

ISSN 1694-5050

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ И АВТОМАТИКИ

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

№2(39)



БИШКЕК

2020

ИЛИМ

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ И АВТОМАТИКИ

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ № 2 (39)

Журнал входит в РИНЦ, а также в перечень
ВАК Кыргызской Республики рецензируемых
научных журналов, в которых должны быть опубликованы
основные результаты диссертаций на соискание
ученых степеней доктора и кандидата наук

Импакт-фактор – 0,463

Журнал издается с 1996 г.

Зарегистрирован Министерством юстиции
Кыргызской Республики
Свидетельство № 1503 от 24 марта 2020 г.

П 78

Проблемы автоматизации и управления: Научно-технический журнал
/ Национальная академия наук Кыргызской Республики. –
Бишкек: ИМА, 2020. – №2 (39). – 83 с.

Главный редактор

Доктор технических наук, профессор БРЯКИН И.В

Ответственный секретарь

Кандидат технических наук С.Н. ВЕРЗУНОВ

Редакционная коллегия:

*доктор физ.-мат. наук, академик РАН Ю.Г. ЕВТУШЕНКО (Россия),
доктор физ.-мат. наук, академик НАН РК М.Н. КАЛИМОЛДАЕВ (Казахстан),
доктор технических наук, член-корр. АЭН Ю.А. МАКАРИЧЕВ (Россия),
доктор технических наук, профессор В.Р. ХРАМШИН (Россия),
доктор технических наук, профессор Е.Л. ЕРЁМИН (Россия),
доктор технических наук, профессор Н.М. ЛЫЧЕНКО (Кыргызстан),
доктор технических наук, профессор Б.И. ИСМАИЛОВ (Кыргызстан),
доктор технических наук, профессор И.В. БОЧКАРЕВ (Кыргызстан),
доктор физ.-мат. наук, профессор А.Д. САТЫБАЕВ (Кыргызстан),
доктор технических наук, доцент А.Б. БАКАСОВА (Кыргызстан),
доктор технических наук, доцент Ж.Т. ГАЛБАЕВ (Кыргызстан),
доктор технических наук Д.В. ЯНКО (Кыргызстан),
кандидат физ.-мат. наук Г.К. КЕРИМКУЛОВА (Кыргызстан),
кандидат технических наук Г.О. АСКАЛИЕВА (Кыргызстан).*

В журнале публикуются статьи по оптимизации динамических систем, моделированию и программному обеспечению, математическому моделированию, информационно-измерительным системам, а также системам автоматизации и диагностики

Контакты редакции:

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265.

Институт машиноведения и автоматизации Национальной академии наук КР

Телефон: +996 312 64-26-24.

E-mail: avtomatika_nankr@mail.ru

Полная электронная версия журнала: <https://ima.naskr.kg/jrn/index.php/pau>

ISSN 1694-5050 © Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, 2020

**ПАМЯТИ
АКАДЕМИКА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК
КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ
ЖАНЫБЕКА ШАРШЕНАЛИЕВА**

Как загадочна судьба человека! Никто не может предсказать ее немыслимые повороты. Кто бы мог предположить, что оставшийся в три года круглым сиротой маленький Жаныбек станет, в последующем, знаменитым человеком и войдет в Историю Кыргызстана.

Сначала умерли от тифа отец – Шаршеналы и мать – Гүлай. Затем один за другим – дедушка Шүкүраалы со своими 6 детьми. Остались только Жаныбек с бабушкой Алмаш. Время было военное, голодное. Крайне тяжело было выживать. Достаточно сказать, что бабушка и внук вместе носили одну пару галош. Если Жаныбек уходил в школу, бабушка не могла никуда выйти и оставалась дома. Если бабушка уходила по делам, Жаныбек не мог пойти в школу и оставался дома. Несмотря на это Жаныбек учился в школе хорошо. Уже в то время в нем проявились самостоятельность, упорство и жизнеспособность, которые так помогли ему в будущем.

Совсем недолго проучившись в школе, маленький Жаныбек попадет в детский дом «Чон Коргон» в Таласской области. Понятно, что атмосфера в детском доме была не лучшей, но Жаныбек учился хорошо. Приходилось часто терпеть побои от старших школьных атаманов, которые таким образом наказывали отличников и хорошистов. Однако Жаныбек рано понял, что только хорошая учеба сделает его настоящим человеком и он упорно гнет свою линию.

Под влиянием любившего свою профессию молодого учителя физики, Жаныбек увлекся физикой и математикой, хотя и по всем остальным предметам у него были отличные оценки. Все свободное время он углубленно изучал физику и математику. В старших классах все вне учебное время он тратил на подготовку к поступлению в высшее учебное заведение. Хотел поступить в вуз на радиотехническую специальность и написал письмо во Фрунзенский политехнический институт. Пришел ответ: «такой специальности у нас нет».

