомогательные элементы управления на электрических станциях для систем автоматического регулирования напряжения или систем управления турбинами энергоблоков. Использование стабилизаторов является одним из наиболее экономически эффективных способов повышения устойчивости

энергосистемы [6]. При устойчивой работе энергосистемы стабилизаторы остаются неактивными, в то время как при возникновении значительных колебаний они обеспечивают дополнительное демпфирование и помогают автоматическим регуляторам возбуждения снизить качания ротора и отклонения напряжения в системе. Настройка параметров стабилизаторов является достаточно сложной задачей в виду нелинейности параметров энергосистем. Постоянные изменения в режимах работы систем свидетельствуют о неоптимальности задания статических уставок для стабилизаторов, с чем помогают справиться оптимизационные методы [7, 8, 9, 10].

4. Планирование распределения реактивной мощности. Оптимизация распределения реактивной мощности в энергосистеме является одной из наиболее актуальных задач в современной энергетике. Баланс реактивной мощности неразрывно связан с профилем напряжения во всей энергосистеме. При избытке мощности уровни напряжений в узлах энергосистемы, наиболее близких к небалансу, начинают возрастать, при дефиците – снижаться. К тому же реактивная мощность негативно сказывается на пропускной способности линий электропередачи и трансформаторов. При планировании распределения реактивной мощности основной задачей является снижение перетоков реактивной мощности по распределительной сети и сокращение ее небалансов в необходимых местах с помощью различных компенсирующих устройств [11].

5. Задача оптимального перетока мощности. Это комплексная задача, целью которой является оптимальная настройка параметров всей энергосистемы для повышения надежности ее работы и соблюдения режимных ограничений. Основными критериями эффективности являются снижение потерь активной мощности в энергосистеме, экономичность производства электроэнергии, а также повышение пропускной способности линий электропередачи [12].

6. Распределенная генерация. Современные электроэнергетические системы претерпевают масштабные изменения. Развитие рыночных отношений подталкивает крупных энергопотребителей к созданию собственных генерирующих установок. Существенным фактором в развитии концепции распределенной генерации является значительное удешевление, а также увеличение эффективности технологий, использующих возобновляемые источники энергии (ветряные, солнечные электрические станции и другие). В результате в распределительных сетях образуются небольшие энергорайоны, полностью компенсирующие потребление электроэнергии своей же генерацией, а в некоторых случаях и выдающие избыток мощности в общую сеть. Таким образом, распределительные энергосистемы из пассивного элемента, в котором управление генерацией возможно только в крупных энергоузлах, превращаются в активного участника, способного влиять на общий баланс мощности. Использование активных энергокомплексов помогает разгрузить наиболее загруженные участки сети, более эффективно распределить высвободившиеся объемы мощности, а также увеличивает устойчивость энергосистемы. Задача проектировщиков и исследователей – добиться оптимального расположения в энергосистеме генерирующего оборудования, при котором будут соблюдены перечисленные условия. Как правило, проблема распределенной генерации представляет многоцелевую задачу, так как нередко рассматривается возможность удовлетворения потребителей не только электрической, но и тепловой энергией [13, 14].

Постоянное развитие технологий влияет и на сферу электроэнергетики, принося в эту область все новые и новые тенденции. Идеи сокращения использова-

ния в качестве энергоносителя углеводородного сырья и сокращения вредных выбросов послужили поводом для исследования данной проблемы как в отдельности, так и в сочетании с другими проблемами [15]. За последние 50 лет было создано несколько поколений FACTS-устройств, которые также внесли значительный вклад в развитие энергосистем и не могли быть не замечены при решении различных оптимизационных задач [16, 17].

### **Метаэвристические методы оптимизации**

Метаэвристические оптимизационные методы, основываясь на эвристических методах, имеют также и свои отличительные черты. Одной из них является итерационность, благодаря которой обеспечивается многократное выполнение расчетов, формируется набор возможных вариантов с различными параметрами, а также выбирается наилучшее решение из большой выборки.

В наше время разработано большое количество разнообразных метаэвристических методов. Несмотря на математическую базу, при разработке того или иного метода ученые основываются на различных явлениях, происходящих в мире и приводящих систему к наилучшему состоянию. Так, помимо математических существуют методы, основанные на процессах, происходящих в живой природе, физических явлениях, социальном поведении и многих других.

Большинство методов, значительно отличаясь друг от друга выполняемыми операциями, имеют общие алгоритмические черты:

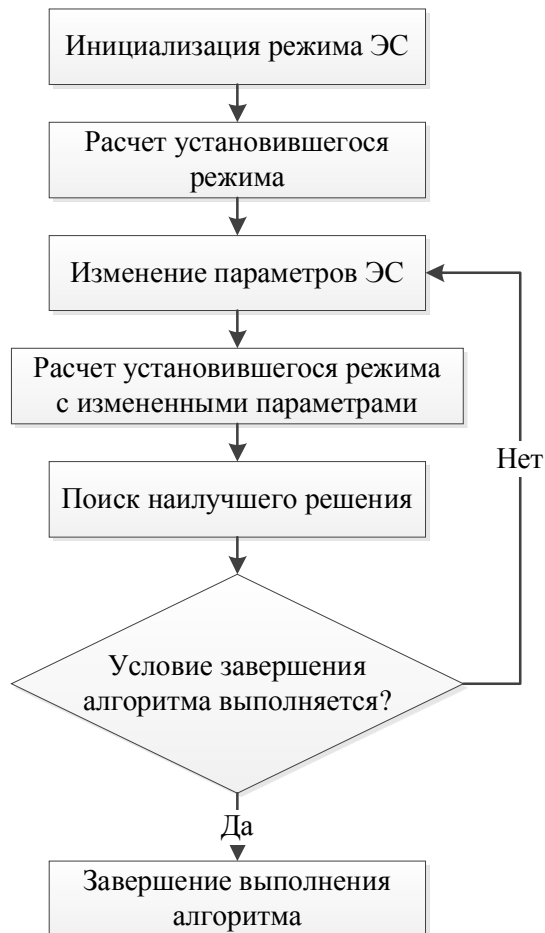
- 1) инициализация начальных данных энергосистемы и параметров метода;
- 2) расчет установившегося режима;
- 3) изменение параметров энергосистемы с помощью специфических для каждого оптимизационного метода операций;
- 4) расчет установившегося режима с измененными параметрами;
- 5) поиск наилучшего решения;
- 6) проверка выполнения условия завершения работы алгоритма;
- 7) переход на шаг 3 или завершение выполнения оптимизации.

Качество проработки задачи любого оптимизационного алгоритма очень сильно зависит от определения условия завершения работы алгоритма. Сценарий работы метода может предполагать как выполнение заданного количества итераций, так и достижение определенного значения целевых или фитнес-функций. Во втором случае количество итераций может существенно увеличиться, а время выполнения вычислений – возрасти в разы. При задании недостижимых значений произойдет закливание алгоритма и оптимальное решение не будет найдено (см. рисунок).

Перечислим методы оптимизации, представляющие интерес для современных задач планирования и эксплуатации режимов работы электрических систем (однако они не ограничиваются этим перечнем):

- экспертная система;
- искусственная нейронная сеть;
- нечеткая логика;
- генетический алгоритм;
- эволюционный алгоритм;
- имитация отжига;
- поиск табу;
- оптимизация колонии муравьев;
- оптимизация роя частиц;

- многокритериальная оптимизация;
- параллельные вычисления;
- линейное и нелинейное программирование;
- целочисленное и смешанно-целочисленное программирование;
- динамическое программирование;
- внутренние точечные методы;
- методы, основанные на разложении Лагранжа;
- общие стохастические методы.



Последовательность работы метаэвристических оптимизационных методов

### Генетический алгоритм

Генетический алгоритм – оптимизационный метод, вдохновленный концепциями эволюции и естественного отбора. Включает в себя три наиболее важных операции: селекцию, скрещивание и мутацию. В ходе работы генетического алгоритма формируется набор режимов (генов) со своими наборами переменных, называемый поколением, над которым и будут производиться дальнейшие действия. Селекция подразумевает процесс выбора пар генов из текущего поколения. При скрещивании происходит формирование новых генов с новыми наборами переменных. Для постоянного обновления поколений и предотвращения разрастания количества генов на каждом итерационном шаге выполняется отбор

заданного количества наилучших решений. Задачей мутации является случайное изменение произвольного количества переменных в каждом гене. Внесение непредвиденных изменений позволяет алгоритму разнообразить наборы решений в каждом поколении и избегать возможного попадания в точки локального оптимума [18].

Генетический алгоритм является наиболее популярным оптимизационным методом. Разработанный во второй половине XX века, этот метод имеет достаточно большую изученность и, как следствие, широкий круг применения.

К недостаткам алгоритма относится наличие большого количества настраиваемых параметров, а также низкая скорость выполнения операций [19].

### **Оптимизация роя частиц**

Метод оптимизации роя частиц развивается из концепции роевого взаимодействия насекомых при решении различного рода проблем. Каждая частица в рое представляет собой набор переменных энергосистемы, используемых при решении оптимизационных задач. Двигаясь по всему пространству решений, частицы при своем перемещении обмениваются друг с другом полученным опытом. Каждый индивид в рое изменяет местоположение, учитывая свое наилучшее положение и наилучшее положение всех частиц в рое [20].

Представленный метод обладает целым рядом преимуществ:

- простота для понимания метода;
- малое количество параметров и формул;
- простота применения;
- слабая зависимость от начальных параметров.

К недостаткам метода относятся:

- низкий уровень сходимости;
- частое попадание в точки локального оптимума;
- сильная зависимость сходимости от значений параметров алгоритма.

Доступность для понимания и применения метода оптимизации роем частиц способствовала его применению для исследования большинства оптимизационных задач, однако наибольшее применение он получил в расчетах оптимальных перетоков мощности, планирования реактивной мощности, настройке параметров регуляторов энергосистем, а также в задаче распределенной генерации.

### **Имитация отжига**

Имитация отжига – метод, основанный на принципе кристаллизации металлов. При нагреве металлов до жидкого состояния все молекулы внутри него не имеют четкой структуры, а внутренняя энергия вещества максимальна. При медленном процессе остывания металла происходит постепенная структуризация частиц в кристаллическую решетку, при которой энергия вещества снижается. Однако в металле все еще остаются молекулы, способные перемещаться внутри пространства и находить новые позиции. При контролируемом процессе остывания возможен кратковременный нагрев вещества. Целью указанных действий является получение металла с наименьшей энергией. Каждая частица – режим энергосистемы с определенным набором переменных. Повышение температуры системы является способом вывода решения из локального оптимума.

Имитация отжига имеет достаточно простую реализацию, а также хорошие оптимизационные характеристики для большинства задач, но обладает низким

качеством поиска глобального оптимума, а время работы занимает длительное время.

Метод нашел широкое применение для решения проблем реконфигурации сети, планирования графиков обслуживания, планирования строительства генерирующего оборудования [5], а также планирования реактивной мощности в энергосистеме [21].

### **Поиск с запретами (табу-поиск)**

Табу-поиск (ТП) – оптимизационный метод, основанный на механизме спуска, который движется к оптимальному решению. Алгоритм имеет список запретов, который содержит в себе некоторое количество решений, найденных на предыдущих итерациях. За счет этого алгоритм не зацикливается на нахождении повторяющихся решений. Для выхода из локального оптимума предусмотрен механизм ухудшения результатов расчетов.

Метод позволяет сократить время на обработку первоначальных данных и обладает приемлемым временем выполнения алгоритма, но имеет большое количество настраиваемых параметров и низкий коэффициент точности.

Преимущества метода оптимизации ТП можно суммировать следующим образом:

- ТП характеризуется способностью избегать попадания в ловушку в локальном оптимальном решении и сохранить решение, если оно будет найдено, с помощью гибкой памяти в истории поиска;

- ТП использует вероятностные правила перехода для принятия решений, а не детерминированные. Следовательно, ТП – это своего рода алгоритм стохастической оптимизации, который может искать сложную и неопределенную область для поиска глобального оптимума. Это делает ТП более гибким и надежным, чем обычные методы;

- ТП использует адаптивные процессы памяти для направления поиска в пространстве поиска проблем. Поэтому он может легко иметь дело с негладкими, непрерывными и недифференцируемыми целевыми функциями.

Поиск с запретами применяется при решении задач реконфигурации распределительной сети [22], оптимального размещения компенсирующих устройств и планирования реактивной мощности [23].

### **Поиск колонии муравьев**

Алгоритм поиска колонии муравьев основан на поведении муравьев при поиске кратчайших путей до пищи. Если муравей в процессе поиска находит еду, то, возвращаясь в муравейник, оставляет на обратном пути следы своего феромона. В результате удачного поиска еды несколькими муравьями будут сформированы тропы, концентрация феромонов на которых больше, чем в остальном пространстве поиска. С большой долей вероятности остальные муравьи пойдут именно по такой тропе. В результате будет сформирован кратчайший, оптимальный путь до источника пищи. В контексте данного решения места с наибольшей концентрацией феромонов являются наборами переменных с наилучшими решениями задачи.

Алгоритм поиска колонии муравьев хорошо зарекомендовал себя в решении проблемы выбора оптимальной конфигурации распределительных сетей.

Метод хорошо подходит для решения задач на основе графов, характеризуется масштабируемостью и гибкостью при использовании в динамических си-



стемах. Однако имеет сложный код и большое количество настраиваемых параметров [24].

### **Алгоритм гравитационного поиска**

Алгоритм гравитационного поиска создан на основе концепции всемирного тяготения. Согласно этой концепции тела с наибольшей массой имеют наибольшую силу притяжения других тел в пространстве. Со временем все частицы в пространстве притягиваются к самым крупным центрам масс. Относительно оптимизационного алгоритма частицы – это режимы с наборами переменных. В процессе выполнения задачи наиболее удачные решения притягивают к себе ближайšie, тем самым увеличивая свой вес среди всех возможных вариантов.

Данный метод применяется для нахождения решений в задачах оптимального перетока мощности, планирования реактивной мощности и настройки стабилизаторов энергосистем.

Алгоритм гравитационного поиска прост и легко применим к различным задачам, имеет высокую степень случайности генерации переменных, чем обеспечивает охват всего пространства поиска. Слабые качества алгоритма: плохая способность локального поиска решения и необходимость в тонкой настройке начальных параметров алгоритма [1].

### **Кукушкин поиск**

Метод основан на паразитической особенности кукушек в откладывании своих яиц в гнезда других птиц. Хозяин гнезда может увидеть чужие яйца и вытолкнуть их или покинуть насест. Но если птица не заметит подмены, то птенцы кукушки выбираются из яиц раньше других, выталкивают из гнезда остальные яйца и выигрывают в борьбе за выживание и пропитание. Каждый режим с набором переменных является яйцом описываемого вида птиц. Выбор значений переменных происходит с помощью специализированного метода блуждания в пространстве поиска, называемого полетами Леви. Данный вид передвижения характерен для некоторых видов животных, например акул, дрозophil и других. Благодаря такому передвижению обеспечивается наиболее эффективное исследование пространства поиска. Обнаружение чужих яиц хозяином гнезда происходит с определенной долей вероятности, колеблющейся от 0 до 1.

Метод показал свою эффективность при решении широкого спектра оптимизационных задач: планирования реактивной мощности, нахождения оптимального перетока мощности, применения распределенной генерации.

Метод кукушкиного поиска достаточно прост в понимании, имеет несложную математическую выкладку, применим для решения многоцелевых задач. К недостаткам алгоритма относятся медленная сходимость, слабая изученность и, как следствие, небольшое количество примеров в литературе [19].

### **Метод поиска летучей мыши**

В качестве основной идеи при создании метода поиска летучей мыши было принято использование этим видом млекопитающих эхолокации для перемещения в пространстве и поиска пищи. Во время движения в зависимости от ситуации мыши способны изменять частоту и громкость ультразвука. При обнаружении оптимального решения параметры частоты и громкости увеличиваются, в противном случае – снижаются, тем самым обеспечивается эффективность изучения пространства решений.

Метод показал хорошие результаты при решении задач, связанных с оптимизацией перетоков активной и реактивной мощности, уровней напряжений, применением FACTS-устройств и распределенной генерации.

К преимуществам данного метода относятся слабая зависимость от начальных данных, автоматическая настройка параметров алгоритма в ходе выполнения задачи оптимизации, низкое время выполнения операций. Слабая изученность метода является его наибольшим недостатком [25].

### **Комбинированные алгоритмы (генетический и имитационный отжиг)**

Генетические алгоритмы (ГА) являются адаптивными методами, которые могут быть использованы для решения задач поиска и оптимизации [18]. Они основаны на генетическом процессе биологических организмов. На протяжении многих поколений естественные популяции эволюционировали в соответствии с принципами естественного отбора, то есть выживания наиболее приспособленных. Подражая этому процессу, генетические алгоритмы способны разрабатывать решения реальных проблем, если они были соответствующим образом закодированы. Процедуры ГА могут быть обобщены как представление хромосом (схема кодирования) решения, при этом функция оценки решений определяется с точки зрения их пригодности для генетических операторов (размножение, пересечение и мутация), которые изменяют генетический состав потомства для следующего поколения и правила прекращения изменений [21]. Генетический алгоритм – очень мощный инструмент для поиска больших областей пространства решений в глобальном масштабе.

Имитационный отжиг – это стохастический подход к решению задач комбинаторной оптимизации, в котором основная идея исходит из процесса отжига твердых тел. Имитация отжига очень эффективна для исчерпывающего поиска локальных областей пространства решений посредством стохастического настроя на максимум.

При комбинировании глобального оператора кроссовера генетического алгоритма и локального стремления к максимуму моделируемого отжига создается гибридный алгоритм оптимизации, названный алгоритмом генетического моделирования отжига.

Алгоритм начинается с инициализации параметров. Начальная популяция состоит из случайно сгенерированных хромосом. Каждая хромосома состоит из случайно выбранного объекта из набора альтернативных объектов для каждого местоположения, и ген обозначает объект, который должен быть расположен в одном месте без репликации.

Если во время кроссовера образуются неосуществимые хромосомы, они становятся выполнимыми, пропуская повторяющиеся блоки и вставляя отсутствующие. Затем наилучшее решение подается в модуль ИО для уточнения решения. Это улучшенное решение подается в ГА для следующей итерации, пока не будет выполнено условие завершения.

### **Заключение**

Создание метаэвристических методов позволило совершить большой шаг вперед в решении оптимизационных задач не только в электроэнергетике, но и в других сферах деятельности человека.

Метаэвристики предоставили исследователям и работникам электросетевых компаний универсальные методы для решения неограниченного числа задач.

Представленные в статье методы просты, не требуют преобразований модели энергосистемы под определенный метод, выполняют поиск наилучшего варианта среди большого множества возможных решений и при этом имеют достаточную степень точности.

Несмотря на то, что многие классические метаэвристические методы были созданы в последние 20–25 лет, происходит постоянное их развитие. Совершенствуются отдельные компоненты методов, выполняется комбинирование алгоритмов между собой, чем достигается улучшение оптимизационных качеств, а также создаются новые непохожие на другие алгоритмы [26].

Дальнейшее развитие техники, в том числе и электроэнергетического комплекса, будет ставить перед учеными новые вызовы, которые также будут решаться с помощью различных метаэвристических методов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Shaheen A.M., Spea S.R., Farrag S.M., Abido M.A.* A review of meta-heuristic algorithms for reactive power planning problem // *Ain Shams Engineering Journal*, 2018. Vol. 9, no. 2. Pp. 215–231.
2. *Gavrilas M.* Heuristic and Metaheuristic Optimization Techniques with Application to Power Systems // *12th WSEAS International Conference on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering (MMACTEE '10)*, Timisoara, Romania, 2010. P. 95–103.
3. *Blum C., Roli I.* Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison // *ACM Computing Surveys*, 2003. Vol. 35, no. 3. Pp. 268–308.
4. *Metia A., Ghosh S.* A Literature Survey on Different Loss Minimization Techniques used in Distribution Network // *International Journal Of Scientific Research And Education*, 2015. Vol. 3, no. 6. Pp. 3861–3877.
5. *Meng K., Dong Z.Y., Qiao Y.* Swarm Intelligence in Power System Planning // *International Journal of Clean Coal and Energy*, 2013. Vol. 2, no. 1. Pp. 1–7.
6. *Abdollahi M., Ghasrdashti S., Saeidinezhad H., Hosseinzadeh F.* Multi Machine PSS Design by using Meta Heuristic Optimization Techniques // *Journal of Novel Applied Sciences*, 2013. Vol. 2, no. 9. Pp. 410–416.
7. *Abido M.A.* An efficient heuristic optimization technique for robust power system stabilizer design // *Electric Power Systems Research*, 2001. Vol. 58, no. 1. Pp. 53–62.
8. *Rekha, Kumar A., Singh A.K.* Optimization Of Controller Parameters for non-Linear Power Systems Using Different Optimization Techniques // *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013. Vol. 2, no. 6. Pp. 228–233.
9. *Shrivastava A., Dubey M., Kumar Y.* Optimization Techniques Based Power System Stabilizer's: An Overview // *International Journal on Emerging Technologies*, 2013. Vol. 4, no. 1. Pp. 50–54.
10. *Monika G., Singh B., Khanna R.* Power System Stability and Optimization Techniques: An Overview // *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2014. Vol. 1, no. 1. Pp. 50–54.
11. *Mahdad B.* Optimal reconfiguration and reactive power planning based fractal search algorithm: A case study of the Algerian distribution electrical system // *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019. Vol. 22, no. 1. Pp. 78–101.
12. *Niu M., Wan C., Xu Z.* A review on applications of heuristic optimization algorithms for optimal power flow in modern power systems // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2014. Vol. 2, no. 4. Pp. 289–297.
13. *Shi R., Cui C., Su K., Zain Z.* Comparison Study of Two Meta-heuristic Algorithms with Their Applications to Distributed Generation Planning // *Energy Procedia*, 2011. Vol. 12, no. 1. Pp. 245–252.
14. *Hosseini M., Baghipour R.* Optimal Placement of DGs in Distribution System including Different Load Models for Loss Reduction using Genetic Algorithm // *Journal of Advances in Computer Research*, 2013. Vol. 4, no. 3. Pp. 55–68.