После окончания школы Жаныбек решил поступать в российский вуз. Директор детского дома Шандра и его жена Мария Ивановна дали ему 25 рублей. С огромным трудом и большими приключениями он «зайцем» добрался на поезде до Саратова, подал документы в Саратовский политехнический институт на новую специальность «Автоматика и телемеханика» и успешно сдал вступительные экзамены. Но не поступил из-за отсутствия двухлетнего стажа работы. Ректор института принял участие в его судьбе, направив его в Ленинградскую радиотехническую школу, которую Жаныбек закончил с отличием и пошел служить в Балтийский флот. Через 2 года его отозвали из флота по ходатайству Саратовского политехнического института, и он начал учиться.

Студенческая жизнь была активной, насыщенной и интересной. Жаныбек упорно «грыз» науку. Вначале было тяжело конкурировать с выпускниками физико-математических школ, которые дополнительно еще занимались с репетиторами, но це-

леустремленность Жаныбека быстро дала отличные результаты. Приходилось также все время подрабатывать, чтобы обеспечить себе сносное существование. Жаныбек в 1966 году закончил Саратовский политехнический институт с дипломом с отличием.

После окончания института молодой специалист был направлен во Фрунзенский политехнический институт, а через некоторое время он перешел на работу в Особое конструкторское бюро Института космических исследований АН СССР (ОКБ ИКИ), где быстро вырос до ведущего конструктора. В ОКБ ИКИ Жаныбек занимался разработкой и конструированием научных приборов для космических объектов. Работа в таком передовом научно-производственном предприятии, как ОКБ ИКИ дала ему бесценный инженерный и производственный опыт, который в будущем сыграл свою положительную роль.

В 1968 году Жаныбек поступил в аспирантуру Московского энергетического института (МЭИ), где участвовал в разработке и внедрении системы обнаружения и слежения за подводной лодкой, которая была заказана предприятиями Минобороны СССР. Им был предложен алгоритм, позволяющий распознать координаты движущейся подводной лодки по сигналам размещенных под водой оптико-гидроакустических приемников. В итоге, он досрочно, в 1971 году в МЭИ защищает кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка многоканальной системы управления с двумя степенями свободы».

Работа Ж. Шаршеналиева по научному направлению «Исследование и разработка высокоточных многоканальных систем автоматического контроля и управления» продолжилась и после защиты кандидатской диссертации. Результаты данной работы были опубликованы в 4 периодических научных журналах, 16 книгах и внедрены на объектах военно-промышленного комплекса СССР. Ж. Шаршеналиев проявил себя не только как талантливый исследователь и инженер, но и как успешный изобретатель. Им было получено 2 авторских свидетельства СССР на изобретения.

В 1972 году Ж. Шаршеналиев становится заведующим кафедрой автоматики и телемеханики Фрунзенского политехнического институт, увлекается космическим приборостроением, вместе с сотрудниками кафедры и студентами он в рамках научного направления «Разработка, конструирование и создание прецизионных устройств и систем распознавания и управления» разрабатывает и конструирует прецизионные устройства и системы.

Ж. Шаршеналиевым был предложен и развит новый подход к разработке указанных систем, а также решен ряд конкретных задач, связанных с созданием уникальных образцов новой техники. В это время им были созданы прецизионные анализаторы, дискриминаторы, системы сканирования, дефлекторы, следящие системы, которые позже были внедрены в научно-исследовательских институтах и центрах Москвы, Вильнюса, Баку и других городов СССР.

Результаты работы в данном направлении были опубликованы в 2 монографиях, 3 книгах, 5 международных журналах. Кроме того, получено 7 авторских свидетельств на изобретения.

Талантливого ученого, педагога, организатора заметили в руководстве Республики. В 1982 году по решению ЦК КПК Киргизии, Министерства водного хозяйства СССР с согласия ЦК КПСС, Ж. Шаршеналиев был назначен генеральным директором

Всесоюзного научно-исследовательского института комплексной автоматизации мелиоративных систем (ВНИИКАМС). Это был головной НИИ в СССР, который занимался новыми информационными технологиями и средствами автоматизации в водном хозяйстве СССР. В этом НИИ Ж. Шаршеналиев плодотворно проработал 4 года. В качестве директора ВНИИКАМС Ж. Шаршеналиев показал себя как талантливый организатор науки и производства.

В то же время продолжались исследования по вышеупомянутому научному направлению «Разработка, конструирование и создание прецизионных устройств и систем распознавания и управления». Кроме того, была начата работа по третьему новому научному направлению «Системный анализ и оптимальный синтез многомерных возмущенных систем автоматического управления». В результате были получены многочисленные авторские свидетельства, опубликованы научные статьи, монографии, книги. Кроме того, на основе результатов исследовательской работы по данному и предыдущим направлениям науки Ж. Шаршеналиев блестяще защитил докторскую диссертацию на тему «Теория и методы декомпозиции и оптимизации динамических систем с малыми параметрами».