15. *Jin J., Zhou P., Li C., Guo X., Zhang M.* Low-carbon power dispatch with wind power based on carbon trading mechanism // *Energy*, 2019. Vol. 170, no. 1. Pp. 250–260.
16. *Dixit S., Srivastava L., Singh A., Agnihotri G.* Optimal Placement of TCSC For Enhancement of Power System Stability Using Heuristic Methods: An Overview // *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2015. Vol. 8, no. 7. Pp. 367–374.
17. *Singh B., Payasi R.P., Shukla V.* A taxonomical review on impact assessment of optimally placed DGs and FACTS controllers in power systems // *Energy Reports*, 2017. Vol. 3, no. 1. Pp. 94–108.
18. *Sedighzadeh M., Rezazadeh A.* Using Genetic Algorithm for Distributed Generation Allocation to Reduce Losses and Improve Voltage Profile // *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008. Vol. 37, no. 1. Pp. 251–256.
19. *Stanelyte D., Gudzius S., Andriusiene L.* Energy Distribution Planning Models Taxonomy and Methods of Distributed Generation Systems // *Energy Procedia*, 2017. Vol. 107, no. 1. Pp. 275–283.
20. *Reddy S.C., Prasad P.V.N., Laxmi A.J.* Optimal Number and Location of DGs to Improve Power Quality of Distribution System Using Particle Swarm Optimization // *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012. Vol. 2, no. 3. Pp. 3077–3082.
21. *Farhoodnea M., Mohamed A., Shareef H., Zayandehroodi H.* A Comprehensive Review of Optimization Techniques Applied for Placement and Sizing of Custom Power Devices in Distribution Networks // *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2012. Vol. 88, no. 11. Pp. 261–265.
22. *Charlangsut A., Rugthaicharoencheep N., Auchariyamet S.* Heuristic Optimization Techniques for Network Reconfiguration in Distribution System // *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2012. Vol. 6, no. 4. Pp. 365–368.
23. *Bansal R.C.* Optimization Methods for Electric Power Systems: An Overview // *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2005. Vol. 2, no. 1. Pp. 1–23.
24. *Beheshti Z., Mariyam S., Shamsuddin H.* A Review of Population-based Meta-Heuristic Algorithm // *International Journal of Advances in Soft Computing and its Application*, 2013. Vol. 5, no. 1. Pp. 1–35.
25. *Ibrahim A.M., Swief R.A.* Comparison of modern heuristic algorithms for loss reduction in power distribution network equipped with renewable energy resources // *Ain Shams Engineering Journal*, 2018. Vol. 9, no. 4. Pp. 3347–3358.
26. *Šipoš M., Klaić Z., Fekete K., Stojkov M.* Review of Non-Traditional Optimization Methods for Allocation of Distributed Generation and Energy Storage in Distribution System // *Technical Gazette*, 2018. Vol. 25, no. 1. Pp. 294–301.

*Статья поступила в редакцию 20 июня 2019 года*

# OVERVIEW OF METAHEURISTIC OPTIMIZATION TECHNIQUES APPLIED TO SOLVING POWER ENGINEERING PROBLEMS

**R.A. Alehin<sup>1</sup>, Y.P. Kubarkov<sup>1</sup>, D.V. Zakamov<sup>1</sup>, D.V. Umyarov<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

<sup>2</sup> Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev  
24, Minina st., Nizhny Novgorod, 603950, Russia

**Abstract.** *The rapid growth of electric power systems around the world in the XX century, and the imperfection of computer technology at that time led the emergence of a number of problems associated with the management and distribution of electricity. The most important tasks solved in the design of new and modernization of existing systems are the problems of managing power flows, planning loads and reactive power, choosing the network configuration and others. All of them belong to a number of optimization problems, which for many years have been solved using traditional numerical methods: Newtonian methods, interior point, branch and bound method, nonlinear and quadratic programming, and others. In addition, the use of numerical methods led to difficulties in calculation of first and second order, which led to finding suboptimal solutions. The birth of heuristic and then metaheuristic optimization methods made it possible to simplify the preparation of mathematical models, and reduce the time of performing calculations, and the universality of new algorithms ensured their applicability for a wide range of tasks. The article describes the general sequence of performing optimization tasks using metaheuristic methods, describes the most important problems faced by modern electric power industry, lists popular metaheuristic optimization algorithms, describes their strengths and weaknesses, and lists the main areas of their application.*

**Keywords:** *optimization, power system, genetic algorithm, particle swarm optimization, cuckoo search algorithm.*

## REFERENCES

1. *Shaheen A.M., Spea S.R., Farrag S.M., Abido M.A.* A review of meta-heuristic algorithms for reactive power planning problem // *Ain Shams Engineering Journal*, 2018. Vol. 9, no. 2. Pp. 215–231.
2. *Gavrilas M.* Heuristic and Metaheuristic Optimization Techniques with Application to Power Systems // *12th WSEAS International Conference on Mathematical Methods and Computational Techniques in Electrical Engineering (MMACTEE '10)*, Timisoara, Romania, 2010. P. 95–103.
3. *Blum C., Roli I.* Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison // *ACM Computing Surveys*, 2003. Vol. 35, no. 3. Pp. 268–308.
4. *Metia A., Ghosh S.* A Literature Survey on Different Loss Minimization Techniques used in Distribution Network // *International Journal Of Scientific Research And Education*, 2015. Vol. 3, no. 6. Pp. 3861–3877.
5. *Meng K., Dong Z.Y., Qiao Y.* Swarm Intelligence in Power System Planning // *International Journal of Clean Coal and Energy*, 2013. Vol. 2, no. 1. Pp. 1–7.
6. *Abdollahi M., Ghasradshti S., Saeidinezhad H., Hosseinzadeh F.* Multi Machine PSS Design by using Meta Heuristic Optimization Techniques // *Journal of Novel Applied Sciences*, 2013. Vol. 2, no. 9. Pp. 410–416.
7. *Abido M.A.* An efficient heuristic optimization technique for robust power system stabilizer design // *Electric Power Systems Research*, 2001. Vol. 58, no. 1. Pp. 53–62.

---

*Roman A. Alekhin, Postgraduate student.  
Yury P. Kubarkov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Dmitry V. Zakamov (Ph.D.), Associate Professor.  
Damir V. Umyarov, Senior lecturer.*

8. *Rekha, Kumar A., Singh A.K.* Optimization Of Controller Parameters for non-Linear Power Systems Using Different Optimization Techniques // *International Journal of Engineering Research & Technology*, 2013. Vol. 2, no. 6. Pp. 228–233.
9. *Shrivastava A., Dubey M., Kumar Y.* Optimization Techniques Based Power System Stabilizer's: An Overview // *International Journal on Emerging Technologies*, 2013. Vol. 4, no. 1. Pp. 50–54.
10. *Monika G., Singh B., Khanna R.* Power System Stability and Optimization Techniques: An Overview // *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2014. Vol. 1, no. 1. Pp. 50–54.
11. *Mahdad B.* Optimal reconfiguration and reactive power planning based fractal search algorithm: A case study of the Algerian distribution electrical system // *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 2019. Vol. 22, no. 1. Pp. 78–101.
12. *Niu M., Wan C., Xu Z.* A review on applications of heuristic optimization algorithms for optimal power flow in modern power systems // *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2014. Vol. 2, no. 4. Pp. 289–297.
13. *Shi R., Cui C., Su K., Zain Z.* Comparison Study of Two Meta-heuristic Algorithms with Their Applications to Distributed Generation Planning // *Energy Procedia*, 2011. Vol. 12, no. 1. Pp. 245–252.
14. *Hosseini M., Baghipour R.* Optimal Placement of DGs in Distribution System including Different Load Models for Loss Reduction using Genetic Algorithm // *Journal of Advances in Computer Research*, 2013. Vol. 4, no. 3. Pp. 55–68.
15. *Jin J., Zhou P., Li C., Guo X., Zhang M.* Low-carbon power dispatch with wind power based on carbon trading mechanism // *Energy*, 2019. Vol. 170, no. 1. Pp. 250–260.
16. *Dixit S., Srivastava L., Singh A., Agnihotri G.* Optimal Placement of TCSC For Enhancement of Power System Stability Using Heuristic Methods: An Overview // *International Journal of Hybrid Information Technology*, 2015. Vol. 8, no. 7. Pp. 367–374.
17. *Singh B., Payasi R.P., Shukla V.* A taxonomical review on impact assessment of optimally placed DGs and FACTS controllers in power systems // *Energy Reports*, 2017. Vol. 3, no. 1. Pp. 94–108.
18. *Sedighzadeh M., Rezazadeh A.* Using Genetic Algorithm for Distributed Generation Allocation to Reduce Losses and Improve Voltage Profile // *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2008. Vol. 37, no. 1. Pp. 251–256.
19. *Stanelyte D., Gudzius S., Andriusiene L.* Energy Distribution Planning Models Taxonomy and Methods of Distributed Generation Systems // *Energy Procedia*, 2017. Vol. 107, no. 1. Pp. 275–283.
20. *Reddy S.C., Prasad P.V.N., Laxmi A.J.* Optimal Number and Location of DGs to Improve Power Quality of Distribution System Using Particle Swarm Optimization // *International Journal of Engineering Research and Applications*, 2012. Vol. 2, no. 3. Pp. 3077–3082.
21. *Farhoodnea M., Mohamed A., Shareef H., Zayandehroodi H.* A Comprehensive Review of Optimization Techniques Applied for Placement and Sizing of Custom Power Devices in Distribution Networks // *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, 2012. Vol. 88, no. 11. Pp. 261–265.
22. *Charlangsut A., Rugthaicharoencheep N., Auchariyamet S.* Heuristic Optimization Techniques for Network Reconfiguration in Distribution System // *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*, 2012. Vol. 6, no. 4. Pp. 365–368.
23. *Bansal R.C.* Optimization Methods for Electric Power Systems: An Overview // *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, 2005. Vol. 2, no. 1. Pp. 1–23.
24. *Beheshti Z., Mariyam S., Shamsuddin H.* A Review of Population-based Meta-Heuristic Algorithm // *International Journal of Advances in Soft Computing and its Application*, 2013. Vol. 5, no. 1. Pp. 1–35.
25. *Ibrahim A.M., Swief R.A.* Comparison of modern heuristic algorithms for loss reduction in power distribution network equipped with renewable energy resources // *Ain Shams Engineering Journal*, 2018. Vol. 9, no. 4. Pp. 3347–3358.
26. *Šipoš M., Klaić Z., Fekete K., Stojkov M.* Review of Non-Traditional Optimization Methods for Allocation of Distributed Generation and Energy Storage in Distribution System // *Technical Gazette*, 2018. Vol. 25, no. 1. Pp. 294–301.

УДК 519.718.3

## **ОБЪЕКТ ИНФРАСТРУКТУРЫ «УМНОГО ГОРОДА»: СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ОКРУЖАЮЩЕЙ ОБСТАНОВКИ И ИНФОРМИРОВАНИЯ/ОПОВЕЩЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ**

**Е.А. Басыня**

Новосибирский государственный технический университет,  
Научно-исследовательский институт информационно-коммуникационных технологий  
Россия, 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

**Аннотация.** Одним из возможных инструментов повышения уровня жизни горожан выступает автоматизация управления городской инфраструктурой с использованием информационно-коммуникационных решений. На обзор выносятся оригинальная система мониторинга окружающей обстановки и информирования/оповещения населения в качестве объекта инфраструктуры «умного города». Излагается проектирование и программная реализация клиентской и серверной частей проекта на базе операционной системы Alpine Linux, языка программирования Python, веб-фреймворка Django и технологии контейнеризации Docker. Освещается одно из реализованных аппаратно-программных клиентских решений с использованием беспроводной передачи данных Wi-Fi, 4G/LTE и LoRaWAN. Конечными потребителями данной системы выступают как государственные учреждения, так и частные предприятия. Способы использования жестко не регламентируются, рекомендовано и апробировано внедрение от «умных транспортных остановок» до заводских и городских распределенных систем информирования/оповещения населения с мониторингом окружающей обстановки. Данная работа является логическим продолжением авторского проекта распределенной системы информирования и экстренного оповещения населения. Научная новизна заключается в осуществлении дополнительной проверки подлинности управляющих воздействий на основе скрытой маркировки информационных потоков, автономно вычисляемой и производимой на стороне клиента и сервера через метainформацию о предшествующих сетевых взаимодействиях (трассировке маршрута, командах, временных метках и т. д.). Для достижения данной цели используется функция свертки, осуществляется преобразование данных произвольной длины в выходную битовую строку установленной размерности с последующим сигнатурным сопоставлением с таблицей действий, которые не мешают сетевой коммуникации и не детектируются инструментами автотестирования сетевого трафика. Архитектурно предусмотрена возможность интеграции с авторскими наукоемкими решениями: системой интеллектуально-адаптивного управления сетевой инфраструктурой предприятия, а также модулем самоорганизующегося виртуального защищенного канала связи на основе стохастического многослойного шифрования и оверлейных технологий.

**Ключевые слова:** Smart Cities, умные/интеллектуальные объекты, системы информирования и оповещения населения, системы мониторинга окружающей среды, TCP/IP, беспроводная передача данных, Wi-Fi, 4G/LTE, LoRaWAN, управление информационными потоками, безопасность информационных ресурсов.

---

Басыня Евгений Александрович (к.т.н.), доцент Новосибирского государственного технического университета, директор Научно-исследовательского института информационно-коммуникационных технологий.

## **Введение**

Развитие концепции «умного города» становится одним из ключевых векторов социально-экономического развития населенных пунктов. Эффективное управление городской инфраструктурой может быть осуществлено посредством внедрения современных наукоемких технических решений для автоматизации информационных и рабочих процессов всех сфер жизнедеятельности общества. Интеллектуальное управление городскими ресурсами и услугами поможет оптимизировать загрузку транспортных магистралей и потребление ресурсов жилищно-коммунального хозяйства, улучшить экологическую ситуацию, создать единую гибкую экосистему сервисов для граждан. Конечной целью данных мероприятий выступает повышение качества жизни населения с оптимизацией финансовых издержек на ее сопровождение.

В Российской Федерации идея «умного города» закреплена в национальном проекте «Жилье и городская среда» и программе «Цифровая экономика». В республике Казахстан концепция нашла отражение в государственной программе «Цифровой Казахстан». Евросоюз закрепил ее в отдельном пункте стратегического плана развития Европы и инвестирует через различные фонды программы двойных дипломов, международный обмен опытом, совместные научно-технические изыскания в этой сфере. В качестве примера можно привести программу «SMARTCITY: Innovative Approach Towards a Master Program on Smart Cities Technologies» (проводимую с 15 ноября 2018 г. по 14 ноября 2021 г.), целью которой является создание нового поколения междисциплинарных инженеров информационно-коммуникационных технологий в сфере «интеллектуальных/умных городов». Проект соответствует принципам Болонского процесса и направлен на развитие Европейского пространства высшего образования.

Соответственно, научным сообществом в данной сфере производится множество научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Труды О.А. Ивашука, И.С. Константинова, О.П. Архипова, А.В. Коськина, О.В. Пилипенко направлены на развитие общих концепций формирования специализированных автоматизированных систем без учета и проработки прикладной реализации [1–3]. Изыскания S. Paiva, D. Santos, J.F. Rosaldo, M.A. Munizaga, C. Palma, V. Moustaka, A. Vakali, L.G. Anthopoulos носят прикладной характер в области определения городских показателей через компьютерное зрение, сбора и аналитики данных [4–7]. Однако предлагаемые методы не учитывают реального объема данных и не могут быть масштабируемы без архитектурных изменений.

Основная проблематика заключается в сложном междисциплинарном подходе к обустройству «умных городов», конвергенция отраслей и технологий лишь начинает развиваться. Даже в технической сфере нет единой модели стандартизации и унифицированного стека технологий для разработки программных и аппаратно-программных решений, которые выступили бы катализатором развития индустрии и позволили распараллеливать научные изыскания с гарантированной совместной взаимной интеграцией, в том числе с существующими инфраструктурными объектами.

Решение данной проблемы может быть выработано только коллаборацией ведущих международных научно-исследовательских институтов с последующим оформлением технических стандартов. Альтернативный путь развития – конкурентная война гигантов индустрии информационных технологий в попытке занять и монополизировать нишу рынка, что и происходит на текущий момент: Huawei, Apple и множество других компаний конкурируют в разработке опера-



ционных систем для интернета вещей (англ. internet of things, IoT) и собственных стеков технологий для «умных домов» и «умных городов».

Осуществляя декомпозицию выделенной проблематики, следует выделить сложность совмещения федеральных систем оповещения населения о чрезвычайных ситуациях с инструментами оповещения о функционировании городской инфраструктуры. Актуальность данной тематики обусловлена необходимостью своевременного таргетированного донесения информации до населения с целью оптимизации процессов различных сфер его деятельности.

### **Цель работы и постановка задач**

Целью данной работы являлась разработка и исследование системы мониторинга окружающей обстановки и информирования/оповещения населения в качестве объекта инфраструктуры «умного города». Целевыми потребителями данной системы выступают как государственные учреждения, так и частные предприятия.

Способы использования жестко не регламентируются, рекомендовано и апробировано внедрение от «умных транспортных остановок» до заводских и городских распределенных систем информирования/оповещения населения (в том числе о чрезвычайных ситуациях) с мониторингом окружающей обстановки. Данная работа является логическим продолжением проекта распределенной системы информирования и экстренного оповещения населения с применением беспроводной передачи данных [8].

Научная новизна заключается в осуществлении дополнительной проверки подлинности управляющих воздействий на основе скрытой маркировки информационных потоков, автономно вычисляемой и производимой на стороне клиента и сервера через метаинформацию о предшествующих сетевых взаимодействиях.

### **Предлагаемое решение**

На этапе проектирования системы мониторинга окружающей обстановки и информирования/оповещения населения было принято решение использовать распределенную клиент-серверную архитектуру, функционирующую в глобальной сети Интернет (рис. 1).

Клиентский модуль системы представляет собой комплекс аппаратно-программного обеспечения, производящего информирование/оповещение граждан в режиме реального времени или проигрывающего аудиотреки согласно установленному расписанию, а также осуществляющего сбор и передачу информации с проводных и беспроводных датчиков (от температуры до уровня веществ в воздухе) центральному серверу.

Для осуществления данных функций были задействованы технологии беспроводной передачи данных Wi-Fi (англ. Wireless Fidelity), 4G/LTE (англ. Fourth Generation / Long-Term Evolution) и энергоэффективной сети дальнего радиуса действия LoRaWAN.

Организация защиты процесса сетевого взаимодействия может осуществляться стандартными технологиями VPN (англ. Virtual Private Network) или с использованием авторской системы самоорганизующегося виртуального защищенного канала связи на основе стохастического многослойного шифрования и оверлейных технологий для обеспечения наивысшего уровня информационной безопасности [8].

Серверная часть представляет собой программную платформу, которая может быть интегрирована в авторскую систему интеллектуально-адаптивного управления сетевой инфраструктурой предприятия [9–10] или представлена отдельным сервисом операционной системы Linux. В первом случае применяются наукоемкие технические решения в области системного анализа, управления и обработки информации, повышающее безопасность, надежность и отказоустойчивость технической системы.



Рис. 1. Архитектура серверной части системы

Существует два общих подхода к организации управления информационной инфраструктурой предприятия: централизованный и децентрализованный. Исследованиями в данной области занимаются российские и зарубежные ученые. Работы И.Ю. Павлова, В.Л. Колоскова, Е.Б. Иванова, А. Бирюкова, А.Н. Зуева, А.А. Лукичева, Е.С. Басана, Н.В. Михайлова. предлагают методы централизованного управления и администрирования сетевых устройств и информационных систем [11–14].

Снижение временных издержек на системное и сетевое администрирование является преимуществом предлагаемых решений. К сожалению, с точки зрения информационной безопасности подобные подходы формируют единую точку входа в информационную инфраструктуру предприятия, представляющую для злоумышленника интерес по ее взлому или выводу из состояний доступности.

Другой интересной стратегией хакера может выступать атака имперсонацией и фальсификацией информационных потоков (в том числе управляющих воздействий), от которой не защищают предложенные методы. Данная угроза и возможность ее эксплуатации обусловлены уязвимостями стека протоколов TCP/IP, базовые протоколы которого даже не производят проверку подлинности субъекта взаимодействия. В качестве простых примеров можно привести ARP и DHCP спуфинг.

В целях совмещения преимуществ централизованного и децентрализованного подходов с нивелированием рисков информационной безопасности было решено ввести дополнительную проверку подлинности управляющих воздействий.

Для этого был разработан оригинальный алгоритм скрытой маркировки информационных потоков, автономно вычисляемой и производимой на стороне клиента и сервера через метаинформацию о предшествующих сетевых взаимодействиях (трассировке маршрута, командах, временных метках и т. д.).

Данная информация передается хеш-функции, осуществляющей преобразование данных произвольной длины в выходную битовую строку установленной размерности. Далее идет сигнатурное сопоставление с таблицей действий, которые не вызывают подозрений у глобального наблюдателя, не мешают сетевой коммуникации. Например, работа с параметрами заголовков дейтаграмм – от модификации простых полей IP пакетов DSCP (англ. Differentiated Services Code Point) до связанной обработки идентификаторов и флагов. Аналогичные действия можно производить и в теле дейтаграмм, включая непосредственные управляющие воздействия сервера. Вариант хеш-функции администратор системы выбирает самостоятельно, как и производит составление таблицы действий.

Таким образом, у заказчиков присутствует возможность применения ноу-хау для повышения уровня безопасности информационных ресурсов. Очередной интересной опцией предлагаемого решения выступает подсчет проходимости пешеходного трафика в локациях через статистическую обработку устройств в зоне действия Wi-Fi сети. Далее рассматриваются проектирование и разработка аппаратно-программных компонентов системы.

### **Программная реализация предлагаемого решения**

Для реализации серверной части использовался язык программирования Python и веб-фреймворк Django для веб-интерфейса и API (англ. application programming interface). Вместо Django ORM (англ. Object-Relational Mapping) для доступа к базе данных (БД) используются SQL-запросы. Для выполнения периодических и отложенных задач используется Celery. PostgreSQL задействована в качестве системы управления базами данных (СУБД). Роль сервера приложения играет UWSGI, роль веб-сервера – Nginx. Код сервера, а также различные сервисы (Nginx, OpenVPN server и др.) запускаются внутри Docker-контейнеров.

Архитектура серверной части системы мониторинга окружающей обстановки и информирования/оповещения населения в качестве объекта инфраструктуры «умного города» представлена на рис. 2.

Одним из ключевых элементов архитектуры является контроллер платформы (англ. Platform controller) – средство достижения инкапсуляции, изоляции и управления информационными потоками между модулями системы.

Администрирование предлагаемого решения осуществляется через веб-интерфейс и включает следующие функции для оператора системы (рис. 3):

- авторизация, настройка, конфигурирование учетных записей пользователей/групп;
- загрузка аудиотреков;
- создание, редактирование, удаление плей-листов;
- конфигурирование расписаний и режимов работы;
- вещание в режиме онлайн;
- управление устройствами;
- мониторинг и аналитика функционирования устройств, показаний датчиков (телеметрия);
- вывод устройств на карте;
- управление информационной безопасностью;

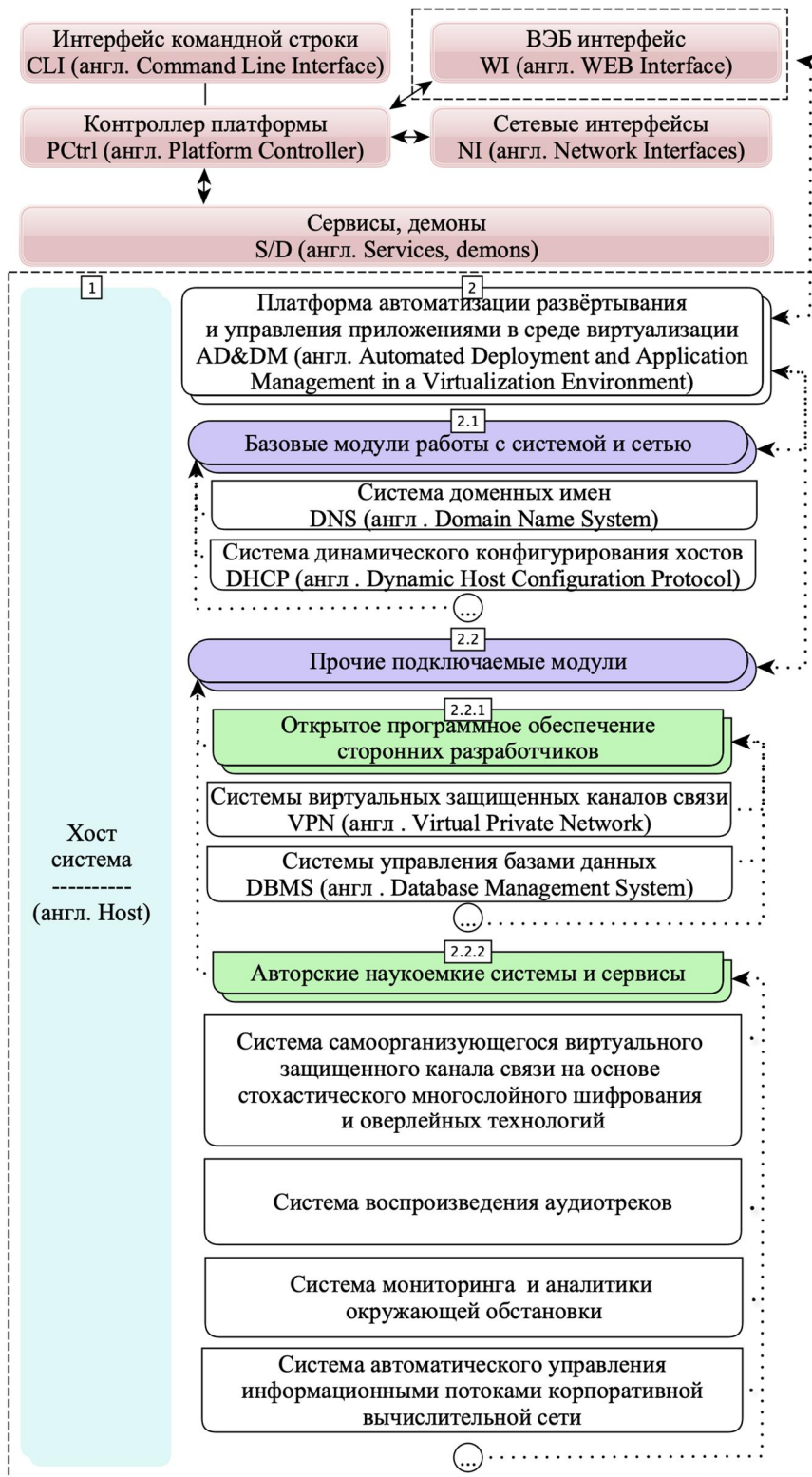


Рис. 2. Архитектура серверной части системы

- оповещение и информирование в режиме реального времени;
- обновление прошивки устройств;
- техническая поддержка;
- справочная информация.

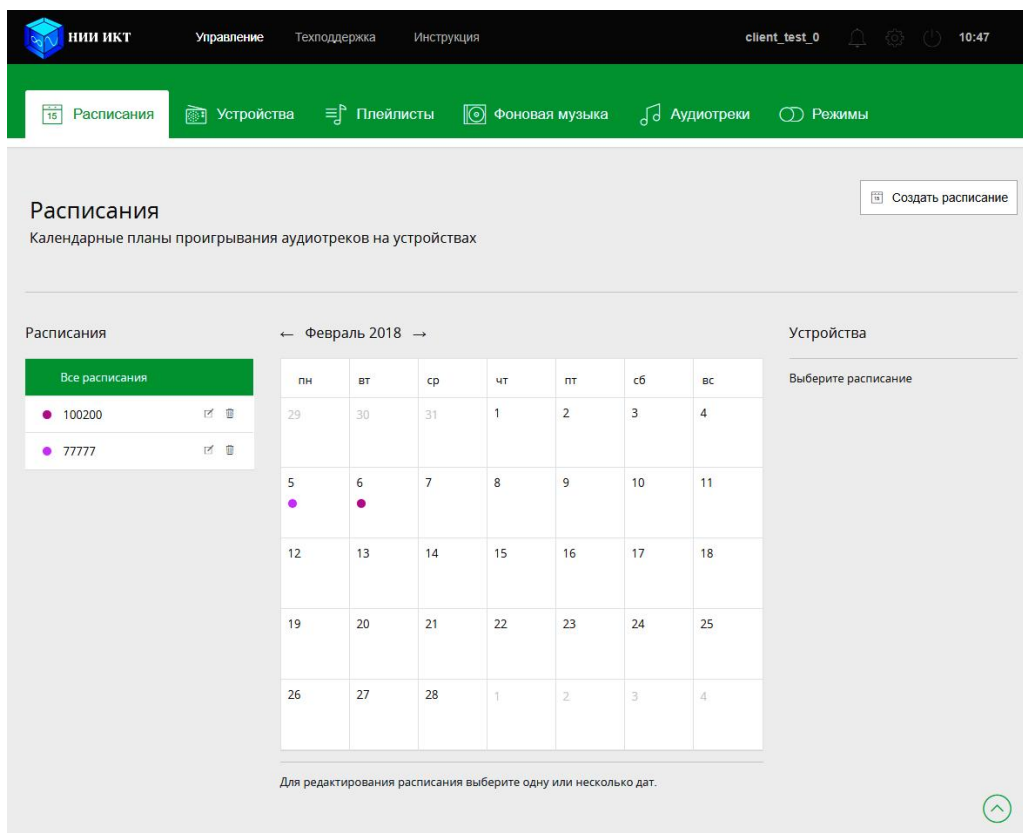


Рис. 3. Веб-интерфейс панели администрирования

Через веб-интерфейс редактируется содержимое базы данных, на сервер загружаются аудиотреки. Информация БД задействуется API для генерации ответов клиентам. Отправка клиентам системы аудиотреков осуществляется по протоколу HTTP внутри виртуальных защищенных каналов связи веб-сервером Nginx.

API предоставляет функционал обновления прошивок, регистрации новых хостов, получения конфигурации клиентов, получения списка аудиотреков для воспроизведения, вещания в режиме онлайн, отправки сведений о функционировании устройства и показании датчиков (телеметрия).

Клиентской частью системы является многопоточное приложение, ведущее трансляцию в режиме реального времени либо получающее от API список аудиотреков для воспроизведения и сами файлы от веб-сервера Nginx с дальнейшим воспроизведением согласно настройкам (в том числе по расписанию).

Дополнительный функционал заключается в сборе информации о состоянии всех аппаратно-программных компонентов хоста и датчиков мониторинга окружающей обстановки/среды для передачи на головной сервер. Таким образом осуществляется телеметрия. При реализации клиентской части использовался язык программирования Python. Аудиоплеер Mpg321 задействуется для воспроиз-

изведения треков, управление громкостью осуществляется Alsa mixer. Клиенты виртуальных защищенных каналов связи, код клиента и другие сервисы контейнеризованы технологией Docker.

Для автоматизации процесса системного администрирования была реализована функция удаленного обновления прошивки устройств и написаны следующие Ansible скрипты для операционной системы Alpine Linux: конфигурирование сетевых настроек, Apk репозитория (для обновления пакетов) и межсетевое экран, включение модуля tun ядра (требуется для технологий VPN), установка и настройка OpenNTP клиента, сервисов виртуальных защищенных каналов связи, OpenSSH сервера, Docker, Gitlab Runner (для обновления серверного ПО через Gitlab Continuous Integration). Целевое назначение данных скриптов – автоматическая развертка, настройка и управление конфигурациями системы.

### **Одно из аппаратных решений клиентской части системы**

В ходе выполнения работы было спроектировано и реализовано несколько аппаратно-программных решений под разных заказчиков. В качестве примера на обзор выносится один из возможных вариантов (рис. 4), аппаратная часть которого состоит из нескольких модулей:

- одноплатный микрокомпьютер Raspberry Pi 3B;
- источник питания (ИП);
- источник бесперебойного питания (ИБП);
- усилитель низких частот (УНЧ);
- громкоговоритель;
- микроконтроллерная плата Arduino Micro с проводными датчиками;
- беспроводные датчики (технология LoRaWAN);
- USB-модем 4G/LTE.

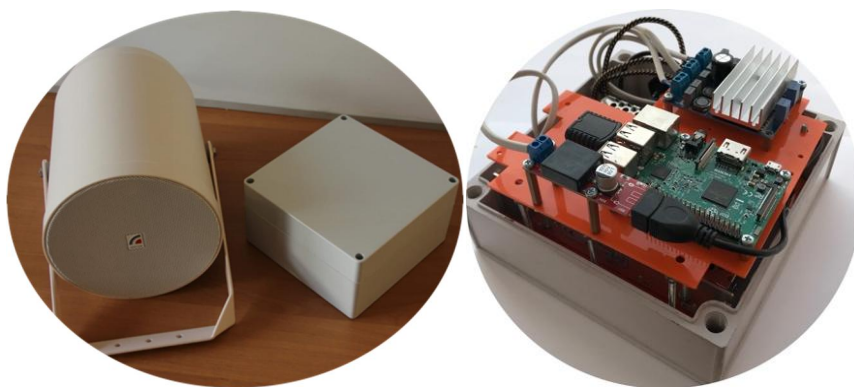


Рис. 4. Пример клиентского аппаратного решения

Сердцем системы является микрокомпьютер Raspberry Pi 3B – одна из последних моделей из линейки популярных одноплатных компьютеров Raspberry Pi. На его плате находятся процессор, оперативная память, разъем HDMI, композитный видео/аудио выход, 4 порта USB 2.0, интерфейсы связи Ethernet, Wi-Fi и Bluetooth. Также на плате расположены 40 контактов ввода/вывода общего назначения (GPIO).

Штатной операционной системой для Raspberry Pi является Linux, устанавливаемая на microSD карту, подключаемую в специальный слот на плате.

На Raspberry Pi 3 установлен 64-битный четырехъядерный процессор ARM Cortex-A53 с тактовой частотой 1,2 ГГц на ядро в составе однокристальной платформы Broadcom BCM2837. Микрокомпьютер имеет 1 Гб оперативной памяти, которая делится с графической подсистемой. Ядром графической подсистемы является графический двухъядерный процессор VideoCore IV®, поддерживающий стандарты OpenGL ES 2.0, OpenVG, MPEG-2, VC-1 и способный кодировать, декодировать и выводить Full HD-видео (1080p, 60 FPS, H.264 High-Profile).

Источником питания является импульсный преобразователь напряжения 220 В переменного тока в напряжение 24 В (по умолчанию, может меняться в зависимости от условий потребителя) и 5 В постоянного тока для питания подсистемы вывода звука и микрокомпьютера соответственно. В качестве ИП используются промышленно выпускаемые блоки компании Mean Well серии G3. Данные блоки питания характеризуются доступной ценой, неплохим типовым ПД (73–86 %), удовлетворительным уровнем помех (до 80–200 мВ в зависимости от выходного напряжения), обладают встроенной защитой от короткого замыкания, перегрузки и перенапряжения, с гарантией от производителя 3 года.

Для предотвращения потери информации и выхода из строя microSD карты памяти микрокомпьютера Raspberry Pi в случае потери питания, а также для обеспечения «мягкого» отключения устройства используется источник бесперебойного питания с литий-ионным аккумулятором.

В случае исчезновения питающего напряжения на входе устройства аудиосистема отключается. ИБП продолжает питать микрокомпьютер Raspberry Pi от аккумулятора, одновременно сигнализируя по одному из портов GPIO («сигнальный») о потере питания. Питание прекращается по отрицательному фронту сигнала на другом порту GPIO («управляющий»), сигнализирующем о завершении работы операционной системы микрокомпьютера. В случае если на момент завершения работы внешнее питание системы восстановлено, ИБП на короткий промежуток времени отключает и снова подключает микрокомпьютер для инициализации повторного запуска его операционной системы.

Программное обеспечение клиентского устройства запрограммировано следить за сигналом на определенном порту GPIO и по отрицательному фронту сигнала запускать процедуру «мягкого» отключения. Эта процедура выглядит следующим образом:

- после включения устройства, запуска и инициализации необходимых служб сигнал на «управляющем» порту GPIO устанавливается в значение «Истина». Это означает, что запуск устройства произошел нормально и оно готово к мягкому отключению;
- по отрицательному фронту сигнального порта GPIO происходит запуск таймера на 1 секунду. Если в течение этого времени питание было восстановлено – таймер сбрасывается и дальнейших действий не предпринимается;
- если таймер завершил свою работу и питание не было восстановлено – запускается процедура остановки компонентов системы;
- после остановки компонентов происходит остановка системы. Микрокомпьютер Raspberry Pi устроен таким образом, что при остановке системы состояние портов GPIO сбрасывается – этот сброс порождает отрица-

тельный фронт сигнала на управляющем порту GPIO (переход из состояния «Истина» в состояние «Ложь»).

Усилитель низких частот представлен блоком устройства, от которого зависят громкость и чистота звука системы оповещения, количество и характеристики подключаемых громкоговорителей, а также мощность и преобразованное напряжение используемого ИП.

Устройством преобразования электрического сигнала в акустические волны выступает громкоговоритель. Стандартным решением принято использовать Roxton SW-20T, если другое не оговорено с потребителем.

Система мониторинга окружающей обстановки и информирования/оповещения населения предоставляет возможность подключения как проводных, так и беспроводных LoRaWAN датчиков. Устройство Raspberry Pi 3B не имеет аналого-цифрового преобразователя, коммутация проводных датчиков осуществляется посредством платы Arduino Micro на шину SPI микрокомпьютера Raspberry Pi 3B. В зависимости от целевого назначения системы возможно подключение различных типов датчиков: температуры, давления, влажности, кислотности, освещенности, уровня различных веществ, вибраций и многих других. Первичная обработка и фильтрация сигнала осуществляются мощностями Arduino. Полученные данные отправляются на сервер для дальнейшей обработки и аналитики.

Беспроводной датчик – это специализированное устройство с автономным питанием, преобразующее входное физическое воздействие в аналоговый или цифровой сигнал, агрегирующий полученные данные в информационные пакеты малого размера и передающий их серверу короткими сессиями через относительно большие временные интервалы. Типовые варианты применения беспроводных датчиков:

- подсчет событий – с периодическим уведомлением (например, счетчики водо- и газоснабжения, счетчики пассажиропотока);
- сбор информации – с периодическим уведомлением (например, погодные станции, датчики уровня жидкости);
- уведомление о событии – со срочным уведомлением (например, противопожарные датчики задымления, тревожные кнопки, сигнализации).

В конфигурации устройства с возможностью подключения беспроводных датчиков присутствует дополнительный модуль LoRaWAN шлюза, основанный на чипах модулирующего процессора Semtech SX1308 и приемопередатчика Semtech SX1272, работающий в нелицензируемом радиочастотном диапазоне 868 МГц. Мощность сигналов в сети LoRaWAN не превышает установленных российским законодательством ограничений. Информация с беспроводных датчиков перенаправляется на основной сервер через глобальную сеть Интернет для дальнейшего анализа.

Устройства LoRaWAN характеризуются низким энергопотреблением: срок службы автономного датчика от одного элемента питания формата AA (пальчиковая батарейка) может составлять более одного года. Они обладают большой дальностью связи и высокой устойчивостью к помехам, обеспечивая прием сигнала до 10 км на открытой местности и до 3 км в условиях городского ландшафта и естественного для города уровня радиозащумления. В случае необходимости увеличить зону покрытия или повысить качество связи с датчиками в местах с высокой плотностью застройки можно разместить несколько клиентских устройств, разделяющих одну беспроводную сеть.



Одним из ограничений применения технологии LoRaWAN является значительное ухудшение качества приема сигнала при установке шлюза в непосредственной близости с базовыми станциями операторов сотовой связи [15], а также законодательный запрет на использование радиоаппаратуры, работающей в частотном диапазоне 868 МГц, на территории аэропортов.

Таким образом, одно из реализованных аппаратно-программных решений клиентской части системы, представленное в настоящей работе, является надежным, отказоустойчивым объектом и может быть воспроизведено читателем.

### Тестирование и исследование предлагаемого решения

Для проверки работоспособности аппаратно-программного продукта выполнялось ручное и автоматизированное тестирование на всех этапах разработки (пример представлен на рис. 5). В ходе данного процесса использовалось модульное тестирование, написанное на технологии Testinfra. Задействовались docker-py и другие модули языка Python, подходящие для тестирования инфраструктуры. Использовалась связка Vagrant/Virtualbox и контейнеризации компонентов системы. Продукт полностью покрыт инфраструктурными тестами. Была осуществлена автоматизация их запуска: при каждом внесении изменений в репозиторий Gitlab запускались юнит-тесты, а при сборке релизов инициализировались интеграционные тесты.

```
===== test session starts =====
platform linux -- Python 3.6.8, pytest-5.0.0, py-1.8.0, pluggy-0.12.0
rootdir: /home/ /workspace/radiolka/client
collected 1440 items

tests/api/test_helpers.py ..... [ 4%]
tests/api/test_http_base.py ..... [ 8%]
tests/api/test_http_rest_protocol.py ..... [13%]
tests/api/test_protobuf_base.py ..... [18%]
tests/api/test_protobuf_protocol.py ..... [24%]
tests/api/test_serializers.py ..... [29%]
tests/modules/audio_playback/test_alsa_mixer_controller.py ..... [33%]
tests/modules/audio_playback/test_codec.py ..... [37%]
tests/modules/audio_playback/test_player.py ..... [41%]
tests/modules/audio_playback/test_scheduler.py ..... [47%]
tests/modules/camera/test_codec.py ..... [51%]
tests/modules/video_playback/test_codec.py ..... [52%]
tests/modules/video_playback/test_framebuffer.py ..... [56%]
tests/modules/video_playback/test_player.py ..... [59%]
tests/modules/video_playback/test_scheduler.py ..... [62%]
tests/sensors/test_controller.py ..... [64%]
tests/sensors/test_noise.py ..... [65%]
tests/sensors/test_processor.py ..... [69%]
tests/sensors/sensors/test_aux_1.py ..... [70%]
tests/sensors/sensors/test_aux_2.py ..... [72%]
tests/sensors/sensors/test_aux_3.py ..... [74%]
tests/sensors/sensors/test_carbon_dioxide.py ..... [79%]
tests/sensors/sensors/test_electromagnetic.py ..... [80%]
tests/sensors/sensors/test_heat.py ..... [86%]
tests/sensors/sensors/test_humidity.py ..... [90%]
tests/sensors/sensors/test_microphone.py ..... [96%]
tests/sensors/sensors/test_pressure.py ..... [100%]

===== 1440 passed in 753.88 seconds =====
```

Рис. 5. Результат примера выполнения части юнит-тестов проекта с использованием фреймворка pytest

Далее производилось ручное экспертное тестирование всех компонентов системы со стороны автора и заказчиков в неблагоприятных погодных условиях города Новосибирска более года. Инструменты сетевого анализа и идентификации автомодельности сетевого трафика не идентифицировали подозрительную сетевую активность или закономерность в информационных потоках со скрытой маркировкой. Таким образом, реализованная техническая система соответствует всем заявленным требованиям, является надежным и отказоустойчивым решением, обеспечивающим высокий уровень информационной безопасности. При этом важно отметить, что при использовании сконфигурированного самоорганизующегося виртуального защищенного канала связи на основе стохастического многослойного шифрования и оверлейных технологий скорость сетевого взаимодей-

ствия может составлять 2 Мбит/с (цена за повышение уровня безопасности). В случае необходимости данный момент нивелируется переключением на стандартные технологии VPN.

### **Заключение**

В рамках представленного проекта была спроектирована, разработана и аппаратно-программно реализована распределенная система мониторинга окружающей обстановки и информирования/оповещения населения в качестве объекта инфраструктуры «умного города». Использовался следующий стек технологий: язык программирования Python, веб-фреймворк Django, операционная система Alpine Linux, СУБД Postgresql, веб-сервер Nginx, виртуальные защищенные каналы связи (OpenVPN и др.), а также различные другие инструменты. Программная инженерия системы обеспечила ее надежное, безопасное и отказоустойчивое функционирование посредством технологий контейнеризации Docker и многослойной изоляции сервисов и потоков. Функционал системы включает информирование/оповещение граждан в режиме реального времени или проигрывание аудиотреков согласно установленному расписанию. Дополнительно выполняется сбор информации с различных типов проводных и беспроводных датчиков и их передача серверному модулю для последующей обработки и анализа. Через веб-интерфейс панели администрирования предоставляется возможность мониторинга и управления всеми функциями и объектами с производением аналитики. На обзор вынесено одно из разработанных аппаратных решений клиентской части системы на базе одноплатного микрокомпьютера Raspberry Pi 3B, микроконтроллерной платы Arduino Micro с проводными датчиками, шлюза LoRaWAN с беспроводными датчиками и модемом 4G / LTE.