В 1986 году он был назначен министром высшего и среднего специального образования Киргизской ССР, в качестве которого он проработал два года.

В 1988 году Ж. Шаршеналиев назначен заместителем главного ученого секретаря Президиума академии наук Киргизской ССР, в 1991 году он назначен на должность академика-секретаря (Председателя Бюро отделения технических, физико-математических и горно-геологических наук Академии наук Кыргызстана), в которой проработал до 1993 года. В этих должностях он проявил себя как талантливый, инициативный и энергичный организатор и администратор.

В 1989 году Ж. Шаршеналиев был выдвинут на избрание в члены-корреспонденты АН Киргизской ССР, его кандидатура была поддержана такими всемирно известными учеными как Вице-президент АН СССР Е.П. Велихов, академик АН СССР Воронов А.А., член-корреспондент АН СССР Цыпкин Я.З., член-корреспондент АН СССР Теряев Е.Д., заслуженный деятель науки и техники РСФСР, д.т.н., профессор Юсупов Р.М., председатель Ученого совета ЛГУ, д.ф.-м.н., профессор Петросян Л.А. В результате Ж. Шаршеналиев был избран член-корреспондентом АН Киргизской ССР по специальности «Управление техническими системами».

В 1993 году Ж. Шаршеналиев был избран директором Института автоматизации АН КР. В создании и становлении этого уникального в Центральной Азии института особую роль сыграли выдающиеся ученые АН СССР – академики АН СССР Котельников В.А., Петров Б.Н., Пугачев В.С., Гаврилов М.Л., Цыпкин Я.З., Шумиловский М.Н. Особую роль в выборе научного направления Ж. Шаршеналиева сыграл академик АН СССР Цыпкин Я.З.

Институт автоматизации успешно участвовал в научных исследованиях по программам и проектам ГКНТ, АН СССР, Совета министров СССР и Киргизской ССР. Научные разработки института были отмечены тремя Государственными премиями СССР и Киргизской ССР.

Кроме руководства Институтом, Ж. Шаршеналиев создал и лично возглавил научно-исследовательскую лабораторию «Оптимальные и цифровые системы автоматиче-

ского управления». Коллективом лаборатории под руководством Шаршеналиева были созданы конструктивная теория и прикладные методы синтеза прецизионных автоматических систем управления сложными движениями, разработаны квазиоптимальные и адаптивные алгоритмы управления регулярно и сингулярно возмущенными динамическими системами, разработана компьютерная технология решения задач мониторинга экологического состояния природной среды, дешифрирования дистанционных данных и цифрового картографирования с использованием DIP и GIS технологий.

В 2000 году Ж. Шаршеналиев был избран ректором Ошского технологического университета (ОшТУ), где проработал 4 года. За эти годы ОшТУ стал одним из ведущих вузов Кыргызстана. Были созданы новые факультеты, кафедры и лаборатории по современным инженерным специальностям (энергетика, новые информационные технологии, автоматическое управление). В ОшТУ появился интернет, был организован выпуск научного журнала «Известия ОшТУ», начали работать Советы по защите докторских и кандидатских диссертаций по ряду технических специальностей. Существенно была улучшена материально-техническая база ОшТУ – были сданы в эксплуатацию новый главный корпус и новая библиотека, отремонтированы и приведены в порядок другие корпуса и помещения. Повысились требования к профессорскому и преподавательскому составу и, как следствие, значительно повысилось качество инженерного образования и престиж ОшТУ.

В 2000 году Ж. Шаршеналиев был избран академиком НАН КР.

В 2003 году Ж. Шаршеналиев был назначен ректором КТУ им. И.Раззакова – первого и главного инженерного вуза Кыргызстана, внесшего уникальный вклад в развитие науки, образования, культуры и экономики страны, где Ж. Шаршеналиев проработал три года.

За эти годы в КТУ открылся Кыргызско–Германский технический факультет для подготовки кадров по направлениям электроэнергетики и машиностроения. Впервые в Центральной Азии был создан Библиотечно-информационный центр с автоматизированной электронной библиотекой с 60 терминалами, подключенными к интернет. Это стало возможным благодаря международному проекту с бюджетом в 300000 евро, в котором приняли участие Университет Ницца–София–Антиполис (Франция), Бредфордский королевский высший колледж (Англия), Мичиганский университет (США), Высшая школа библиотечных информационных наук (Франция).

За годы работы Ж. Шаршеналиева в должности ректора КТУ был модернизирован большой актовый зал, сдан в эксплуатацию гостевой дом, существенно улучшены условия жизни студентов в общежитиях, усовершенствованы планировка и дизайн территории университета. Создан новый информационный музей университета, значительно повышена зарплата преподавателям и сотрудникам (на 20 %), разработана Концепция развития инженерного образования Кыргызстана до 2015 года. Кроме того, в 2004 году Ж. Шаршеналиев добился присвоения КТУ статуса «Национальный»

Однако, в 2006 году, во время правления президента Бакиева К.С. министром образования, науки и молодежной политики был назначен Досбол Нур уулу, «специалист» по истории совхозов и колхозов, который быстро «сумел» ликвидировать у КТУ статус «Национальный», и новые инициативы по развитию инженерного образования.

В 2006 году Ж. Шаршеналиев возвратился в родной Институт автоматизации НАН КР в качестве руководителя проектов и заведующего лабораторией «Оптимальные и цифровые системы управления», в 2009 году был избран директором Института, реорганизованного в Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР (ИАИТ), где продолжил работу по упомянутому научному направлению «Системный анализ и оптимальный синтез многомерных возмущенных систем автоматического управления», им была разработана и развита конструктивная теория управления динамическими системами, описываемыми регулярными и сингулярно-возмущенными уравнениями, предложены новые алгоритмы и методы стабилизации и оптимального управления систем с сосредоточенными и с распределенными параметрами. Получила дальнейшее развитие теория многомерных разнотемповых систем, систем при наличии различных ограничений.

Результаты этих работ опубликованы в 10 монографиях НАН КР, в 2 книгах российского издания, в 4 международных периодических научных журналах и изданиях, 14 трудах всесоюзных и международных конференций.

Ж. Шаршеналиев вместе со своими сотрудниками и учениками еще в 1983 году начал и продолжил выполнять исследовательскую работу по научному направлению «Разработка методов и создание автоматизированных систем обработки и управления». Результаты данной работы опубликованы в 2 книгах, изданных АН СССР и Всесоюзным объединением «Союзводпроект», 10 научных журналах, 4 трудах международных конференций было получен 1 патент и 2 авторских свидетельства на изобретения.

Полученные под руководством Ж. Шаршеналиева результаты используются для разработки высокоэффективных алгоритмов классификации природных объектов на основе DIP и GIS технологий, тематических цифровых карт для телекоммуникационных систем, тематической интерпретации дистанционной информации для исследования природных ресурсов Земли, интегрированных систем автоматизированного производства, систем дистанционного сбора и компьютерной обработки потребляемой электроэнергии.

Таким образом, Ж. Шаршеналиевым были созданы 4 научные школы по направлениям которых выполнено 62 научно-технических отчета, опубликовано 18 монографий, 317 научных статей, 16 учебно-методических работ и защищено диссертаций. Оригинальность и новизна идей Ж. Шаршеналиева подтверждена 10 авторскими свидетельствами СССР на изобретения, 4 патентами и свидетельствами Кыргызпатента. Он вырастил более 40 докторов и кандидатов технических и физико-математических наук.

Ж. Шаршеналиев являлся почетным профессором и доктором 9 ведущих университетов Кыргызстана и Казахстана, почетным академиком Института автоматизации Казахстана, Президентом Кыргызской ассоциации по автоматическому управлению и компьютерным системам, много лет возглавлял специализированные диссертационные советы по защите докторских и кандидатских диссертаций. Он являлся главным редактором журнала «Проблемы автоматизации и управления» ИАИТ НАН КР, членом редколлегии ряда отечественных и зарубежных научных журналов,

Имя Жаныбека Шаршеналиева широко известно за рубежом. Он являлся председателем Кыргызской секции Международного симпозиума РАН РФ «Фундаментальные и прикладные проблемы науки», выступал с докладами, обменивался опытом и

читал лекции в Бостонском, Пенсильванском, Миллерсвилльском, Коннектикутском университетах США), университете Брно (Чехословакия), Стамбульском и Анкарском университетах (Турция), Технических университетах Берлина и Ильменау, Бранденбургском университете Германия), фирмах «Gardinal», «Mobil» и многих университетах других стран.

Ж. Шаршеналиев являлся не только выдающимся ученым и педагогом, но и активным гражданином и общественным деятелем. Он был председателем Кыргызского комитета солидарности стран Азии и Африки, депутатом Верховного совета Киргизской ССР 2 созыва, организатором и первым председателем Республиканской народной партии Кыргызстана. Ж. Шаршеналиев написал более 50 публицистических статей по вопросам образования, науки, политики и др. Они касались животрепещущих вопросов будущего нашей страны, за которое он всегда, как патриот, болел душой.

Активная и плодотворная деятельность Ж. Шаршеналиева не осталась незамеченной. Она была высоко оценена 16 государственными наградами и почетными званиями. В числе их: орден КР «Манас» 3 степени, медаль КР «Данк», Медаль «Звезда Азии и Африки», изобретатель СССР, лауреат Государственной премии в области науки и техники КР, заслуженный деятель науки КР и др.