Научная новизна заключается в осуществлении дополнительной проверки подлинности управляющих воздействий на основе скрытой маркировки информационных потоков, автономно вычисляемой и производимой на стороне клиента и сервера через метаинформацию о предшествующих сетевых взаимодействиях (трассировке маршрута, командах, временных метках и т. д.). Используется функция свертки. Осуществляется преобразование данных произвольной длины в выходную битовую строку установленной размерности с последующим сигнатурным сопоставлением с таблицей действий, которые не мешают сетевой коммуникации и не детектируются инструментами автотестирования сетевого трафика.

Архитектурно предусмотрена возможность интеграции с авторскими наукоемкими решениями: системой интеллектуально-адаптивного управления сетевой инфраструктурой предприятия, а также модулем самоорганизующегося виртуального защищенного канала связи на основе стохастического многослойного шифрования и оверлейных технологий.

Рекомендовано и апробировано внедрение проекта от «умных транспортных остановок» до заводских и городских распределенных систем информирования/оповещения населения (в том числе о чрезвычайных ситуациях) с мониторингом окружающей обстановки.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Ивацук О.А., Константинов И.С., Архипов О.П.* Подходы к созданию автоматизированной системы управления «умными фермами» // Вестник Орловского государственного аграрного университета. – 2012. – № 5 (38). – С. 15–20.
2. *Коськин А.В., Архипов О.П., Ивацук О.А., Пилипенко О.В.* и др. Базовые принципы построения автоматизированной системы управления безопасным «умным городом» и механизмы их реализации // Строительство и реконструкция. – 2012. – № 2 (40). – С. 63–68.
3. *Архипов О.П., Ивацук О.А., Константинов И.С., Коськин А.В.* и др. Рынок электронных услуг населению в России: проблемы и перспективы // Информационные ресурсы России. – 2011. – № 4 (122). – С. 2–5.
4. *Paiva S., Santos D., Rosaldo J.F.* A Methodological Approach for Inferring Urban Indicators Through Computer Vision // Proceedings of the 2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), Kansas City, MO, USA. 2018. P. 1–7.
5. *Munizaga M.A., Palma C.* Estimation of a disaggregate multimodal public transport origin-destination matrix from passive smartcard data from Santiago Chile // Transportation Research Part C: Emerging Technologies. – 2012. – Vol. 24. – P. 9–18.
6. *Moustaka V., Vakali A., Anthopoulos L.G.* A Systematic Review for Smart City Data Analytics // ACM Computing Surveys (CSUR). 2019. V. 51, no. 5. P. 1–41.
7. *Razumov D., Aleshin V.* Simulation modelling as a tool for design and development in large-scale automated systems: smart city application in terms of lack of statistical information // Advances in systems science and applications. 2018. V. 18, no. 3. P. 79–89.
8. *Французова Г.А., Гунько А.В., Басыня Е.А.* Самоорганизующаяся система управления трафиком вычислительной сети: метод противодействия сетевым угрозам // Программная инженерия. – 2014. – № 3. – С. 16–20.
9. *Басыня Е.А.* Система самоорганизующегося виртуального защищенного канала связи // Защита информации. Инсайд. – 2018. – № 5 (83). – С. 10–15.
10. *Басыня Е.А.* Распределенная система информирования и экстренного оповещения населения с применением беспроводной передачи данных // Вестник компьютерных и информационных технологий. – 2019. – № 1. – С. 37–47.
11. *Павлов И.Ю., Колосков В.Л., Иванов Е.Б.* Анализ централизованных и децентрализованных систем автоматизированного управления «интеллектуальным» домом // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. – 2016. – № 19. – С. 338–340.
12. *Бирюков А.* Решения по централизованному управлению сетевыми устройствами // Системный администратор. – 2015. – № 11 (156). – С. 42–46.
13. *Зувев А.Н., Лукичев А.А.* Централизованная автоматизированная система управления инцидентами информационной безопасности для малых предприятий // Современные информационные технологии. теория и практика: Тр. IV всероссийской научно-практической конференции. – Череповец: ЧГУ, 2017. – С. 177–179.
14. *Басан Е.С., Михайлов Н.В.* Исследование, поиск и устранение уязвимостей для сети мобильных роботов с централизованным управлением // Математические методы и информационно-технические средства: Тр. XIV всероссийской научно-практической конференции. – Краснодар: КУ МВД РФ, 2018. – С. 26–28.
15. *Yang X., Karampatzakis E., Doerr C., Kuipers F.* Security Vulnerabilities in LoRaWAN // Proceedings of the IEEE/ACM Third International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI), Orlando, FL, USA. 2018. P. 129–140.

*Статья поступила в редакцию 2 августа 2019 г.*

# THE SMART CITY INFRASTRUCTURE OBJECT: A SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL MONITORING AND PUBLIC INFORMATION / WARNING

*E.A. Basinya*

Novosibirsk State Technical University,  
Research Institute of Information and Communication Technologies  
20, Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

**Abstract.** *One of the possible tools to improve the living standards of citizens is automation of urban infrastructure management using information and communication solutions. An original system for environmental monitoring and public informing / warning as an infrastructure object of the smart city is reviewed. The design and software implementation of the client and server parts of the project based on the Alpine Linux operating system, the Python programming language, the Django web framework, and the Docker containerization technology are described. One of the implemented hardware and software client solutions using Wi-Fi, 4G / LTE and LoRaWAN wireless data transfer technologies is reviewed. The final consumers of this system are both government institutions and private enterprises. The methods of use are not strictly regulated, the implementation from smart transport stops to factory and city distributed public information / warning systems with environmental monitoring is recommended and tested. This work is an extension of the author's project of a distributed information and emergency public warning system. The scientific novelty lies in the implementation of additional authentication of control actions based on hidden marking of information flows, independently calculated and produced on the client and server side through meta-information about previous network interactions (trace route, commands, timestamps, etc.). To achieve this, the convolution function is used. Data of arbitrary length is converted into an output bit string of a set dimension, followed by signature matching with a table of actions that do not interfere with network communication and are not detected by network traffic self-similarity tools. The architecture provides for the possibility of integration with author's knowledge-intensive solutions: a system for intelligent adaptive management of the enterprise network infrastructure, as well as a self-organizing virtual secure communication channel module based on stochastic multilayer encryption and overlay technologies.*

**Keywords:** *Smart Cities, smart / intelligent objects, public information and warning systems, environmental monitoring systems, TCP / IP, wireless data transmission, Wi-Fi, 4G / LTE, LoRa, information flow management, information resources security.*

## REFERENCES

1. *Ivashhuk O.A., Konstantinov I.S., Arxipov O.P.* Approaches to creating an automated management system for smart farms // Vestnik Orlovskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. 2012. no. 5 (38). Pp. 15–20 (in Russian).
2. *Kos`kin A.V., Arxipov O.P., Ivashhuk O.A., Pilipenko O.V. and oth.* Basic principles of building an automated control system for a safe "smart city" and mechanisms for their implementation // Stroitel'stvo i rekonstrukciya. 2012. № 2 (40). Pp. 63–68 (in Russian).
3. *Arxipov O.P., Ivashhuk O.A., Konstantinov I.S., Kos`kin A.V. and oth.* The market of electronic services to the population in Russia: problems and prospects // Informacionny`e resursy` Rossii. no. 4 (122). Pp. 2–5 (in Russian).
4. *Paiva S., Santos D., Rosaldo J.F.* A Methodological Approach for Inferring Urban Indicators Through Computer Vision // Proceedings of the 2018 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2), Kansas City, MO, USA. 2018. Pp. 1–7.

5. *Munizaga M.A., Palma C.* Estimation of a disaggregate multimodal public transport origin-destination matrix from passive smartcard data from Santiago Chile // *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2012. Vol. 24. Pp. 9–18.
6. *Moustaka V., Vakali A., Anthopoulos L.G.* A Systematic Review for Smart City Data Analytics // *ACM Computing Surveys (CSUR)*. 2019. V. 51, no. 5. Pp. 1–41.
7. *Razumov D., Aleshin V.* Simulation modelling as a tool for design and development in large-scale automated systems: smart city application in terms of lack of statistical information // *Advances in systems science and applications*. 2018. V. 18, no. 3. Pp. 79–89.
8. *Francuzova G.A., Gun'ko A.V., Basinya E.A.* Self-organizing computer network traffic management system: a method to counteract network threats // *Programmnaya inzheneriya*. 2014. no. 3. Pp. 16–20 (in Russian).
9. *Basinya E.A.* The System of Self-Organizing Virtual Secure Communication Channel // *Zašita informacii*. Inside. 2018. no. 5 (83). Pp. 10–15 (in Russian).
10. *Basinya E.A.* Distributed Public Alert and Warning System with the Use of Wireless Data Transmission / *Vestnik komp'yuterny'x i informacionny'x texnologij*. 2019. no. 1. Pp. 37–47 (in Russian).
11. *Pavlov I.Yu., Koloskov V.L., Ivanov E.B.* Analysis of centralized and decentralized systems of automated control of the "smart" house // *Novy'e informacionny'e texnologii v avtomatizirovanny'x sistemax*. 2016. № 19. C. 338–340.
12. *Biryukov A.* Centralized Network Device Management Solutions // *Sistemny'j administrator*. 2015. № 11 (156). C. 42–46.
13. *Zuev A.N., Lukichev A.A.* Centralized automated information security incident management system for small enterprises // *Proceedings of the IV Conference on Modern information technology. theory and practice*, Cherepovets: CSU, 2017. Pp. 177–179.
14. *Basan E.S., Mixajlov N.V.* Research, troubleshooting and vulnerabilities for a network of mobile robots with centralized management // *Proceedings of the XIV Conference on Mathematical methods and information technology tools*, Krasnodar: KU MVD RF, 2018. Pp. 26–28.
15. *Yang X., Karampatzakis E., Doerr C., Kuipers F.* Security Vulnerabilities in LoRaWAN // *Proceedings of the IEEE/ACM Third International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI)*, Orlando, FL, USA. 2018. Pp. 129–140.

УДК 681.51:621.646.4:622.691.4.053

## УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ РЕДУЦИРОВАНИЯ ГАЗА В МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДАХ

**В.В. Крюков, В.В. Тугов**

Оренбургский государственный университет  
Россия, 460018, г. Оренбург, просп. Победы, 13

**Аннотация.** Рассматривается процесс управления редуцированием газа в магистральных газопроводах. Рассмотрен регулирующий клапан высокого давления, который является составной частью узла редуцирования газа. Описан способ управления объектом с использованием классического закона управления, а также критерии, предъявляемые к системе управления. При помощи SCADA комплекса Zond 2006 проведена практическая апробация качества регулирования при различных режимах работы газопровода на реальном объекте управления. Выявлены проблемы и дестабилизирующие факторы, влияющие на качество управления технологическим процессом. Предложен и апробирован метод, основанный на комбинированном подходе, включающий в себя классический закон ПИД-регулирования и процесс адаптации (табличная автонастройка) коэффициентов регулятора под различные режимы работы. Данный метод позволил значительно повысить качество регулирования, а также добиться поддержания заданной уставки при динамически изменяющемся давлении на входе узла редуцирования.

**Ключевые слова:** редуцирование газа, переменный режим работы газопровода, ПИД-регулятор, адаптация, табличная автонастройка, алгоритм, управление.

### Введение

Газовая отрасль Российской Федерации является одним из основных звеньев промышленности. Она включает в себя процессы начиная от добычи газа и заканчивая поставкой его потребителям. Транспортировка газа занимает одну из ведущих ролей. Безаварийная работа трубопроводного транспорта, узлов и агрегатов является основным показателем надежности газотранспортной системы.

Одними из основных звеньев в составе магистральных газопроводов являются узлы редуцирования газа (УРГ). При транспортировке газа по магистральному газопроводу УРГ выполняет функции поддержания заданного давления. Данная функция необходима при перепуске газа между газопроводами с различным максимально разрешенным давлением. Как правило, УРГ высокого давления включает в себя основную и резервную (обводную) линии. На линиях устанавливаются отсечные шаровые краны с блоками управления (БУК), а также регуляторы, на которые возложена основная функция по поддержанию заданного давления (рис. 1). Именно от функционирования данных устройств в целом зависит качество всего производственного процесса [1, 2].

Однако в производственных условиях при работе регуляторов возникают различные проблемы. Основные из них связаны с отсутствием требуемого динамического качества и возникновением автоколебательных процессов, в результа-

---

*Крюков Владимир Викторович, аспирант.*

*Тугов Виталий Валерьевич (к.т.н., доц.), доцент кафедры «Управление и информатика в технических системах».*

те которых значительно снижается точность регулирования. Все это ведет к преждевременному износу механической части клапана и его неработоспособности, что, как следствие, приводит к возникновению аварийных ситуаций на линейной части магистрального газопровода.

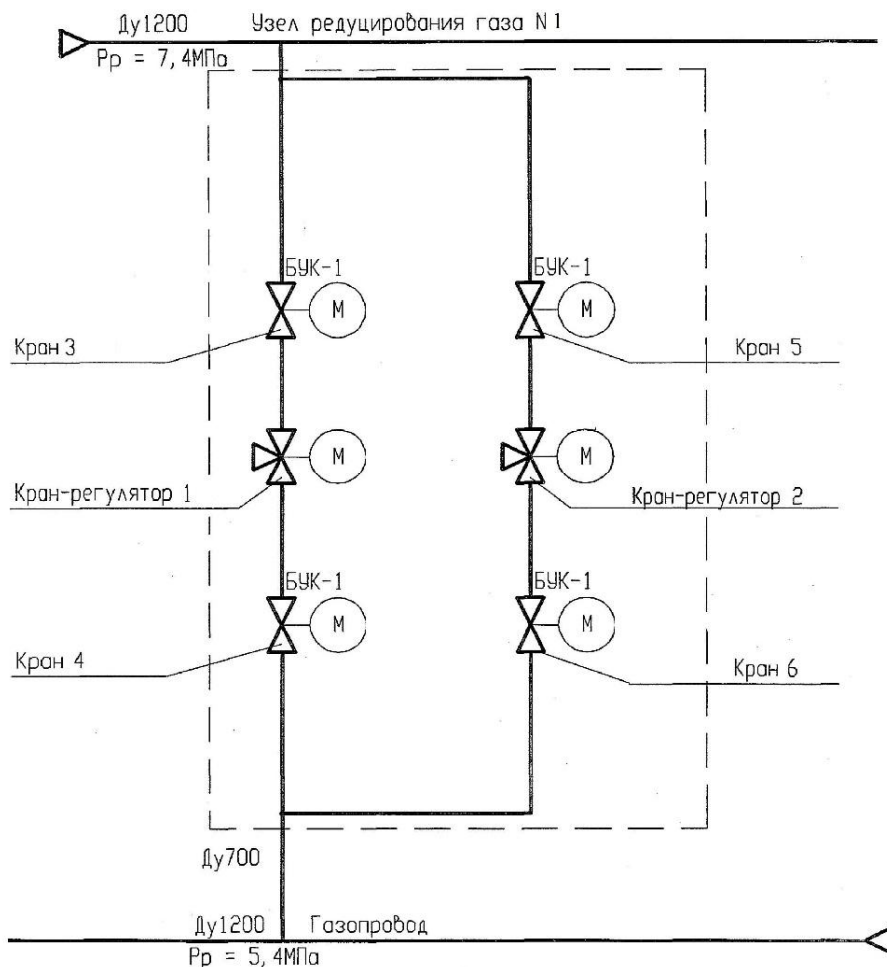


Рис. 1. Технологическая схема узла редуцирования газа

В настоящее время на рынке промышленной автоматизации в качестве системы контроля и управления технологическими процессами широко используются следующие устройства:

- программируемые логические контроллеры (ПЛК);
- промышленные компьютеры;
- сетевой комплекс (plc, network).

Наиболее часто для процесса контроля и управления технологическими параметрами магистрального газопровода используют телемеханические сетевые комплексы. Они состоят из набора контроллеров, объединенных между собой промышленной сетью, реализующих функции телемеханизации технологических узлов магистральной части газопровода, таких как узел редуцирования, узел приема-запуска очистного устройства, узел замера расхода газа и т. д.

Для процесса управления регулирующим клапаном применяется ПЛК (рис. 2). Он представляет собой дискретный автомат с программным управлением, имеющий набор входных и выходных сигналов, к которым подключаются датчики и исполнительные механизмы.

ПЛК контролирует состояние текущих входных параметров, сопоставляет их с заданными условиями (уставкой) и выдает управляющий сигнал на исполнительные механизмы [3].

ПЛК нашли широкое применение в газовой отрасли в связи с тем, что имеют повышенную устойчивость к воздействию окружающей среды, небольшие габариты, модульность и расширяемость, хорошую ремонтопригодность (низкие временные затраты на восстановление работоспособности), флэш-память и наличие сторожевого таймера (который защищает алгоритмы системы управления от зависания). Также неоспоримым достоинством ПЛК является наличие большого числа промышленных интерфейсов, таких как CAN, RS-232, RS-422, RS-485 Ethernet и т. д. [4].

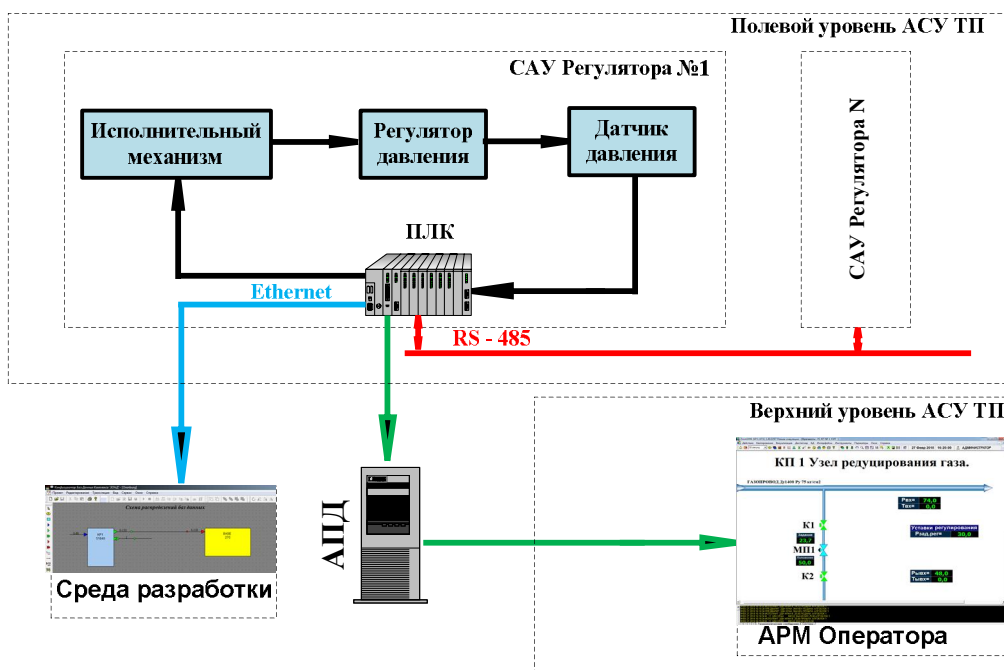


Рис. 2. Функциональная схема системы управления

### Описание способа управления

Использование ПЛК в качестве устройства управления позволяет создавать управляющие системы любой сложности [5, 6]. Однако при их реализации возникают определенные проблемы, основной из которых является невозможность поддержания заданного значения давления на выходе узла редуцирования. Все это связано с переменным режимом работы газопровода, который характеризуется динамически изменяющимся входным давлением на узел редуцирования газа [7]. В связи с этим отсутствует возможность корректного функционирования регулирующих механизмов и системы автоматики в целом.

Основные критерии, предъявляемые к системе управления узлом редуцирования газа, заключаются в следующем:



– точность регулирования: давление газа на выходе должно составлять  $\pm 0,1$  кг/см<sup>2</sup>;

– скорость регулирования: достижение заданной уставки по давлению  $\pm 3$  с.

Почти все производители ПЛК включают в свою среду разработки SCADA-системы блок управления, реализованный на законе ПИД-регулирования [7]. Пропорционально-интегрально-дифференциальный регулятор – один из самых распространенных типов регуляторов, однако, как показывает практика, его применение не всегда обеспечивает достаточно высокую точность управления технологическими процессами [8]. Даже достаточно хорошо смоделированный технологический процесс не может учесть полноту описания параметров, влияющих на качество регулирования.

На российском рынке систем автоматизации представлен достаточно обширный список систем, построенных на ПЛК таких фирм, как ТЭКОН, ОВЕН, МСКУ, СТН-3000 и т. д. [9]. Однако ПАО «Газпром» в ходе проведенных испытаний на линейной части магистральных газопроводов была рекомендована к применению система телемеханики «Магистраль-2», не имеющая аналогов в своем классе. Модульный принцип построения, соответствие требуемым характеристикам, а также гибкость функционирования позволили системе занять одно из ведущих мест на рынке автоматизации газотранспортных предприятий.

Данные ПЛК запрограммированы в соответствии с ИЕС 61131 в среде разработки ZondDataBaseConfigurator модуля УСО «Вычислитель», на встроенном в него языке программирования ST (структурированный текст).

В классическом виде работа ПИД-регулятора давления газа описывается следующим математическим выражением [10]:

$$u(t) = P + I + D = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de}{dt}, \quad (1)$$

где  $u(t)$  – управляющее воздействие на регулятор давления;

$e(t)$  – ошибка (рассогласование);

$K_p, K_i, K_d$  – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты усиления регулятора.

На практике широкое распространение получила методика настройки ПИД-регулятора, использующая формулу для определения выходного сигнала, в которой на пропорциональный коэффициент умножена интегрирующая и дифференцирующая составляющая [11]:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + K_{ip} \int_0^t e(\tau) d\tau + K_{dp} \frac{de}{dt} \right). \quad (2)$$

Однако в подавляющем большинстве случаев на производстве подбор коэффициентов ПИД-регулятора осуществляется на основании знаний эксперта.

Ввиду отсутствия полной информации о характеристиках объекта управления и возможным появлением нелинейности и неустойчивости в поведении системы на практике настройка коэффициентов ПИД-регулятора осуществляется методом экспериментальной регулировки [12].

### Апробация САР давления

Для проверки работоспособности блока ПИД-регулятора был проведен эксперимент на УРГ, который показал, что система регулирования давления газа в газопроводе работоспособна (рис. 3).