Даже в почтенном возрасте Жаныбек Шаршеналиев оставался молодым, энергичным, инициативным и успешно занимался научными исследованиями и общественной деятельностью. Он всегда был образцом для подражания для своих учеников и многих молодых людей, которые хотели бы сказать свое слово в науке. Память о Жаныбеке Шаршеналиеве навсегда останется в наших сердцах и истории науки Кыргызстана.

Ученики и коллеги академика НАН КР Жаныбека Шаршеналиева

УПРАВЛЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

УДК: 519.3:62–50

Ж. Шаршеналиев – академик НАН КР

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР

К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЕНИИ «ПАРАМЕТРОМ ПОРЯДКА» ПОВЕДЕНИЕМ НЕЛИНЕЙНЫХ ДИССИПАТИВНЫХ И РАЗНОТЕМПОВЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Отмечены особенности методов АКОР и АКАР в исследовании консервативных и диссипативных систем оптимального управления, проанализировано действие «параметра порядка» в нелинейных системах со многими степенями свободы и в системах с разнотемповыми движениями.

Ключевые слова: Параметр порядка, диссипативные, консервативные и разнотемповые системы управления.

Отметим, что окружающая нас среда (природная, технологическая, социально-экономическая), комплексы различных суперсистем подвержены динамическим взаимодействиям и обмену энергией, веществом и информацией. Они нелинейны, многомерны и многосвязны, в них возникают критические и хаотические режимы. Из синергетической теории управления [1, 2, 3], известно, что в нелинейных сложных ММО объектах и системах, имеющих много степеней свободы, возникают парадоксальные режимы. Это связано с внутренним взаимодействием фазовых координат состояния и возникновением режима самоорганизации (самопроизвольное возникновение хаоса, способствующего образованию регулярной структуры). При самоорганизации в диссипативных системах выделяются несколько степеней свободы – **параметры порядка**, к которым «подстраиваются» все другие степени свободы. Параметры порядка имеют место и в разнотемповых системах управления.

Для раскрытия сути излагаемых проблем рассмотрим некоторые особенности методов АКОР и АКАР, используемых в теории оптимального управления. Обычно в системах автоматического управления движение динамических систем описывается дифференциальными уравнениями:

$$\frac{dx_i}{dt} = f_i(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m), \quad i = \overline{1, n}, \quad (1)$$

где $u \in U$ – управление, $x \in X$ – фазовые координаты.

Если задача состоит в переходе из некоторого начального положения $x(t_0) = x_0$ в заданное конечное состояние $x(t_1) = x_1$ с минимизацией функционала

$$I[u, t] = \varphi(x(t_1)), \quad (2)$$

то она представляет задачу Майера. Считается, что решение этой задачи в методе АКОР существует тогда, когда оно удовлетворяет необходимым условиям оптимальности при любых допустимых управляемых $u(t) \in U$.

В случае использования принципа максимума Понтрягина (ПМ), если решение задачи на $\min I[u, t]$ существует, то считается, что и существует нетривиальное решение присоединенной системы дифференциальных уравнений

$$\frac{d\psi}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x}, \quad H = \psi_1 f_1 + \dots + \psi_n f_n. \quad (3)$$

Тогда оптимальное управление $u(t)$ для каждого момента времени определяется из условия

$$u(t) = \arg \max H[x(t), \psi(t), u]. \quad (4)$$

Здесь есть трудности при решении системы $2n$ дифференциальных уравнений (1), (3) с учетом выполнения условия (4) выбора управления. Определение постоянных интегрирования системы уравнений (1), (3) зависит от начальных и конечных условий и также условий трансверсальности. Принцип Понтрягина в методе АКОР зиждется на всеобщем характере закона сохранения энергии (первого начала термодинамики) и никак не учитывает возрастания энтропии, которая определяет направленность всех происходящих процессов взаимодействия. Движение системы и термодинамические процессы способствуют появлению ряда новых форм. В АКОР распространенный математический квадратичный критерий качества является твердо **постулированным**, не учитывающим специфику и природу управляемых процессов. Особенностью принципа Понтрягина является обратимость динамических траекторий, что касается только консервативных, но никак не диссипативных динамических систем, где действует **второе начало термодинамики с необратимыми процессами**.

Для консервативных систем понятие Гамильтониан представляет полную энергию. Как известно, принцип максимума в общем случае является необходимым условием оптимального управления. Однако в ряде случаев для линейных систем ПМ может доставлять необходимые и достаточные условия оптимальности. Оптимальное управление в этом случае формируется как функция времени t , т.е. без обратной связи по состоянию управляемого объекта $x \in X$. Здесь в условиях неопределенности параметров управляемого объекта и действия шумов проявляется неустойчивость системы.

1. Использование квадратичных функционалов жестко ограничивает применение АКОР. Для оценки отклонения по величине от программной траектории (а не по знаку или направлению) функционал выбирается в виде квадратичной функции фазовых переменных и управлений.

2. При оптимизации следящих систем приходится иметь дело с проблемой принятия решений в условиях неопределенности.
3. Здесь также возникает проблема выявления коэффициентов квадратичных форм в функционале

$$J = \int_0^t [x^T P x + u^T Q u] dt.$$

Выбор элементов матриц P и Q осуществляется при положительной определенности $u^T Q u \geq 0, x \neq 0$. но они во многом произвольны и зависят от интуиции исследователя.

4. Решение задачи АКОР сводится к необходимости интегрирования матричного уравнения Риккати, которое в общем случае не интегрируется даже с помощью конечного числа элементарных операций. В этом случае имеет место неразрешимость задачи синтеза оптимальных управлений в аналитическом виде, а требуется использование численных методов для каждого вида параметров объекта управления и критерия качества. Здесь уместно напомнить об особенностях систем с необратимыми процессами.

Термодинамика необратимых процессов действует в системах, находящихся далеко от теплового равновесия и, по определению И. Пригожина, бывает 3-х видов:

- равновесная область, где производство энтропии, разные потоки и силы равны нулю;
- слабо равновесная или линейная область, где термодинамические силы слабы, потоки линейно зависят от силы;
- сильно неравновесная и нелинейная область, где потоки являются сложными функциями сил.

При этом И. Пригожин сделал важный вывод: источник порядка на всех уровнях движения – это неравновесность, которая способствует порождению порядка из хаоса. В необратимых термодинамических процессах, происходит образование упорядоченных структур с новыми свойствами. Это характеризует появление нового явления – самоорганизации систем. По определению основателя науки синергетики Г. Хакена «самоорганизация – процесс в нелинейных динамических системах, приводящий к возникновению внутренних пространственных и пространственно-временных структур». При этом некоторые из возникающих структур являются диссипативными, т.е. где происходит рассеивание (диссипация) энергии, что делает структуры наблюдаемыми на определенном временном интервале. Когда производная функция H по координатам равна нулю, то соответствующие производные и есть интегралы движения, т.е. являются инвариантами системами. Синергетическая теория управления (СТУ) – это новое направление в общей теории управления, базирующееся на принципах направленной самоорганизации и динамической декомпозиции синтезируемых нелинейных систем на притягивающих инвариантных многообразиях (ИМ). Она отражает идеологию единства процессов самоорганизации и управления, т.е. представляет собой своего рода симбиоз кибернетики и синергетики [2].

В развитие кибернетики и синергетики профессор А. Колесников разработал КЕПСУ – концепцию единства процессов самоорганизации и управления. КЕПСУ – решает трудные задачи, не решаемые в классической теории управления из-за барьера «нелинейности–многомерности–многосвязности». В соответствии с этой концепции осуществляется процесс нелинейного взаимодействия или взаимосодействия. На основе КЕПСУ сформулирован принцип **«расширения–сжатия»** фазового пространства: генерация совокупности нелинейных отрицательных и положительных обратимых связей, обеспечивает формирование направленной самоорганизации движения. На принципах КЕПСУ основан метод АКАР – Аналитического Конструирования Агрегированных Регуляторов, преодолевший «проклятие размерности» Р. Беллмана. Фактически здесь происходит нелинейный системный синтез. Для осуществления такого синтеза необходим обязательный обмен с внешней средой энергией, веществом и информацией и непереносное взаимодействие, т.е. когерентность поведения между компонентами системы. Методологическим ядром СТУ является метод АКАР, позволяющий осуществить синтез законов управления для как нелинейных и многомерных, так и многосвязных объектов. Основная идея СТУ: организованное управление динамической системой в ее пространстве состояний образует притягивающее **предельное множество – аттракторы** и обеспечивает желаемое ее поведение. При этом организуется кооперативное поведение множество переменных и выделение малого числа **параметров порядка**, к которым подстраиваются все остальные переменные. «Параметр порядка» – это агрегированные макропеременные, т.е. переменные ψx , которые не ищутся, а задаются.

Многообразия, которые обладают свойством притягивать траектории, начинающиеся в некоторой его окрестности, называются притягивающими. При этом эти многообразия остаются неизменными во время эволюционного движения динамической системы и являются инвариантными. В СТУ цели представляются в виде набора инвариантов, отражающих основные требования, предъявляемые разработчикам систем. Как указано в [2], «в отличие от немного примитивных первичных показателей качества (время регулирования, не регулирование, колебательность и т.п.) и достаточно абстрактных постулированных оптимизирующих функционалов, инварианты имеют определенное физическое, химическое, техническое и др. содержание...».