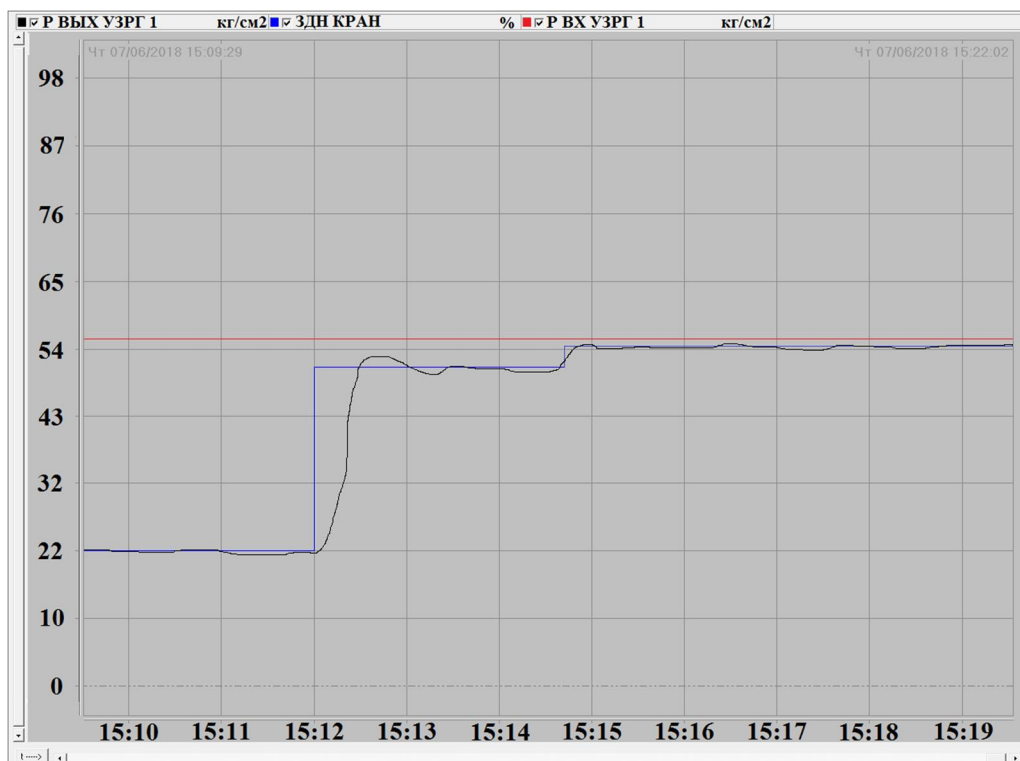


Рис. 3. График работы ПИД-регулятора при статистическом входном давлении:  
P Вых УЗРГ 1 – график выходного давления газа с узла редуцирования;  
ЗДН КРАН – график заданного значения давления на регулятор (уставка);  
P Вх УЗРГ 1 – график входного давления газа на узел редуцирования

Тем не менее, хотя процесс управления практически не имеет статической ошибки (отклонения от заданного давления в установившемся режиме), присутствует динамическое отклонение (перерегулирование). Кроме того, при переходе на более высокую уставку давления возникает появление непрерывных автоколебаний, что отрицательно сказывается на процессе регулирования давления газа.

Далее апробируем работу ПИД-регулятора с переменным режимом работы газопровода. Данный режим обусловлен постоянными динамическими изменениями входного давления в УРГ (рис. 4).

Из графиков на рис. 4 можно сделать вывод о том, что использование системы автоматического ПИД-регулирования в системе редуцирования давления газа возможно, однако для снижения перерегулирования необходимо вносить дополнительные изменения в настройки коэффициентов регулятора в зависимости от изменения давления на входе. Поэтому в системе редуцирования давления газа в сочетании с классическими законами управления необходимо использовать методы адаптивного управления.

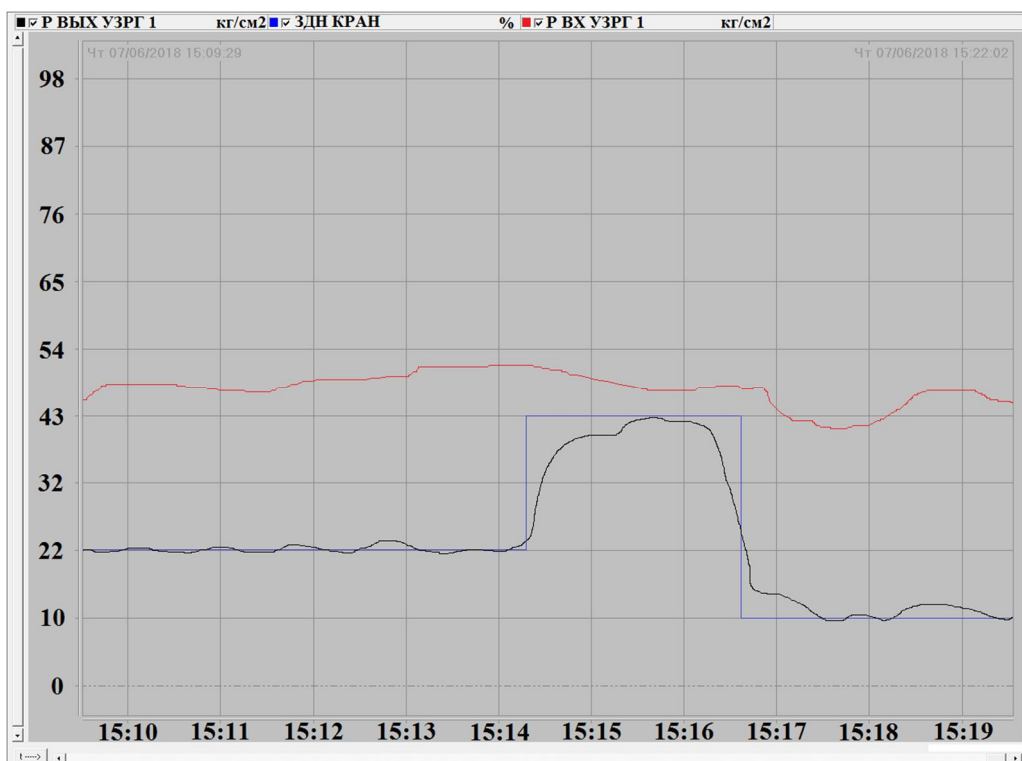


Рис. 4. График работы ПИД-регулятора с динамически изменяющимся входным давлением:

- P ВЫХ УЗРГ 1 – график выходного давления газа с узла редуцирования;
- ЗДН КРАН – график заданного значения давления на регулятор (уставка);
- P ВХ УЗРГ 1 – график входного давления газа на узел редуцирования

### Автоматическая настройка и адаптация

Методы адаптивного управления – это один из выходов, который позволяет свести к минимуму процесс перерегулирования. Но необходимо отметить, что на данный момент отсутствуют простые, надежные и общепринятые методы автоматической настройки. Важно подчеркнуть то, что контроллер не может выдать требуемого качества регулирования несмотря на наличие в нем автоматической настройки и качество заложенных в его память алгоритмов управления. Например, на стадии разработки объект управления может быть недостаточно хорошо спроектирован (иметь зависимые контуры регулирования, большую задержку или высокий порядок объекта); характеристики объекта могут быть нелинейными; датчик может иметь большую погрешность измерения; источник воздействия на объект управления – иметь гистерезис или слишком большую инерционность [13]. Данные факторы обуславливаются невозможностью микропроцессорной техники выполнять сложные и плохо формализованные задачи лучше, чем человек. Исключить данные факторы позволяет такая разновидность адаптации, как разомкнутое управление параметрами ПИД-регулятора (табличная автонастройка) [14].

Опытный эксперт заранее определяет коэффициенты регулятора для разных условий работы системы и заносит их таблицу. При возникновении условий адаптации они извлекаются. Табличная автонастройка может быть использована не только для адаптивного управления, но и для управления нелинейными объ-

ектами и динамическими процессами, такими как постоянно изменяющееся давление на входе регулятора [15, 16]. Разработанная структурная схема адаптивного ПИД-регулятора давления газа представлена на рис. 5.

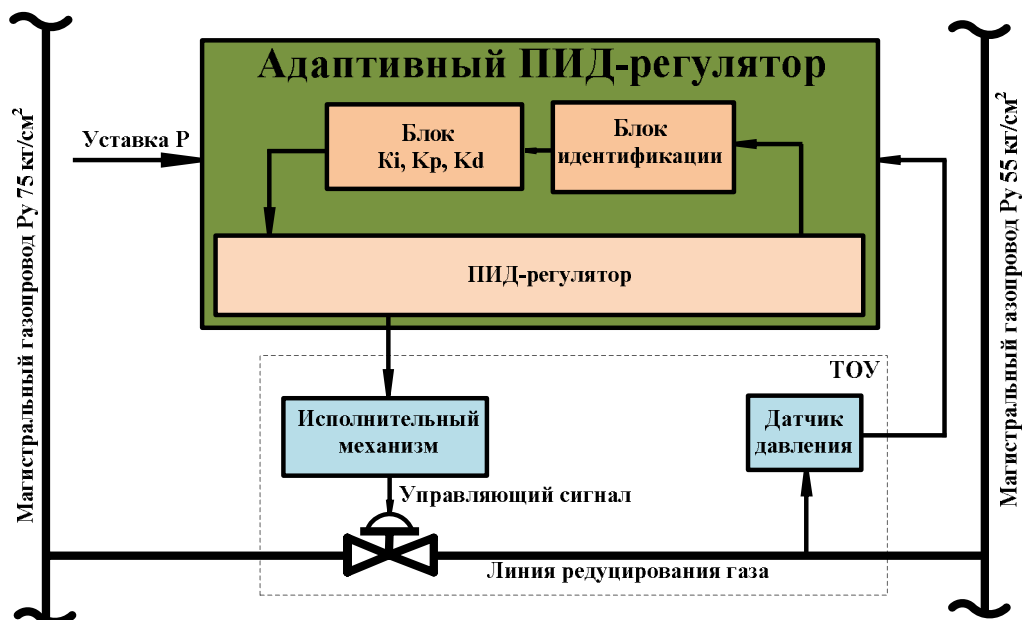


Рис. 5. Адаптивный ПИД-регулятор давления газа

Принцип действия табличного управления регулятором давления газа описывается следующим образом. Заданная уставка давления поступает на вход адаптивного ПИД-регулятора с установленными в нем стартовыми (начальными) коэффициентами. Регулятор, в свою очередь, выдает управляющий сигнал на исполнительный механизм – редуцирующий клапан.

Качество регулирования оценивается путем сопоставления показаний датчика давления, установленного после регулятора, и заданной уставки. Если ошибка регулирования возрастает, в контур системы включается адаптивное звено регулятора, состоящее из блока идентификации и блока коэффициентов регулятора.

Блок идентификации оценивает величину, на которую изменились показания давления за определенный промежуток времени (скорость изменения), по критериям, заложенным экспертом. Например:

- давление газа незначительно увеличилось (уменьшилось) в пределах  $\pm 0,3 \text{ кг/см}^2$ ;
- давление газа возросло (уменьшилось) в пределах  $\pm 0,7 \text{ кг/см}^2$ ;
- давление газа резко возросло (уменьшилось) в пределах  $\pm 1,4 \text{ кг/см}^2$ .

Принадлежность к тому или иному критерию оценивается за счет сравнения установленной величины и величины возмущающего воздействия. Далее сформированный критерий сопоставляется со значениями коэффициентов ПИД-регулятора из таблицы, просчитанной под различные режимы работы.

## Режимные коэффициенты регулятора

Режим работы регулятора		$K_p$	$K_i$	$K_d$
1	P↑(↓)	2,546	0,841	1,967
2	P↑↑(↓↓)	7,482	2,992	4,673
3	P↑↑↑(↓↓↓)	8,993	5,994	3,373

Алгоритм работы данной системы представлен на рис. 6.

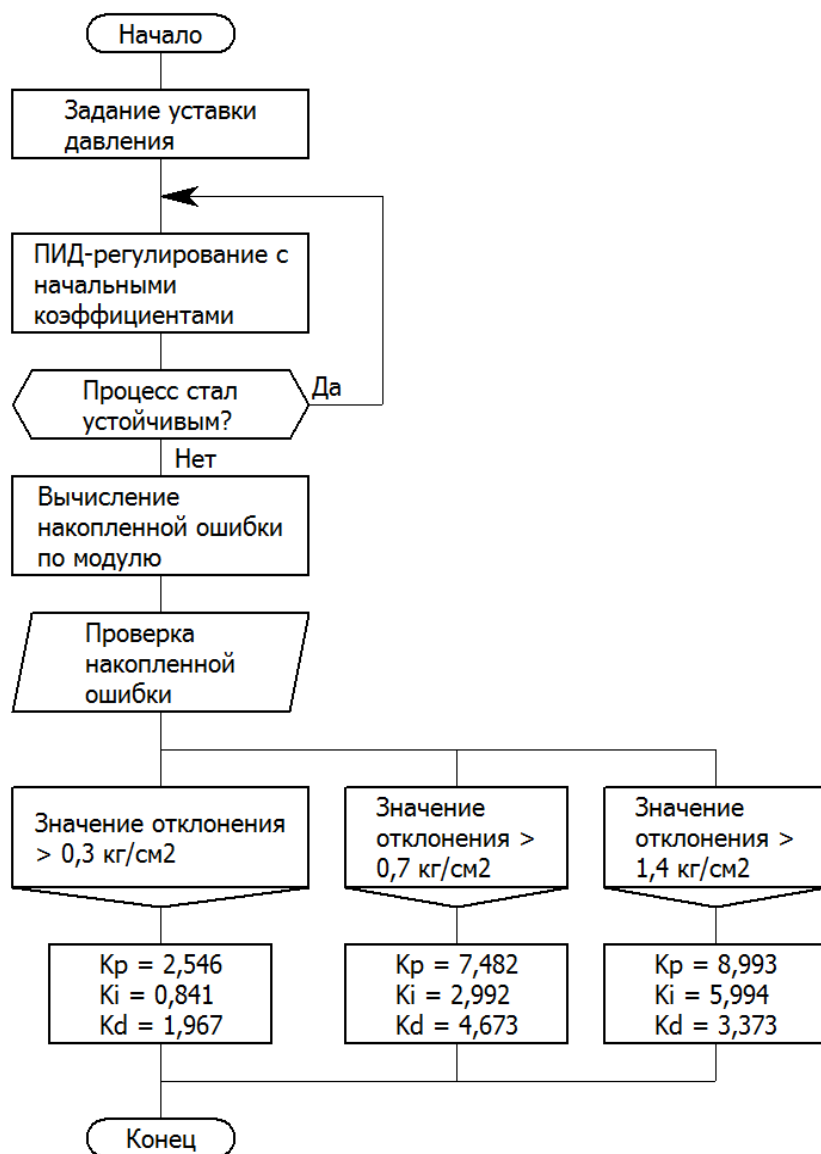


Рис. 6. Алгоритм управления адаптивным ПИД-регулятором с табличной автонастройкой

Разберем последовательность действий данного алгоритма. Оператором (диспетчером) осуществляется задание уставки давления газа на выходе узла редуцирования, и происходит процесс регулирования по ПИД-закону, с начальными коэффициентами. Далее проверяется условие устойчивости процесса регулирования, другими словами, требуемое качество переходного процесса. Если процесс является устойчивым, коэффициенты ПИД-регулятора не изменяются, в противном случае происходит подсчет накопленной ошибки регулирования по модулю. На втором этапе происходит проверка накопленной ошибки и ее идентификация согласно заданным значениям отклонения. Затем происходит подстановка значений коэффициентов ПИД-регулятора, заранее идентифицированных экспертом и занесенных в таблицу.

Рассмотренную систему можно представить как систему, у которой присутствуют два контура регулирования [17]. Контур, используемый для адаптации в рассмотренном случае (с давлением газа на входе регулятора), является разомкнутым. Отсюда следует, что табличное управление характеризуется высоким быстродействием, отсутствием ложного срабатывания или расхождения алгоритмов адаптации (рис. 7).

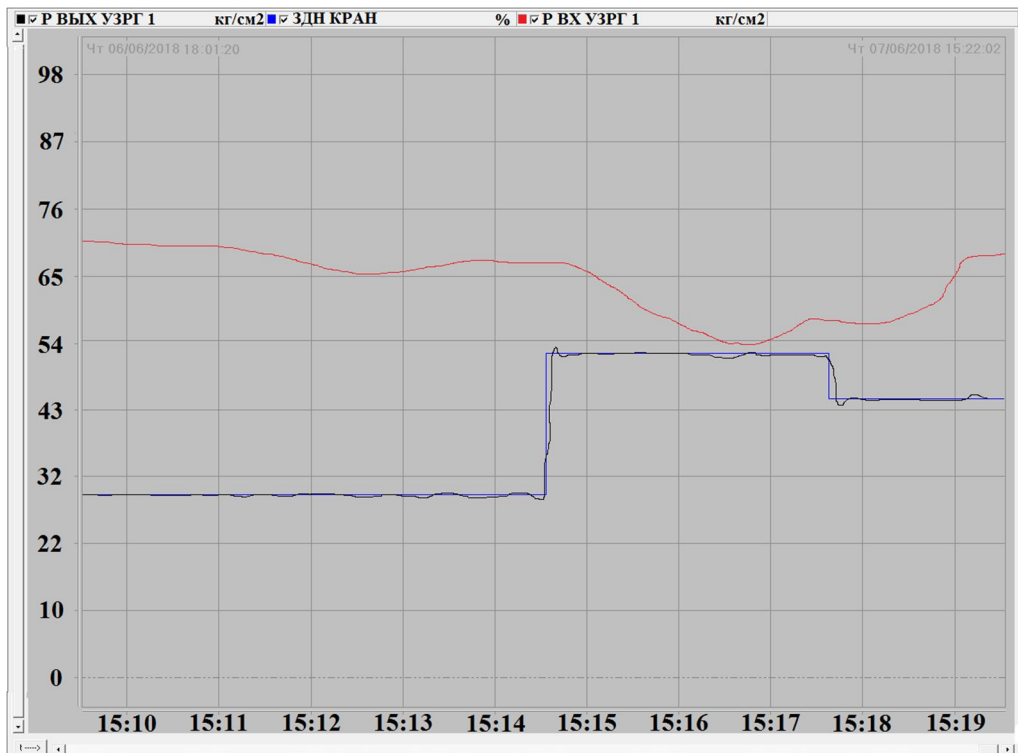


Рис. 7. Работа адаптивного ПИД-регулятора с табличной автонастройкой:  
 P Вых УЗРГ 1 – график выходного давления газа с узла редуцирования;  
 ЗДН КРАН – график заданного значения давления на регулятор (уставка);  
 P Вх УЗРГ 1 – график входного давления газа на узел редуцирования

## Заключение

В данной статье был рассмотрен процесс редуцирования газа в магистральном газопроводе как объект управления, а также произведено наглядное сравнение методов классического и адаптивного регулирования. Из представленных графиков (рис. 3; 4; 7) можно сделать вывод о том, что в ходе рассмотренного технологического процесса классический закон ПИД-регулирования может быть использован только при статистических входных параметрах, в противном случае для управления технологическим процессом необходимо включать блок адаптации. Разработанный алгоритм управления адаптивным ПИД-регулятором (рис. 6) позволяет добиться заданных значений, сочетая в себе классический закон регулирования со знаниями и умениями экспертов, что является неоспоримым достоинством данного метода.

Подводя итоги выше изложенного, можно сделать вывод о том, что такой вид адаптации, как табличное управление, целесообразно применять в тех случаях, когда типы и величина дестабилизирующих факторов известны заранее. Этот метод позволяет значительно улучшить качество регулирования, а также установить взаимосвязь между параметрами объекта, выбрав значения коэффициентов в зависимости от конкретной ситуации. Данный вид адаптации может быть использован для управления нелинейными объектами и динамическими процессами, где существует необходимость изменения параметров в зависимости от определенных условий.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козаченко А.Н. Эксплуатация компрессорных станций магистральных газопроводов. – М.: Нефть и газ, 1999. – 463 с.
2. Крюков В.В., Тугов В.В. Управление редуцированием газа в магистральных газопроводах высокого давления с применением аппарата нечеткой логики // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. – 2019. – № 1 (49). – С. 55–65.
3. Гуревич Д.Ф., Заринский О.Н., Косых С.И. Трубопроводная арматура с автоматическим управлением: Справочник. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. – 320 с.
4. Петров И.В. Программируемые логические контроллеры. Стандартные языки и инструменты. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 256 с.
5. Воронов А.А., Ким Д.П., Лохин В.М. Теория автоматического управления. – М.: Высшая школа, 1986. – С. 504.
6. Крюков В.В. Применение нечеткой логики в процессе управления редуцированием газа в магистральных трубопроводах // Инновационные технологии: теория, инструменты, практика: IX Междунар. интернет-конф. молодых ученых, аспирантов и студентов (InnoTech 2017). – С. 122–127.
7. Денисенко В.В. Компьютерное управление технологическим процессом, экспериментом, оборудованием. – М.: Горячая линия-Телеком, 2009. – С. 608.
8. Куо Б. Теория и проектирование цифровых систем управления. – М.: Машиностроение, 1986. – С. 448.
9. Сергеев А.И., Черноусова А.М., Русяев А.С., Тугов В.В. Системы промышленной автоматизации: учеб. пособие. – Оренбург: ОГУ, 2017. – С. 105.
10. Красовский А.А. Справочник по теории автоматического управления. – М.: Наука, 1987. – С. 712.
11. Денисенко В.В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации // СТА. – 2007. – № 4. – С. 86–97; 2008. – № 1. – С. 99.
12. Олссон Г., Пиани Д. Цифровые системы автоматизации и управления. – СПб. Невский Диалект, 2001. – С. 379.
13. Макаров И.М., Менский Е.М. Линейные автоматические системы. – М.: Машиностроение, 1982. – С. 464.

14. Штейнберг Ш.Е., Серезин Л.П., Залуцкий И.Е., Варламов И.Г. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – № 7. – С. 1–7.
15. Wen Tan, Jizhen Liu, Tongwen Chen, Horacio J. Marquez. Comparison of some well-known PID tuning formulas // Computers and Chemical Engineering. – 2006. – № 30. – P. 1416–1423.
16. Hemerly E.E. PC-based packages for identification, optimization, and adaptive control // IEEE Control Systems Magazine. – Feb. 1991. – Vol. 11. – Issue 2. – P. 37–43.
17. Oviedo J.J.E., Boelen T., van Overschee P. Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006. Vol. 26. Issue 1. – P. 15–19.

*Статья поступила в редакцию 28 июня 2019 года*

## MANAGING THE PROCESS OF REDUCTION GAS IN GAS PIPELINES.

**V.V. Kryukov, V.V. Tugov**

Orenburg state University  
13, Pobedy st., Orenburg, 460018, Russian Federation

**Abstract.** *The control laws of the high-pressure control valve on the gas reduction unit are considered. The system performance testing using the classical law of PID regulation in the SCADA-module Zond 2006 was performed. Identified problems and destabilizing factors affecting the quality of process control. Proposed and approved combined method that combines adaptive PID controller auto-tuning with the (table autotuning). This method has significantly improved the quality of regulation, and allowed to maintain the set value of the pressure at a constantly changing pressure at the inlet of the pipeline.*

**Keywords:** *gas reduction, variable gas pipeline operation mode, PID controller, adaptation, table autotuning, algorithm.*

### REFERENCES

1. Kozachenko A.N. Eksploatatsiya kompressornykh stantsiy magistral'nykh gazoprovodov [Operation of compressor stations of main gas pipelines]. Moskva. Neft' i gaz. 1999. – P. 463 (In Russian).
2. Kryukov V.V., Tugov V.V. Upravlenie reducirovaniem gaza v magistral'nykh gazoprovodakh vysokogo davleniya s primeneniem apparata nechetkoj logiki // Izvestiya vysshih uchebnykh zavedenij. Povolzhskij region. Tekhnicheskie nauki. – 2019. – № 1 (49). – P. 55–65.
3. Gurevich D.F., Zarinskiy O.N., Kosykh S.I. Truboprovodnaya armatura s avtomaticheskim upravleniyem. Spravochnik [Pipe fittings with automatic control. Handbook]. L.: Mashinostroyeniye, Leningr. otd-niye. – 1982. – P. 320 (In Russian).
4. Petrov I.V. Programmruemyye logicheskiye kontrollery. Standartnyye yazyki i instrument [Programmable logic controller. Standard languages and tool] Podred. prof. V. P. D'yakonova. M.: SOLON-Press, 2003. – P. 256 (In Russian).
5. Voronov A.A., Kim D.P., Lokhin V.M. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya [Automatic control theory]. M.: Vysshaya shkola. 1986. – P. 504 (In Russian).
6. Kryukov V.V. Primeneniye nechetkoj logiki v protsesse upravleniya redutsirovaniyem gaza v magistral'nykh truboprovodakh [Application of fuzzy logic in the process of gas reduction control in main pipelines] // Innovatsionnyye tekhnologii: teoriya, instrumenty, praktika: IX Mezhdunarod-

---

Vladimir V. Kryukov, Postgraduate Student.  
Vitaly V. Tugov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.



- noy Internet-konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov (InnoTech 2017). – P. 122–127 (In Russian).
7. *Denisenko V.V.* Komp'yuternoye upravleniye tekhnologicheskim protsessom, eksperimentom, oborudovaniyem [Computer control of technological process, experiment, equipment]. M.: Goryachaya liniya-Telekom, 2009. – P. 608 (In Russian).
  8. *Kuo B.* Teoriya i proyektirovaniye tsifrovyykh sistem upravleniya [Theory and design of digital control systems]. M.: Mashinostroyeniye, 1986. – P. 448 (In Russian).
  9. *Sergeyev A.I., Chernousova A.M., Rusyayev A.S., Tugov V.V.* Sistemy promyshlennoy avtomatizatsii: uchebnoye posobiye [Industrial automation systems: tutorial]. – Orenburg: OGU, 2017. – P. 105 (In Russian).
  10. *Krasovskiy A.A.* Spravochnik po teorii avtomaticheskogo upravleniya [Handbook of automatic control theory]. M.: Nauka, 1987. – P. 712 (In Russian).
  11. *Denisenko V.V.* PID-regulyatory: voprosy realizatsii [PID regulators: implementation issues] // STA, 2007, № 4, P. 86–97; 2008, № 1, P. 99 (In Russian).
  12. *Olsson G., Piani D.* TSifrovyye sistemy avtomatizatsii i upravleniya [Digital automation and control systems]. SPb. Nevskiy Dialekt, 2001. – P. 379 (In Russian).
  13. *Makarov I.M., Menskiy E.M.* Lineynyye avtomaticheskiye sistemy [Linear automatic systems] // M.: Mashinostroyeniye, 1982. – P. 464 (In Russian).
  14. *SHteynberg S.H.E., Serezhin L.P., Zalutskiy I.E., Varlamov I.G.* Problemy sozdaniya i ekspluatatsii effektivnykh sistem regulirovaniya [Problems of creation and operation of effective control systems]. Promyshlennyye ASU i kontrollery. 2004. № 7. – P. 1–7.
  15. *Wen Tan, Jizhen Liu, Tongwen Chen, Horacio J. Marquez.* Comparison of some well-known PID tuning formulas // Computers and Chemical Engineering. – 2006. – № 30. – P. 1416–1423.
  16. *Hemerly E.E.* PC based packages for identification, optimization, and adaptive control // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 1991. Vol. 11. Issue 2. – P. 37–43.
  17. *Oviyedo J.J.E., Boyelen T., van Overscheye P.* Robust advanced PID control (RaPID): PID tuning based on engineering specifications // IEEE Control Systems Magazine. Feb. 2006. Vol. 26. Issue 1. – P. 15–19.

УДК 621.92

## МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТОТЫ КВАНТОВАНИЯ ЭКСТРАПОЛЯТОРА НУЛЕВОГО ПОРЯДКА

**В.Е. Лысов, Я.И. Пешев**

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: 67lysov@mail.ru, stan-samara@list.ru

**Аннотация.** Рассмотрена методика определения частоты квантования экстраполятора нулевого порядка в структуре цифровой позиционно-слеящей системы. Анализ проводится частотным методом. Амплитудно-частотная характеристика дискретных систем определяется как сумма смещенных амплитудно-частотных характеристик аналоговой части системы. В этой связи необходимо определить частоту смещения амплитудно-частотных характеристик непрерывной части системы с таким расчетом, чтобы их сумма в полосе частот сигнала задания не превышала заданной погрешности относительно аналогового прототипа. Полученное значение частоты квантования экстраполятора позволит определить интервал дискретности.

**Ключевые слова:** экстраполятор нулевого порядка, амплитудно-частотная характеристика, передаточная функция, частота задания, период дискретизации.

Цифровые позиционно-слеящие системы нашли самое широкое распространение в качестве электроприводов подач прецизионных установок, и в частности координатно-расточных станков. Сегодняшние требования к качеству изготовления и обработки деталей для последующих технологических операций непрерывно возрастают и входят в зону 2...3 мкм. Обработка или измерение сложного геометрического профиля детали осуществляется упомянутыми системами. В этой связи предъявляются высокие требования к динамике систем с целью минимизации погрешности цифровой системы относительно аналогового прототипа.

В структуре цифровых позиционно-слеящих систем автоматического управления (САУ) присутствует экстраполятор нулевого порядка [1, 2]. Присутствие экстраполятора вносит дополнительную погрешность в воспроизведение сигнала задания. Известно, что амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) дискретного сигнала определяется зависимостью [3]

$$W(e^{jx}) = \frac{1}{T} \sum_{-\infty}^{\infty} W[j(x + 2\pi n)]. \quad (1)$$

Здесь  $x = \omega T$ , причем  $\omega$  – частота,  $T$  – интервал дискретности,  $n$  – номер смещения частоты.

---

Лысов Владимир Ефимович (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Пешев Ярослав Иванович (к.т.н.), старший преподаватель кафедры «Электропривод и промышленная автоматика».

Формула определяет частотную характеристику дискретной системы  $W(e^{jx})$  через частотную характеристику непрерывной части САУ  $W(jx)$  при различных значениях частоты. Анализ зависимости (1) указывает на то, что амплитудно-частотная характеристика дискретной системы определяется как сумма смещенных амплитудно-частотных характеристик непрерывной части системы.

Рассмотрим формирование амплитудно-частотной характеристики цифровой системы, представленной на рис. 1.

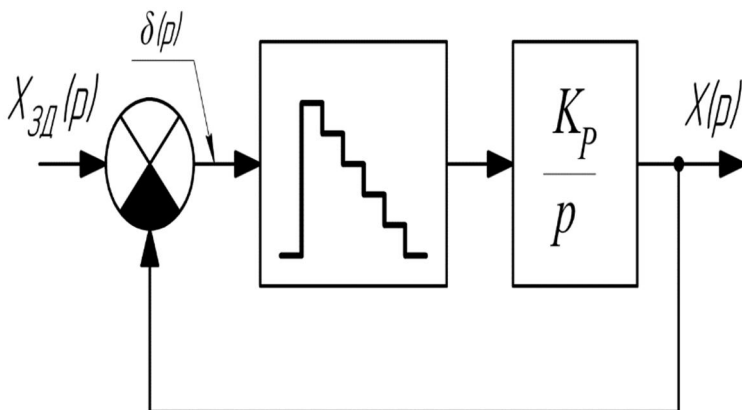


Рис. 1. Структурная схема цифровой позиционно-следящей системы автоматического управления

На структурной схеме обозначена  $\frac{K}{p}$  – приведенная передаточная функция аналоговой части системы. Звено со ступенчатой характеристикой представляет дискретную часть системы в виде экстраполятора нулевого порядка.

Структурно упомянутые системы строятся на основе теории систем подчиненного регулирования [4, 5, 6]. Система имеет три контура: это контуры регулирования тока, скорости и положения. Регуляторы контуров – цифровые. Отметим, что регулятор контура скорости должен быть пропорционально-интегральным, обеспечивающим возможность точного позиционирования подвижного узла. Самым инерционным контуром является контур положения, который, в конечном счете, определяет динамические показатели качества управления всей системы. Следует заметить, что в прецизионных станках требуется обеспечить односторонний подход к заданной координате. Это требование в основном диктуется возможностью исключения влияния люфта в кинематической цепи передачи движения органу станка. Для этого случая на рис. 1 представлен контур положения.

Аналоговая часть системы определяет полосу ее пропускания и, следовательно, возможную вариацию частоты сигналов задания.

Передаточная функция замкнутой системы имеет вид

$$W_S(p) = \frac{x(p)}{x_{зд}(p)} = \frac{1}{T_1 p + 1}. \quad (2)$$

Здесь  $T_1 = \frac{1}{K_p}$ ,  $K_p$  – коэффициент передачи разомкнутой системы.

На рис. 2 представлены логарифмические амплитудно-частотные характеристики разомкнутой и замкнутой системы. Они позволяют определить полосу пропускания системы и возможный диапазон частот сигнала задания, которые должны воспроизводиться с допустимой погрешностью.

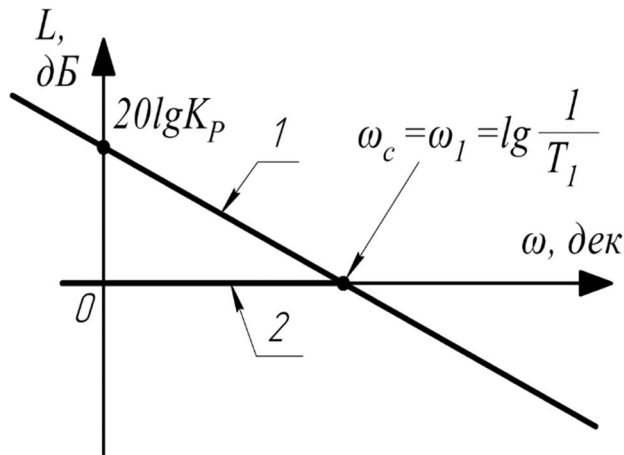


Рис. 2. Логарифмические амплитудно-частотные характеристики цифровой разомкнутой (1) и замкнутой (2) систем автоматического управления

На рис. 2 полоса пропускания сигнала задания обозначена  $\omega_1 (\omega_c)$ .

Согласно представленной структурной схеме на рис. 1 процесс формирования амплитудно-частотной характеристики замкнутой системы показан на рис. 3. Формирование упомянутой характеристики осуществляется по зависимости

$$A_S(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{T_1^2 \omega^2 + 1}} \quad (3)$$

На рис. 3 полоса пропускания сигнала задания обозначена как  $\omega_{sd}$ . Для построения характеристики формула (1) преобразована к виду

$$W(e^{jx}) \approx \frac{1}{T} \{W(jx) + W[j(x - 2\pi n)]\}. \quad (4)$$

Заменив в (4)  $x = \omega T$ , получим

$$W(e^{j\omega T}) \approx W(j\omega) + W[j(\omega - \omega_0)]. \quad (5)$$

В (5)  $\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$  – частота квантования экстраполятора нулевого порядка.

На рис. 3 показан случай для  $n = 3$ .

Анализ представленных графических зависимостей указывает на наложение высокочастотных составляющих амплитудно-частотной характеристики системы на низкочастотные составляющие аналоговой части системы (эффект алайзинга).

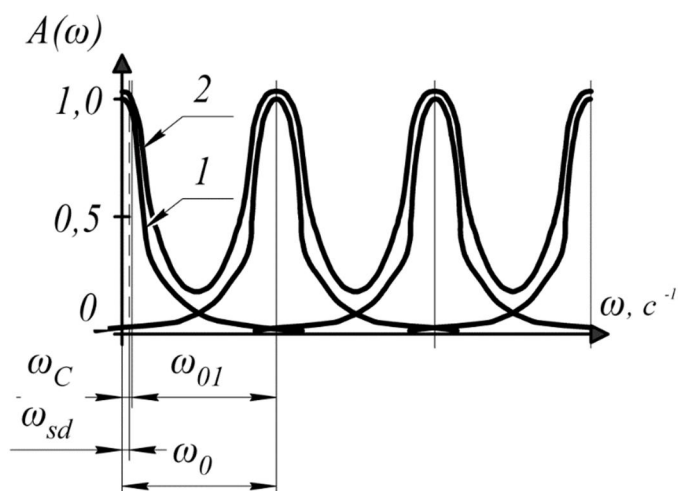


Рис. 3. Формирование амплитудно-частотной характеристики дискретной системы:

- 1 – амплитудно-частотная характеристика аналоговой части системы;  
 2 – амплитудно-частотная характеристика дискретной части системы

Это приводит к возникновению дополнительной погрешности относительно аналогового прототипа. Для того чтобы эта погрешность не превосходила требуемую, необходимо разнести амплитудно-частотные характеристики аналоговой части системы таким образом, чтобы в области частот сигналов задания погрешность укладывалась в допустимую величину. При достаточно больших  $X$  модуль частотной характеристики линейной части системы стремится к нулю, поэтому можно учитывать только случай для  $n = 1$  и формула (1) может быть представлена в виде

$$W(e^{j\omega T}) \approx W(j\omega) + W[j(\omega - \omega_0)]. \quad (6)$$

Аналогично зависимости (6) определится АЧХ замкнутой системы:

$$W_S(e^{j\omega T}) \approx W_S(j\omega) + W_S[j(\omega - \omega_0)]. \quad (7)$$

Приведенные выше аналитические зависимости по формированию амплитудно-фазовых частотных характеристик позволяют разработать методику определения минимальной частоты квантования экстраполятора нулевого порядка, обеспечивающего заданную точность в воспроизведении сигнала задания на выполнение технологической операции.

Рассмотрим методику определения частоты квантования для позиционно-следящей системы привода подачи прецизионного станка.

Для позиционно-следящих систем особо важной является реализация криволинейного движения, которое характерно для обработки или измерения деталей со сложным профилем [7], например, фрезерования канавки (рис. 4).

Из рассмотрения рис. 4 следует, что возможна обработка с различными радиусами закругления ( $R_1$ – $R_3$ ). Это в свою очередь требует формирования различных частот сигналов задания на электропривод подачи, которая определяется по зависимости [8, 9]

$$\omega_{SD} = \frac{V}{R}. \quad (8)$$

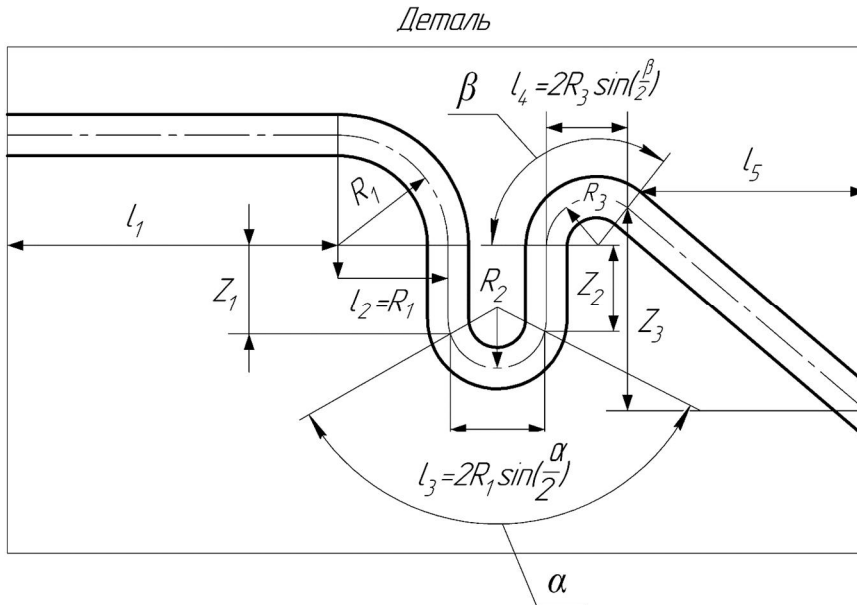


Рис. 4. Аппроксимация сложного криволинейного профиля

В (8) принято:  $V$  – линейная скорость резания,  $R$  – радиус закругления.

Для передаточной функции замкнутой системы по выражению (2) соответствует амплитудно-частотная характеристика вида (3).

По полученной зависимости можно построить ряд амплитудно-частотных характеристик замкнутой системы смещённых друг относительно друга. При этом погрешность суммы смещённых характеристик в области полосы пропускания непрерывной части системы не должна превышать заданной величины. Это в свою очередь позволит величину погрешности представить в виде

$$\Delta A_S(j\omega) = \frac{1}{\sqrt{T_1^2 \omega_{01}^2 + 1}}. \quad (9)$$

Здесь  $\omega_{01}$  – значение частоты смещения спектров АЧХ, обеспечивающей заданную погрешность в начале полосы пропускания системы.

Из зависимости (9) следует определение частоты смещения  $\omega_{01}$ :

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{1 - \Delta A_S^2}{\Delta A_S^2 T_1^2}}. \quad (10)$$

Для обеспечения заданной погрешности во всем диапазоне сигналов задания необходимо прибавить значение частоты полосы пропускания линейной части системы. Поэтому окончательно выражение для смещения частотного спектра непрерывной части системы, обеспечивающей заданную погрешность, для цифровой системы примет вид

$$\omega_0 = \omega_{01} + \omega_C. \quad (11)$$

Полученная зависимость позволяет определить период квантования экстраполятора нулевого порядка, обеспечивающий заданную погрешность в воспроизведении задающего сигнала:

$$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}. \quad (12)$$

Рассмотренную методику проиллюстрируем конкретным примером. Требуется обработать деталь с заданной скоростью резания  $V=0,5$  м/мин. Радиус закругления профиля детали  $R=2,5$  мм. Точность обработки должна составлять  $\Delta A=2,5$  мкм. Линейная часть САУ имеет следующие параметры: коэффициент передачи разомкнутой САУ  $K_p=10$ , тогда  $T_I=0,1$  с.

Согласно зависимости (10) определим значение  $\omega_{01}$ :

$$\omega_{01} = \sqrt{\frac{2500 - 2,5}{6,25 \cdot 0,01}} \approx 200 \text{ с}^{-1}.$$

Требуемая частота квантования экстраполятора определится из зависимости (11):

$$\omega_0 = 200 + 10 = 210 \text{ с}^{-1}.$$

По полученному значению частоты квантования определяем период квантования согласно зависимости (12) и получаем  $T_0 \approx 0,03$  с.

Таким образом, минимальная частота экстраполятора нулевого порядка должна быть не меньше чем  $210 \text{ с}^{-1}$  и период квантования не больше чем  $T_0 \approx 0,03$  с.

Геометрический анализ указывает на то, что за один период квантования экстраполятора отличие движения инструмента по радиусу от заданного составляет примерно  $2,5$  мкм.

Полученная методика была проверена путем имитационного моделирования в среде Matlab [10]. Результаты моделирования подтвердили правильность определения частоты квантования и дискретности экстраполятора для воспроизведения сигнала задания. Результаты имитационного моделирования цифровой САУ, структурная схема которой показана на рис. 1, представлены на рис. 5 для скачкообразного входного сигнала и на рис. 6 для гармонического сигнала с частотой  $\omega_{SD} = 2,5 \text{ с}^{-1}$ . Параметры линейной части системы приняты как в рассмотренном примере.

Из рис. 5, 6 следует, что процесс позиционирования реализуется по аperiodическому закону, обеспечивающему односторонний подход к заданной координате. Из осциллограммы на рис. 6 следует, что погрешность воспроизведения сигнала задания дискретной системой не превышает значения  $2,5$  мкм.

Из рис. 5, 6 следует, что процесс позиционирования реализуется по аperiodическому закону, обеспечивающему односторонний подход к заданной координате. Из осциллограммы на рис. 6 следует, что погрешность воспроизведения сигнала задания дискретной системой не превышает значения  $2,5$  мкм.