АКАР решает многие проблемы, не разрешаемые в АКОР. В АКАР оптимизирующий критерий не строго постулируется заранее, а конструируется путем выбора соответствующих функций $\psi x_1, \dots, x_n$ с учетом уравнения $\dot{x}_n t = f_n x_1, \dots, x_n + u$ и по заданным инвариантным многообразиям. В АКАР считается, что исходная задача описывается дифференциальными уравнениями объекта [1, 2]

$$\dot{x} t = F x, u, q, I, M, \quad (5)$$

где $x(t)$ – координаты состояния, $u t$ – управления, $q t$ – задающие, внешние, $I(t)$ – параметрические воздействия. В формировании уравнений самоорганизации

указанные силы соответствующим образом необходимо исключить, расширив исходные системы «объект – внешние силы» таким образом, чтобы внешние силы оказались в уравнении системы для нее **внутренними**. В этом случае мы уже имеем уравнение самоорганизации, которые в результате замыкания прямыми и обратными отрицательными и положительными связями представляет собой **расширенную модель синтеза системы размерности** $\dim \Sigma = n+r$. Задача состоит в синтезе соответствующих законов управления u $x_1, \dots, x_n, z_1, \dots, z_r$ в функции координат состояния расширенной системы. Здесь $z_1, \dots, z_r$ – координаты информационных моделей задающих, внешних параметрических возмущающих воздействий, имеющих вид

$$\dot{Z}(t) = \varphi(x, z), \quad (6)$$

здесь Z – оценки соответствующих возмущающих воздействий.

Тогда уравнения (1) и (2) вместе и есть **модель синергетического синтеза систем управления**. В результате система становится открытой, следовательно, через систему будут протекать энергия, вещество и информация. При этом создается неравновесная ситуация, что необходимо для возникновения направленной самоорганизации. В системе должна происходить асимптотическая декомпозиция и редукция на ИМ при векторном управлении нелинейными сложными объектами. Тогда динамическая декомпозиция выражается [2, 3].

$$\dim \Sigma = n+r-\lambda m,$$

где $(n+r)$ – размерность исходной расширенной системы, m – размерность вектора управления, λ – число вводимых ИМ. Можно сказать, что управление в СТУ – это преодоление избыточных степеней свободы системы.

Различие между консервативными и диссипативными системами ярко проявляется при макроскопическом их развитии. Диссипативная система может приобрести свойство самодвижения, самоконструирования, что принципиально невозможно в консервативных системах. В диссипативных системах при протекании через них вещества и энергии возникают коллективные переменные – **параметры порядка**.

Параметры порядка, бифуркация, диссипативные структуры, принцип подчинения, аттракторы – новые идеи ранее неизвестные классической науке об управлении. В таких системах происходит «забывание» начальных условий и формирование неравновесных структур, а это может служить причиной упорядоченности. Параметр порядка управляет поведением каждого компонента системы. Управляемые параметры порядка получаются в результате асимптотически точной динамической декомпозиции.

О «Параметре порядка» в разнотемповых системах, имеющих два переменных масштаба движения.

В задачах аэродинамики, в самоорганизующихся разнотемповых системах, релаксационных процессах наблюдаем разделение исходной системы на медленные и быстрые подсистемы, где также возникает «параметр порядка». Рассмотрим одну из таких систем. Пусть динамическая разнотемповая система имеет вид:

$$\begin{aligned} F \frac{dz}{dt} &= F(z, y, t), \\ \frac{dy}{dt} &= f(z, y, t), \\ z(0) &= z^0, \quad y(0) = y^0, \\ z &\in \mathbb{R}^m, \quad y \in \mathbb{R}^n. \end{aligned} \quad (7)$$

При $E = 0$ имеем систему алгебраических и дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} E(z, y, t) &= 0, \\ \frac{dy}{dt} &= f(\bar{z}, \bar{y}, t). \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8) имеют различные фазовые пространства, где система (7) есть возмущенная по отношению к системе (8), а система (8) по отношению к (7) – вырожденная, или редуцированная. Для решения возмущенной системы необходимо знать большое число дополнительных условий. В литературе такие системы называются сингулярными, способствующими появлению параметрической неустойчивости. В синергетике компоненты $y(t)$, называются параметрами порядка и долгоживущими модами (Г. Хакен). Параметрическая неустойчивость наблюдается во многих электрических, электромеханических системах – это колебание регуляторов турбомашин, колебания плазмы, процессы в трубопроводах с протекающим газом или жидкостью и т.п. Системы с таким поведением принято называть **жесткими** [4]. В этом случае участок быстрого начального изменения фазовой координаты имеет название **пограничного слоя**. При исследовании таких систем возникают значительные вычислительные трудности из-за большого времени счета и накопления вычислительных ошибок.