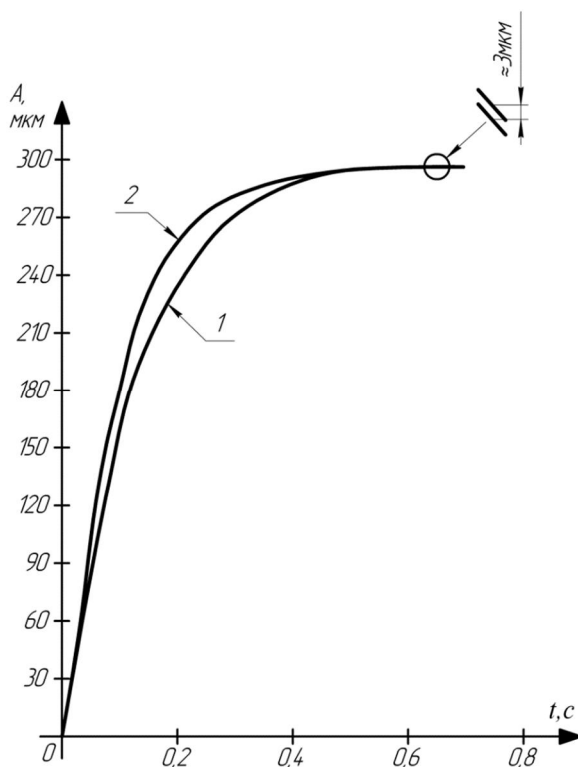


Рис. 5. Воспроизведение скачкообразного сигнала задания аналоговой (1) и цифровой (2) системами автоматического управления

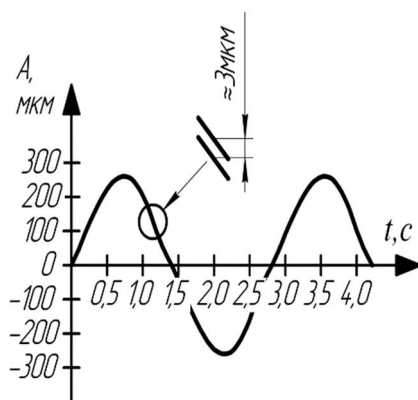


Рис. 6. Воспроизведение гармонического сигнала задания аналоговой и цифровой системами автоматического управления

Значительные успехи в производстве инструмента за рубежом [11, 12] и в России [13] позволяют реализовать высокоскоростную обработку деталей. Например, шпиндели фирм SIP и ASIERA имеют частоту вращения 35000–40000 об/мин, что позволяет высококачественно обрабатывать даже закаленные стали.

Повышение производительности станков, точности позиционирования и плавности перемещения подвижных узлов требует принципиально новых решений САУ. Одним из путей является применение линейных электродвигателей



с цифровой системой управления, использование мехатронных модулей исключают редукторы в кинематической цепи передачи движения узлам станка.

В этой связи повышается быстродействие системы и, следовательно, частота сигнала задания скорости на приводы подач, что, в свою очередь, требует изменений в структуре аналоговой части системы. В этом случае следует увеличивать быстродействие [14, 15] аналогового прототипа таким образом, чтобы сигнал задания не выходил за полосу пропускания линейной части.

### Выводы

1. Повышение производительности прецизионных металлорежущих станков, а также динамической точности воспроизведения сигнала задания цифровыми позиционно-слеящими системами требует обеспечения частоты квантования экстраполятора нулевого порядка в соответствии с технологическими требованиями по обработке детали или ее измерению.

2. Предложенная методика определения минимальной частоты квантования экстраполятора нулевого порядка обеспечивает требуемую точность воспроизведения сигнала задания относительно аналогового прототипа.

3. При повышении быстродействия исполнительных электродвигателей в аналоговой части системы следует увеличивать частоту квантования экстраполятора.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Лысов В.Е., Сидоров И.С.* Анализ влияния частоты квантования цифрового регулятора положения позиционно-слеящего электропривода на динамические показатели качества управления // Мехатроника, Автоматизация, Управление. – 2016. – Т. 17. – № 10. – С. 685–689.
2. *Терехов В.М.* Дискретные и непрерывные системы управления в электроприводах: учеб. пособие по курсу «Системы управления электроприводами». – М.: МЭИ, 1989. – 80 с.
3. Теория автоматического регулирования. Кн. 2: Анализ и синтез линейных непрерывных и дискретных систем автоматического регулирования / Под ред. В.В. Солодовникова. – М.: Машиностроение, 1967. – 679 с.
4. *Лысов В.Е.* Теория автоматического управления: учеб. пособие. – М.: Машиностроение, 2010. – 500 с.
5. *Михайлов О.П., Орлова Р.Г., Пальцев А.В.* Современный электропривод станков с ЧПУ и промышленных роботов / Под ред. Б.И. Черпакова. – М.: Высшая школа, 1989 – 111 с.
6. *Анучин А.С.* Системы управления электроприводов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2015. – 373 с.
7. *Комбаров В.В., Сорокин В.Ф.* Ограничение погрешности аппроксимации криволинейных траекторий при выборе частоты цикла управления систем ЧПУ с учетом технологических параметров оборудования // Открытые информационные и компьютерные технологии. – Харьков: Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», 2013. – № 59. – С. 132–139.
8. *Лысов В.Е., Сидоров И.С.* Анализ погрешности в воспроизведении заданной траектории движения позиционно-слеящего электропривода с учетом дискретности экстраполятора нулевого порядка // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2015. – № 3(47). – С. 142–148.
9. *Лысов В.Е., Саранцев С.С.* Синтез корректирующего звена слеящего электропривода подачи координатно-расточного станка для компенсации нелинейности типа «люфт» в кинематической цепи // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2012. – № 1(32). – С. 148–156.
10. *Кудинов Ю.И., Пищенко Ф.Ф.* Теория автоматического управления (с использованием Matlab simulink): Учеб. пособие. – СПб: Лань, 2016. – 256 с.
11. *Аврамов А.А.* Прогнозирование подачи при высокоскоростной металлообработке: пер. с англ. // Cutting Tool Engineering. – 2002. – № 3(54). – С. 40, 42–44.
12. *Фельдштейн Е.В., Корниевич М.А.* Обработка деталей на станках с ЧПУ: учеб. пособие. – 3-е изд., доп. – Минск: Новое знание, 2008. – 229 с.

13. Качан А.Я., Петров С.А. и др. Технология обработки моноколес высокоскоростным фрезерованием // Оборудование и инструмент. – 2006. – № 2 [75]. – С. 26–32.
14. Лебедев А.М. Следящие электроприводы станков с ЧПУ. – М.: Энергоиздат, 1988. – 223 с.
15. Юревич Е.И. Теория автоматического управления. – СПб.: ВHV, 2016. – 560 с.

*Статья поступила в редакцию 10 июля 2019 года*

## THE METHOD OF DETERMINING THE FREQUENCY QUANTIZATION OF THE ZERO-ORDER EXTRAPOLATOR

**V.E. Lysov, Y.I. Peshev**

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russia

**Abstract.** *In this paper we consider a method for determining the quantization frequency of the zero-order extrapolator in the frame of the digital position-tracking system. The analysis is carried out by the frequency approach. Amplitude frequency specifications of discrete systems are defined as the sum of the shifted amplitude-frequency characteristics of the analog part of the system. In this connection, it is necessary to determine the shifting frequency of the amplitude frequency characteristics of the system's continuous part so that their sum in the frequency band of the reference signal does not exceed the specified error regarding the analog prototype. The obtained value of the quantization frequency of the extrapolator will determine the interval of discreteness.*

**Keywords:** *zero-order extrapolator, amplitude-frequency characteristic, transfer function, set frequency, sampling period.*

### REFERENCES

1. Lysov V.Ye., Sidorov I.S. Analiz vliyaniya chastoty kvantovaniya tsifrovogo regulyatora polozheniya pozitsionno-sledyashchego elektroprivoda na dinamicheskiye pokazateli kachestva upravleniya // Teor. i prikl. nauchn-tekhn. Zhurnal «Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravleniye» Tom 17. – 2016. – № 10. – S. 685–689.
2. Terekhov V.M. Diskretnyye i nepreryvnyye sistemy upravleniya v elektroprivodakh: uchebnoye posobiye po kursu «Sistemy upravleniya elektroprivodami». – М.: MEI, 1989. – 80 s.
3. Teoriya avtomaticheskogo regulirovaniya. Kniga 2: Analiz i sintez lineynykh nepreryvnykh i diskretnykh sistem avtomaticheskogo regulirovaniya / Pod red. V.V. Solodovnikova. – М.: Mashinostroyeniye, 1967. – 679 s.
4. Lysov V.Ye. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. posobiye. – М.: Mashinostroyeniye, 2010. – 500 s.
5. Mikhaylov O.P., Orlova R.G., Pal'tsev A.V. Sovremennyy elektroprivod stankov s CHPU i promyshlennyykh robotov / pod red. B.I. Cherpakova. – М.: Vysshaya shkola, 1989. – 111 s.
6. Anuchin A.S. Sistemy upravleniya elektroprivodov. – М.: Izd. dom MEI, 2015. – 373 s.
7. Kombarov V.V., Sorokin V.F. Ogranicheniye pogreshnosti approksimatsii krivolinyenykh trayektoriy pri vybore chastoty tsikla upravleniya sistem CHPU s uchotom tekhnologicheskikh parametrov oborudovaniya // Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye tekhnologii. – Kharkov: Natsional'nyy aerokosmicheskiy universitet im. N.Ye. Zhukovskogo «KHAU». – 2013. – № 59. – S. 132–139.

---

Vladimir E. lysov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Yaroslav I. Peshev (Ph.D. (Techn.)), Engineer.

8. *Lysov V.Ye., Sidorov I.S.* Analiz pogreshnosti v vosproizvedenii zadannoy trayektorii dvizheniya pozitsionno-sledyashchego elektroprivoda s uchotom diskretnosti ekstrapolyatora nulevogo por-yadka // Vestnik SamGTU. Seriya «Tekhnicheskiye nauki». – 2015. – № 3(47). – S. 142–148.
9. *Lysov V.Ye., Sarantsev S.S.* Sintez korrektruyushchego zvena sledyashchego elektroprivoda po-dachi koordinatno-rastochnoy stanka dlya kompensatsii nelineynosti tipa «lyuft» v kinemacheskoy tsepi // Vestnik SamGTU. Seriya «Tekhnicheskiye nauki». – 2012. – № 1(32). – S. 148–156.
10. *Kudinov J.I., Pichenko F.F.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya (s icpolsovaniem Matlab sim-ulink): uchebnoe posobie. – Cnb: Lani, 256 s.
11. *Avramov A.A.* Prognozirovaniye podachi pri vysokoskorostnoy metalloobrabotke: per. s angl. // Cutting Tool Enginiring. – 2002. – № 3(54). – S. 40, 42–44.
12. *Fel'dshteyn Ye.V., Korniyevich M.A.* Obrabotka detaley na stankakh s CHPU: ucheb. posobiye. – 3-ye izd., dop. – Minsk: Novoye znaniye, 2008. – 229 s.
13. *Kachan A.YA., Petrov S.A. i dr.* Tekhnologiya obrabotki monokolos vysokoskorostnym frezereo-vaniyem // Oborudovaniye i instrument. – 2006. – № 2[75]. – C. 26–32.
14. *Lebedev A.M.* Sledyashchiye elektroprivody stankov s CHPU Energoizdat, 1988. 223 s.
15. *Jrevich E.I.* Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. – Cnb.: BHV, 2016. – 560 s.

УДК 621.391.1: 621.395

**МОДЕЛИ ТЕЛЕТРАФИКА НА ОСНОВЕ ДВОЙСТВЕННЫХ СИСТЕМ С ГИПЕРЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫМИ И ЭРЛАНГОВСКИМИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯМИ****В.Н. Тарасов, Н.Ф. Бахарева, Э.Г. Ахметшина**Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики  
Россия, 443010, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23

E-mail: veniamin\_tarasov@mail.ru, nadin1956\_04@inbox.ru, elyamalusha@mail.ru

**Аннотация.** Представлены результаты исследований по системам массового обслуживания (СМО)  $H_2/E_2/1$  и  $E_2/H_2/1$  с гиперэкспоненциальными и эрланговскими входными распределениями второго порядка. Рассматриваемые СМО относятся к типу  $G/G/1$ . Использование этих законов распределений более высокого порядка затруднено нарастающей вычислительной сложностью. Для таких законов распределений второго порядка классический метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли для систем  $G/G/1$  позволяет получить решение в замкнутой форме. В статье представлены полученные спектральные разложения решения интегрального уравнения Линдли для рассматриваемых систем и выведенные через них формулы для среднего времени ожидания в очереди. Адекватность полученных результатов подтверждена корректностью использования классического метода спектрального разложения и результатами численного моделирования. Для практического применения полученных результатов использован метод моментов теории вероятностей. Системы типа  $G/G/1$  широко используются в теории телетрафика при моделировании систем передачи данных. Например, по среднему времени ожидания в очереди оценивают задержки пакетов в сетях пакетной коммутации при их моделировании с помощью СМО.

**Ключевые слова:** гиперэкспоненциальный и эрланговский законы распределения, системы массового обслуживания, метод спектрального разложения.

**Введение**

Для моделирования трафика современных сетей телекоммуникаций на основе теории массового обслуживания широко используются законы распределений, преобразуемых по Лапласу, такие как Эрланга ( $E_R$ ), экспоненциальный ( $M$ ), гиперэкспоненциальный ( $H_R$ ), гиперэрланговский ( $HE_R$ ) и др., для которых коэффициенты вариации случайных величин больше или равны 1 ( $c \geq 1$ ) или же меньше 1 ( $c < 1$ ). При этом необходимо заметить, что системы массового обслуживания (СМО) с бесконечной очередью могут моделировать реальные системы передачи данных лишь в первом приближении, т. к. последние могут содержать буферы ограниченной емкости.

Настоящая статья посвящена анализу СМО  $H_2/E_2/1$  и  $E_2/H_2/1$  с гиперэкспоненциальными и эрланговскими входными распределениями второго порядка. В научной литературе по теории массового обслуживания для таких систем результатов авторами не обнаружено, поэтому решение для среднего времени ожи-

---

Тарасов Вениамин Николаевич (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой ПОУТС.  
Бахарева Надежда Федоровна (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой ИВТ.  
Ахметшина Элеонора Газинуровна, преподаватель кафедры ПОУТС.

дания в очереди для них будем строить на основе классического метода спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли (ИУЛ) [1]. По этой характеристике, например, оценивают задержки пакетов в сетях пакетной коммутации при их моделировании с помощью СМО [11–13]. Рассматриваемые СМО относятся к типу G/G/1.

Как известно, например, из [1, 2], для СМО с произвольными законами распределений для входного потока и времени обслуживания G/G/1 среднее время ожидания в очереди определяется формулой

$$\bar{W} = \frac{D_\lambda + D_\mu + (1-\rho)^2 / \lambda^2}{2(1-\rho) / \lambda} - \frac{\bar{I}^2}{2\bar{I}},$$

где  $\rho$  – коэффициент загрузки системы  $0 < \rho = \lambda/\mu < 1$ ;

$\lambda$  – интенсивность входного потока;

$\mu$  – интенсивность обслуживания;

$D_\lambda, D_\mu$  – соответственно дисперсии интервалов поступления и времени обслуживания;

$\bar{I}, \bar{I}^2$  – соответственно среднее значение и второй начальный момент периода простоя.

Следовательно, первое слагаемое в правой части приведенной выше формулы зависит от двух первых моментов распределения интервалов входного потока и времени обслуживания. Очевидно, что среднее время ожидания требований в очереди к системе зависит от квадратов коэффициентов вариаций интервалов поступлений между требованиями и времени обслуживания этих требований. Второе слагаемое в правой части формулы для общего случая системы G/G/1 остается неизвестным, и поэтому это выражение является до сих пор незавершенной формулой.

### Постановка задачи

В работе ставится задача нахождения решения для среднего времени ожидания требований в очереди для двойственной пары СМО с гиперэкспоненциальными и эрланговскими входными распределениями  $H_2/E_2/1$  и  $E_2/H_2/1$ . Из теории массового обслуживания известно, что все остальные характеристики СМО являются производными от среднего времени ожидания. Для решения поставленной задачи выбираем классический метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли.

### Решение задачи для системы $H_2/E_2/1$

Метод спектрального разложения решения интегрального уравнения Линдли в исследовании систем G/G/1 играет важную роль, и большинство результатов в теории массового обслуживания получены именно с помощью данного метода. Одна из форм ИУЛ выглядит так [1]:

$$W(y) = \begin{cases} \int_{-\infty}^y W(y-u) dC(u), & y \geq 0; \\ 0, & y < 0, \end{cases} \quad (1)$$

где  $W(y)$  – функция распределения вероятностей (ФРВ) времени ожидания требования в очереди;

$C(u) = P(\tilde{u} < u)$  – ФРВ случайной величины  $\tilde{u} = \tilde{x} - \tilde{t}$ , где, в свою очередь,  $\tilde{x}$  – случайное время обслуживания требования;  $\tilde{t}$  – случайная величина – интервал времени между поступлениями требований.

При использовании метода спектрального разложения решения ИУЛ будем придерживаться подхода и символики автора классики теории массового обслуживания [1]. Нам необходимо найти закон распределения случайной величины – времени ожидания в системе через спектральное разложение вида  $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$ , где  $\psi_+(s)$  и  $\psi_-(s)$  – некоторые рациональные функции от  $s$ , которые возможно разложить на множители. Функции  $\psi_+(s)$  и  $\psi_-(s)$  должны удовлетворять следующим условиям согласно [1]:

– для  $\text{Re}(s) > 0$  функция  $\psi_+(s)$  является аналитической без нулей в этой полуплоскости;

– для  $\text{Re}(s) < D$  функция  $\psi_-(s)$  является аналитической без нулей в этой полуплоскости, где  $D$  – некоторая положительная константа, определяемая из условия  $\lim_{t \rightarrow \infty} a(t) / e^{-Dt} < \infty$ .

Кроме того, функции  $\psi_+(s)$  и  $\psi_-(s)$  должны удовлетворять следующим условиям:

$$\lim_{|s| \rightarrow \infty, \text{Re}(s) > 0} \frac{\psi_+(s)}{s} = 1; \quad \lim_{|s| \rightarrow \infty, \text{Re}(s) < D} \frac{\psi_-(s)}{s} = -1. \quad (2)$$

Для решения поставленной задачи необходимо вначале построить для рассматриваемых систем спектральные разложения вида  $A^*(-s) \cdot B^*(s) - 1 = \psi_+(s) / \psi_-(s)$  с учетом условий (1), (2) в каждом случае.

Для системы  $H_2/E_2/1$  законы распределения интервалов входного потока и времени обслуживания задаются функциями плотности вида

$$a(t) = p\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} + (1-p)\lambda_2 e^{-\lambda_2 t}; \quad (3)$$

$$b(t) = 4\mu^2 t e^{-2\mu t}. \quad (4)$$

Запишем преобразования Лапласа функций (3) и (4):

$$A^*(s) = p \frac{\lambda_1}{s + \lambda_1} + (1-p) \frac{\lambda_2}{s + \lambda_2}, \quad B^*(s) = \left( \frac{2\mu}{2\mu + s} \right)^2.$$

Тогда выражение для спектрального разложения решения ИУЛ для системы  $H_2/E_2/1$  примет вид

$$\frac{\psi_+(s)}{\psi_-(s)} = \left[ p \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - s} + (1-p) \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - s} \right] \times \left( \frac{2\mu}{2\mu + s} \right)^2 - 1 = \frac{-s(s + s_1)(s + s_2)(s - s_3)}{(\lambda_1 - s)(\lambda_2 - s)(2\mu + s)^2},$$

т. к. многочлен 4-й степени в числителе этого выражения можно представить в виде разложения  $-s(s^3 + c_2 s^2 + c_1 s + c_0)$  с коэффициентами  $c_2 = 4\mu - \lambda_1 - \lambda_2$ ,

$c_1 = 4\mu(\mu - \lambda_1 - \lambda_2) + \lambda_1\lambda_2$ ,  $c_0 = 4\mu[\lambda_1\lambda_2 + \mu(\lambda_1\rho - \lambda_1 - \lambda_2\rho)]$ . В свою очередь, кубический многочлен  $s^3 + c_2s^2 + c_1s + c_0$  с такими коэффициентами в стационарном режиме функционирования СМО при загрузке  $\rho = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\lambda < 1$  имеет два действительных отрицательных корня  $-s_1$ ,  $-s_2$  и один положительный корень  $s_3$ .

Окончательно

$$\frac{\Psi_+(s)}{\Psi_-(s)} = \frac{-s(s+s_1)(s+s_2)(s-s_3)}{(\lambda_1-s)(\lambda_2-s)(2\mu+s)^2}. \quad (5)$$

С учетом условий (1), (2) за функцию  $\Psi_+(s)$  примем  $\Psi_+(s) = s(s+s_1)(s+s_2)/(s+2\mu)^2$ , т. к. нули кубического многочлена  $s=0$ ,  $s=-s_1$ ,  $s=-s_2$  и полюс  $s=-2\mu$  лежат в области  $\text{Re}(s) \leq 0$ , а за функцию  $\Psi_-(s)$

$$\Psi_-(s) = -(\lambda_1-s)(\lambda_2-s)/(s-s_3).$$

Теперь выполнение условий (1) и (2) для построенных функций  $\Psi_+(s)$  и  $\Psi_-(s)$  очевидно. Это подтверждает и рис. 1, где отображены нули и полюсы отношения  $\Psi_+(s)/\Psi_-(s)$  на комплексной  $s$ -плоскости для исключения ошибок построения спектрального разложения. На рис. 1 полюсы отмечены крестиками, а нули – кружками.

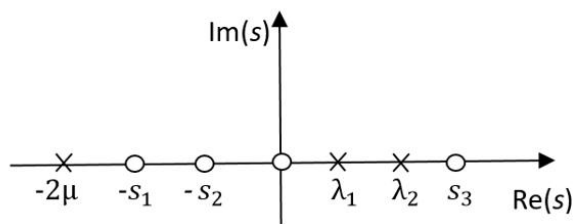


Рис. 1. Нули и полюсы функции  $\Psi_+(s)/\Psi_-(s)$  для системы  $H_2/E_2/1$

Далее по методике спектрального разложения найдем константу  $K$ :

$$K = \lim_{|s| \rightarrow 0} \frac{\Psi_+(s)}{s} = \lim_{|s| \rightarrow 0} \frac{(s+s_1)(s+s_2)}{(s+2\mu)^2} = \frac{s_1s_2}{4\mu^2}.$$

Построим функцию  $\Phi_+(s) = K/\Psi_+(s)$ , через которую найдем преобразование Лапласа функции плотности времени ожидания:

$$W^*(s) = \frac{s_1s_2(s+2\mu)^2}{4\mu^2(s+s_1)(s+s_2)}. \quad (6)$$

Тогда среднее время ожидания для системы  $H_2/E_2/1$  будет равно значению производной от функции  $W^*(s)$  со знаком минус в т.  $s=0$ :

$$\bar{W} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} - \frac{1}{\mu}, \quad (7)$$

где  $s_1, s_2$  – абсолютные значения отрицательных корней  $-s_1$  и  $-s_2$  кубического многочлена  $s^3 + c_2s^2 + c_1s + c_0$  с приведенными выше коэффициентами. Таким образом, среднее время для системы  $H_2/E_2/1$  однозначно определено в виде замкнутой формы (7). Из выражения (6) можно определить при необходимости и моменты высших порядков для времени ожидания. Например, вторая производная от функции (6) при  $s = 0$  дает второй начальный момент времени ожидания. С учетом определения вариации задержки – джиттера в телекоммуникациях как разброса времени ожидания от его среднего значения [10] получим возможность определения джиттера через дисперсию времени ожидания.

Для практического применения формулы (7) необходимо определить числовые характеристики распределений (3) и (4). Для этого воспользуемся свойством преобразования Лапласа воспроизведения моментов и запишем начальные моменты до третьего порядка для распределения (3):

$$\bar{\tau}_\lambda = \frac{p}{\lambda_1} + \frac{(1-p)}{\lambda_2}, \quad \bar{\tau}_\lambda^2 = \frac{2p}{\lambda_1^2} + \frac{2(1-p)}{\lambda_2^2}, \quad \bar{\tau}_\lambda^3 = \frac{6p}{\lambda_1^3} + \frac{6(1-p)}{\lambda_2^3}. \quad (8)$$

При аппроксимации закона распределения методом моментов с использованием первых двух начальных моментов неизвестные параметры распределения (3)  $\lambda_1, \lambda_2, p$  определяются следующим образом [3–6]. Рассматривая два первых равенства (8) как запись метода моментов, найдем неизвестные параметры распределения (3)  $\lambda_1, \lambda_2, p$ . Система двух первых уравнений (8) при этом является не доопределенной, поэтому к ней добавим выражение для квадрата коэффициента вариации

$$c^2 = \frac{\bar{\tau}_\lambda^2 - (\bar{\tau}_\lambda)^2}{(\bar{\tau}_\lambda)^2} \quad (9)$$

как связующее условие между двумя первыми равенствами (8). Кроме того, коэффициент вариации будем использовать в дальнейшем в качестве входного параметра системы.

Исходя из вида первого уравнения (8) положим

$$\lambda_1 = 2p / \bar{\tau}_\lambda, \quad \lambda_2 = 2(1-p) / \bar{\tau}_\lambda \quad (10)$$

и потребуем выполнения условия (9). Подставив выражения (10) в (9) и решив квадратное уравнение относительно параметра  $p$ , получим для него два значения:

$$p = \frac{1}{2} \left( 1 \pm \sqrt{\frac{c_\lambda^2 - 1}{c_\lambda^2 + 1}} \right). \quad \text{При этом можно воспользоваться любым из них. Таким образом, неизвестные параметры закона распределения (3) однозначно определены:}$$

$$\lambda_1 = 2p / \bar{\tau}_\lambda, \quad \lambda_2 = 2(1-p) / \bar{\tau}_\lambda, \quad p = \frac{1}{2} [1 \pm \sqrt{(c_\lambda^2 - 1) / (c_\lambda^2 + 1)}]. \quad (11)$$

Следовательно, гиперэкспоненциальный закон распределения может определяться полностью двумя первыми моментами и перекрывать весь диапазон изменения коэффициента вариации от 1 до  $\infty$ .



Так как распределение (3) является трехпараметрическим, аппроксимацию можно проводить с использованием трех начальных моментов. При аппроксимации закона распределения методом моментов с использованием первых трех начальных моментов неизвестные параметры  $\lambda_1, \lambda_2, p$  распределения (3) можем найти решением системы трех уравнений метода моментов (8) в математическом пакете Mathcad. В работе [3] отмечена эта отличительная черта гиперэкспоненциального и гиперэрланговского распределений, заключающаяся в том, что они однозначно могут описываться как с использованием двух начальных моментов, так и с использованием трех начальных моментов. В [4] показано, что аппроксимация гиперэкспоненциального распределения с использованием первых двух начальных моментов по сравнению с аппроксимацией закона распределения методом моментов с использованием трех начальных моментов занижает значение среднего времени ожидания в очереди.

Аналогичный подход к аппроксимации законов распределений рассмотрен в [7–9].

Из выражений (11) следует, что коэффициент вариации случайной величины, распределенной по гиперэкспоненциальному закону,  $c_\lambda \geq 1$ .

$$\text{Для распределения (4) имеем: } \bar{\tau}_\mu = \frac{1}{\mu}, \bar{\tau}_\mu^2 = \frac{3}{2\mu^2}, c_\mu = \frac{1}{\sqrt{2}}.$$

Величины  $\bar{\tau}_\lambda, \bar{\tau}_\mu, c_\lambda, c_\mu = 1/\sqrt{2}$  будем считать входными параметрами для расчета среднего времени ожидания для системы  $H_2/E_2/1$  с использованием формулы (7). Тогда алгоритм расчета сведется к последовательному определению параметров распределения (3) из выражений (11) методом моментов и к нахождению нужных корней многочлена  $s^3 + c_2s^2 + c_1s + c_0$  с приведенными выше коэффициентами в пакете Mathcad, а затем к использованию формулы (7).

### Решение задачи для системы $E_2/H_2/1$

Для системы  $E_2/H_2/1$  законы распределения интервалов входного потока и времени обслуживания задаются функциями плотности вида:

$$a(t) = 4\lambda^2 t e^{-2\lambda t}; \quad (12)$$

$$b(t) = q\mu_1 e^{-\mu_1 t} + (1-q)\mu_2 e^{-\mu_2 t}. \quad (13)$$

Запишем преобразования Лапласа функций (12) и (13):

$$A^*(s) = \left( \frac{2\lambda}{2\lambda + s} \right)^2, \quad B^*(s) = q \frac{\mu_1}{s + \mu_1} + (1-q) \frac{\mu_2}{s + \mu_2}.$$

Выражение для спектрального разложения решения ИУЛ для системы  $E_2/H_2/1$  примет вид

$$\frac{\Psi_+(s)}{\Psi_-(s)} = \left( \frac{2\lambda}{2\lambda - s} \right)^2 \left[ q \frac{\mu_1}{\mu_1 + s} + (1-q) \frac{\mu_2}{\mu_2 + s} \right] - 1 = \frac{-s(s + s_1)(s + s_2)(s - s_3)}{(2\lambda - s)^2 (s + \mu_1)(s + \mu_2)}, \quad (14)$$

т. к. многочлен четвертой степени в числителе выражения (14) можно представить в виде разложения  $-s(s^3 - c_2s^2 - c_1s - c_0)$  с коэффициентами

$$c_2 = 4\lambda - \mu_1 - \mu_2, \quad c_1 = 4\lambda(\mu_1 + \mu_2 - \lambda) - \mu_1\mu_2, \quad c_0 = 4\lambda^2 q(\mu_1 - \mu_2) + 4\lambda\mu_1(\mu_2 - \lambda).$$

Кубический многочлен

$$s^3 - c_2 s^2 - c_1 s - c_0 \quad (15)$$

с такими коэффициентами имеет два действительных отрицательных корня  $-s_1$ ,  $-s_2$  и один положительный корень  $s_3$  в случае стационарного режима, т. е. когда нагрузка системы  $0 < \rho = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\lambda < 1$ . Тогда исходя из правил (1), (2) построения функций  $\psi_+(s)$  и  $\psi_-(s)$  из выражения (14) за функцию  $\psi_+(s)$  примем

$$\psi_+(s) = \frac{s(s+s_1)(s+s_2)}{(s+\mu_1)(s+\mu_2)},$$

т. к. нули многочлена (15)  $s=0$ ,  $-s_1$ ,  $-s_2$  и полюсы  $s=-\mu_1$ ,  $s=-\mu_2$  лежат в области  $\text{Re}(s) \leq 0$ . За функцию  $\psi_-(s)$  из выражения (15) примем

$$\psi_-(s) = -\frac{(2\lambda - s)^2}{(s - s_3)},$$

т. к. ее нуль  $s=2\lambda$  и полюс  $s=s_3$  лежат в области  $\text{Re}(s) \geq D$ , определенной условием (1). Теперь выполнение условий (1), (2) для построенных функций  $\psi_+(s)$  и  $\psi_-(s)$  очевидно. Это подтверждает и рис. 2, где нули  $s=0$ ,  $-s_1$ ,  $-s_2$ ,  $s_3$  и полюсы  $2\lambda$ ,  $-\mu_1$ ,  $-\mu_2$  полученного разложения (14) показаны на комплексной  $s$ -плоскости. На рис. 2 полюсы также отмечены крестиками, а нули – кружками.

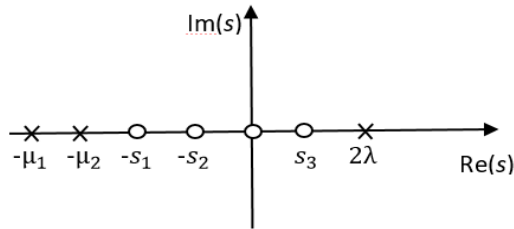


Рис. 2. Нули и полюсы функции  $\psi_+(s)/\psi_-(s)$  для системы  $E_2/H_2/1$

Необходимая для получения решения константа равна  $K = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\psi_+(s)}{s} = \frac{s_1 s_2}{\mu_1 \mu_2}$ . Далее строим функцию

$$\Phi_+(s) = \frac{K}{\psi_+(s)} = \frac{s_1 s_2 (s + \mu_1)(s + \mu_2)}{s(s + s_1)(s + s_2) \mu_1 \mu_2}.$$

Отсюда следует, что преобразование

Лапласа функции плотности времени ожидания в системе  $E_2/H_2/1$ :

$$W^*(s) = s \cdot \Phi_+(s) = \frac{s_1 s_2 (s + \mu_1)(s + \mu_2)}{(s + s_1)(s + s_2) \mu_1 \mu_2}. \quad (16)$$

Производная от функции  $W^*(s)$  со знаком минус в т.  $s=0$  даст среднее время ожидания:

$$-\frac{dW^*(s)}{ds}\Big|_{s=0} = -\frac{s_1 s_2 (s + \mu_1)(s + \mu_2)}{(s + s_1)(s + s_2)\mu_1 \mu_2}\Big|_{s=0} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}.$$

Окончательно среднее время ожидания в системе  $E_2/H_2/1$  может быть определено из выражения

$$\bar{W} = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} - \frac{1}{\mu_1} - \frac{1}{\mu_2}, \quad (17)$$

где  $s_1, s_2$  – абсолютные значения отрицательных корней  $-s_1, -s_2$  кубического многочлена (15) с приведенными выше коэффициентами, а  $\mu_1, \mu_2$  – параметры распределения (13).

Таким образом, для среднего времени ожидания в СМО  $E_2/H_2/1$  получено решение в замкнутой форме (17).

Для этой системы неизвестные параметры  $\mu_1, \mu_2, q$  с использованием двух первых моментов по аналогии с системой  $H_2/E_2/1$  определяются следующими выражениями:

$$\mu_1 = 2q / \bar{\tau}_\mu, \quad \mu_2 = 2(1 - q) / \bar{\tau}_\mu, \quad q = \frac{1}{2} [1 \pm \sqrt{(c_\mu^2 - 1) / (c_\mu^2 + 1)}]. \quad (18)$$

Тогда алгоритм расчета среднего времени ожидания для СМО  $E_2/H_2/1$  сведется к последовательному определению параметров распределения (4) из выражений (18) методом моментов, а затем к определению значений нужных корней  $-s_1, -s_2$  многочлена (15) с приведенными выше коэффициентами в пакете Mathcad и использованию формулы (17) для расчета среднего времени ожидания при заданных входных параметрах  $\bar{\tau}_\lambda, \bar{\tau}_\mu, c_\lambda = 1/\sqrt{2}, c_\mu \geq 1$ .

### Результаты вычислительных экспериментов

Ниже в таблице приведены данные расчетов для систем  $H_2/E_2/1$  и  $E_2/H_2/1$  для случаев малой, средней и высокой нагрузки  $\rho = 0,1; 0,5; 0,9$ . Коэффициент загрузки  $\rho$  в обеих таблицах определяется отношением средних интервалов  $\rho = \bar{\tau}_\mu / \bar{\tau}_\lambda$ . Расчеты, приведенные в таблицах, проведены для нормированного времени обслуживания  $\bar{\tau}_\mu = 1$ . Заметим, что первая система применима для коэффициентов вариаций интервалов поступления и обслуживания  $c_\lambda \geq 1$  и  $c_\mu = 1/\sqrt{2}$ , а вторая – для  $c_\lambda = 1/\sqrt{2}$  и  $c_\mu \geq 1$ . Данные таблицы свидетельствуют о незначительном различии сравниваемых систем в случае высоких нагрузок и более значительных расхождениях – при средних и малых нагрузках.

Как известно из теории массового обслуживания, результаты для среднего времени ожидания для двойственных систем обычно могут различаться значительно, т. к. определение двойственности пары систем не предполагает равенства значений среднего времени ожидания для этих систем.

Данные таблицы хорошо согласуются с результатами [12, 13] в той области изменения параметров, в которой применимы рассматриваемые системы, что также подтверждает адекватность полученных результатов. Полученные резуль-

таты полностью подтверждают наши предположения о среднем времени ожидания в очереди: оно связано с коэффициентами вариаций интервалов поступлений и времени обслуживания квадратичной зависимостью, выдвинутой выше.

### Результаты вычислительных экспериментов для СМО $H_2/E_2/1$ и $E_2/H_2/1$

Входные параметры			Среднее время ожидания	
$\rho$	$c_\lambda$ для СМО $H_2/E_2/1$	$c_\mu$ для СМО $E_2/H_2/1$	для системы $H_2/E_2/1$	для системы $E_2/H_2/1$
0,1	1	1	0,083	0,030
	2	2	0,141	0,160
	4	4	0,171	0,795
	8	8	0,182	3,448
0,5	1	1	0,751	0,618
	2	2	1,764	2,094
	4	4	4,082	8,082
	8	8	8,911	32,079
0,9	1	1	6,752	6,588
	2	2	20,016	20,072
	4	4	73,321	74,065
	8	8	286,642	290,063

### Выводы

В работе получены спектральные разложения решения интегрального уравнения Линдли для двойственной пары систем  $H_2/E_2/1$  и  $E_2/H_2/1$ , а через них выведены формулы для среднего времени ожидания в очереди для этих систем. Эти формулы дополняют известную незавершенную формулу для среднего времени ожидания для систем типа  $G/G/1$ .

Полученные модели систем массового обслуживания с бесконечной очередью могут моделировать реальные системы передачи данных лишь в первом приближении, т. к. последние могут содержать буферы ограниченной емкости. В этом случае будут нужны соответствующие модели массового обслуживания с ограничениями на длину очереди, более адекватно отображающие функционирование систем передачи данных.

Среднее время ожидания в очереди – это основная характеристика для систем массового обслуживания, т. к. все остальные характеристики – время задержки, средняя длина очереди, количество требований в системе и др. – являются производными от основной характеристики.

Адекватность полученных результатов обеспечена корректным использованием классического метода спектрального разложения, а проведенные вычислительные эксперименты только подтверждают данный факт.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Клейнрок Л.* Теория массового обслуживания / пер. с англ. под ред. В.И. Неймана. – М.: Машиностроение, 1979. – 432 с.
2. *Brannstrom N.* A Queueing Theory analysis of wireless radio systems. – Applied to HS-DSCH. Lulea university of technology, 2004. – 79 p.
3. *Тарасов В.Н., Ахметшина Э.Г., Када Отхмане.* Особенности применения гиперэкспоненциальных и гиперэрланговских входных распределений в системах массового обслуживания //

- Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2019. – Т. 61. – № 1. – С. 34–44.
4. *Tarasov V.H.* Исследование систем массового обслуживания с гиперэкспоненциальными входными распределениями // Проблемы передачи информации. – 2016. – Т. 52. – № 1. – С. 16–26.
  5. *Tarasov V.H., Bakhareva N.F., Litulina L.V.* Математическая модель телетрафика на основе системы G/M/1 и результаты вычислительных экспериментов // Информационные технологии. – 2016. – Т. 22. – № 2. – С. 121–126.
  6. *Tarasov V.H., Kartashevskiy I.V.* Способы аппроксимации входных распределений для системы G/G/1 и анализ полученных результатов // Системы управления и информационные технологии. – 2015. – № 3. – С. 182–185.
  7. *Алиев Т.И.* Аппроксимация вероятностных распределений в моделях массового обслуживания // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – № 2(84). – С. 88–93.
  8. *Whitt W.* Approximating a point process by a renewal process, I: two basic methods // Operation Research. – 1982. – Vol. 32. – No. 1. – P. 125–147.
  9. *Myskja A.* An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals // Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ITC-13. – Elsevier Science Publishers. – 1991. – P. 683–688.
  10. *Jennings O.B. & Pender J.* Comparisons of ticket and standard queues // Queueing Systems. – 2016. – vol. 84. – No. 1. – Pp. 145–202.
  11. *Tarasov V.H., Горелов Г.А., Ушаков Ю.А.* Восстановление моментных характеристик распределения интервалов между пакетами входящего трафика // Инфокоммуникационные технологии. – 2014. – № 2. – С. 40–44.
  12. *Tarasov V.H., Bakhareva N.F.* Обобщенная двумерная диффузионная модель массового обслуживания типа GI/G/1 // Телекоммуникации. – 2009. – № 7. – С. 2–8.
  13. *Tarasov V.H.* Вероятностное компьютерное моделирование сложных систем. – Самара: СНЦ РАН, 2002.
  14. *Gromoll H.C., Terwilliger B. & Zwart B.* Heavy traffic limit for a tandem queue with identical service times // Queueing Systems. – 2018. – Vol. 89. – No. 3. – Pp. 213–241.
  15. *Legros B.* M/G/1 queue with event-dependent arrival rates // Queueing Systems. – 2018. – Vol. 89. – No. 3. – pp. 269–301.
  16. *Jennings O.B. & Pender J.* Comparisons of ticket and standard queues // Queueing Systems. – 2016. – Vol. 84. – No. 1. – Pp. 145–202.

*Статья поступила в редакцию 18 сентября 2019 года*

## **TELETRAFIC MODELS BASED ON DUAL SYSTEMS WITH HYPEREXPONENTIAL AND ERLANG DISTRIBUTIONS**

***V.N. Tarasov, N.F. Bakhareva, E.G. Akhmetshina***

Povolzhskiy State University of Telecommunications and Informatics  
23, L. Tolstogo st., Samara, 443010, Russia

E-mail: veniamin\_tarasov@mail.ru, nadin1956\_04@inbox.ru, elyamalusha@mail.ru

***Abstract.*** This paper presents the results of studies on queueing systems (QS)  $H_2/E_2/1$  and  $E_2/H_2/1$  with second-order hyperexponential and Erlang input distributions. Considered QS are of type G/G/1. The use of these higher-order distribution laws is hindered by increasing computational complexity. For such second-order distribution laws, the classical method of spectral decomposition of the solution of the Lindley integral equation for G/G/1 systems makes it possible to obtain a solution in closed form. The article presents

---

*Veniamin N. Tarasov (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*  
*Nadezhda F. Bakhareva (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.*  
*Eleonora G. Akhmetshina, graduate student.*

*the obtained spectral decompositions of the solution of the Lindley integral equation for the considered systems and the formula for the average waiting time in the queue. The adequacy of the results is confirmed by the correct use of the classical method of spectral decomposition and the results of numerical simulation. For practical application of the results obtained, the probability theory moments method is used. Systems of the G/G/1 type are widely used in the theory of teletraffic when modeling data transmission systems. For example, according to the average waiting time in the queue, packet delays in packet switching networks are estimated when they are modeled using QS.*

**Keywords:** *hyperexponential and erlangian distribution laws, queuing systems, method of spectral decomposition.*

## REFERENCES

1. *Kleinrock L.* Teoriya massovogo obsluzhivaniya [Queuing theory]. Moscow, Mashinostroenie Publ, 1979. 432 pp. (In Russian).
2. *Brannstrom N.* A Queuing Theory analysis of wireless radio systems. Applied to HS-DSCH. Lulea university of technology. 2004. 79 pp.
3. *Tarasov V.N., Akhmetshina E.G., Kada Othmane.* Features of application of hyperexponential and hypererlangian input distributions in queuing systems // Vestn. SamGTU. Ser. Tekhn. Nauki. 2019. Vol. 61. no. 1. Pp. 34–44 (In Russian).
4. *Tarasov V.N.* Analysis of queues with hyperexponential arrival distributions // Problemy peredachi informacii, 2016. no. 1 (55). Pp. 14–23 (In Russian).
5. *Tarasov V.N., Bakhareva N.F., Lipilina L.V.* Mathematical model of teletraffic on the based G/M/1 system and results of computational experiment // Informacionnye tehnologii. 2016. Vol. 22, no. 2. Pp. 121–126 (In Russian).
6. *Tarasov V.N., Kartashevskiy I.V.* Methods for approximating input distributions for the G/G/1 system and analysis of the results // Sistemy upravleniya i informatsionnye tehnologii. 2015. no. 3. Pp. 182–185 (In Russian).
7. *Aliev T.I.* Approximation of probability distributions in queuing models // Nauchno-tekhnicheskij vestnik informacionnyh tekhnologij, mekhaniki i optiki. 2013. no. 2(84). Pp. 88–93 (In Russian).
8. *Whitt W.* Approximating a point process by a renewal process: two basic methods // Operation Research, 1982. no. 1(30). Pp. 125–147.
9. *Myskja A.* An improved heuristic approximation for the GI/GI/1 queue with bursty arrivals // Teletraffic and datatraffic in a Period of Change, ITC-13. Elsevier Science Publishers, 1991. Pp. 683–688.
10. *Jennings O.B. & Pender J.* Comparisons of ticket and standard queues // Queueing Systems, 2016. no. 1 (84). Pp. 145–202.
11. *Tarasov V.N., Gorelov G.A., Ushakov Y.A.* Restoring moment distribution characteristics interval between packets of incoming traffic // Informacionnye tehnologii. 2014. no. 2. Pp. 40–44 (In Russian).
12. *Tarasov V.N., Bahareva N.F.* A generalized two-dimensional diffusion queuing model of the GI/G/1 type // Telekommunikacii. 2009. no. 7. Pp. 2–8 (In Russian).
13. *Tarasov V.N.* Probabilistic computer modeling of complex systems, Samara, SNC RAN. 2002. (In Russian).
14. *Gromoll H.C., Terwilliger B. & Zwart B.* Heavy traffic limit for a tandem queue with identical service times. Queueing Systems, 2018. Vol. 89, no. 3, pp. 213–241.
15. *Legros B.* M/G/1 queue with event-dependent arrival rates. Queueing Systems, 2018. Vol. 89, no. 3, pp. 269–301.
16. *Jennings O.B. & Pender J.* Comparisons of ticket and standard queues. Queueing Systems, 2016. Vol. 84, no. 1, pp. 145–202.