Литература

1. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. Москва – Таганрог, Энергоиздат, 1994. – 344 с.
2. Колесников А.А., Медведев М.Ю. Современные методы синтеза систем управления. Таганрог, изд-во ТрГУ, 2003. – 127 с.
3. Колесников А.А. Когнитивные возможности синергетики // Вестник РАН, 2003, т. 73, № 8. – С. 727–734.
4. Ракитский Ю.В., Устинов С.М., Черноручский И.Г. Численные методы решения жестких систем. М.: Наука, 1979. – 208 с.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

УДК: 004.624

Шариеналиев Ж.Ш. академик НАН КР,

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР

Янко Д.В., д.т.н., ОАО «Кыргызтелеком», dmitry.yanko@gmail.com

ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ОРГАНИЗАЦИИ БЕЗОПАСНОГО ОБМЕНА ДАННЫМИ МЕЖДУ ПЛАТФОРМОЙ 1С:ПРЕДПРИЯТИЕ 8 С ДРУГИМИ ИНФОРМАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ

В статье выполнен обзор существующих методов интеграции платформы 1С:Предприятие 8, а также рассмотрен один из возможных методов интеграции, позволяющий выстроить безопасный высокопроизводительный обмен данными между платформой 1С: Предприятие 8 и внешними информационными системами.

Ключевые слова: 1С:Предприятие 8; интеграция; IIS; NGINX; C#.

Постановка задачи. Повсеместное распространение платформы 1С:Предприятие (далее Платформа) наряду с наличием других информационных систем (далее ИС) на предприятиях неизбежно приводит к необходимости межсистемного информационного обмена между этими системами. В настоящее время для организации взаимодействия Платформа предоставляет множество доступных методов, выбор требуемого метода обуславливается требованиями к уровню автоматизации, а также к уровню обеспечения информационной безопасности. Наиболее интересной представляется задача полной автоматизации обмена их с обеспечением защиты данных от несанкционированного доступа при передаче по каналам связи, с обеспечением возможности промежуточной их обработки.

Обзор методов интеграции с платформой 1С:Предприятие. Основные методы обеспечения внешнего взаимодействия с Платформой [1 - 5] можно разделить на следующие:

- 1) посредством импорта и экспорта файлов:
 - a. XML;
 - b. JSON;
 - c. HTML;
 - d. ZIP;
 - e. DBF;
 - f. двоичные файлы;
- 2) посредством технологии COM-автоматизации:
 - a. automation-сервер;

- b. внешнее соединение;
- c. 1С в качестве COM-клиента;
- 3) посредством технологии внешних компонент;
- 4) посредством внешних источников данных (баз данных, ODBC);
- 5) посредством сети передачи данных:
 - a. посредством HTTP-сервисов;
 - b. посредством WEB-сервисов;
 - c. посредством электронной почты:
 - i. протокол POP3;
 - ii. протокол SMTP;
 - iii. протокол IMAP;
 - d. посредством встроенных механизмов обмена данными 1С:
 - i. механизм распределенных информационных баз;
 - ii. универсальный механизм обмена данными;
 - e. посредством REST интерфейса с использованием протокола OData;
 - f. встраиваемый веб-клиент;
 - g. посредством протокола FTP;
- 6) посредством обобщенных специализированных интеграционных решений 1С:
 - a. «1С:Конвертация данных»;
 - b. международные форматы электронных сообщений EANCOM 2002 и ANSI ASC X12, посредством ЦОД «1С:Сеть»;
- 7) посредством отраслевых специализированных интеграционных решений 1С:
 - a. стандарт «Клиент банк» для отправки платежных документов в банк и получения выписок из банка;
 - b. стандарт взаимодействия по технологии DirectBank;
 - c. стандарт обмена данными по операциям эквайринга;
 - d. стандарты CommerceML;
 - e. стандарты обмена для государственных (муниципальных) учреждений:
 - i. стандарт обмена данными с учреждениями Банка России;
 - ii. форматы Федерального казначейства;
 - iii. форматы Министерства финансов РФ;
 - iv. открытый формат бухгалтерской отчетности государственных учреждений и др.
- 8) посредством облачных технологий 1cFresh [6].

Далее кратко рассмотрим базовые интеграционные механизмы Платформы (пп.1-5).

Для работы с XML-документами в Платформе реализовано множество возможностей, среди них: последовательное чтение (**ЧтениеXML**) и запись (**ЗаписьXML**), проверка возможности чтения из XML значения указанного типа, проверка соответствия схеме XML при чтении, использование модели объектного доступа к данным XML-документов (**ДокументDOM**), использование объектной модели схемы XML (**СхемаXML**), использование канонического XML стандарта версии 1.1 (**КаноническаяЗаписьXML**) и др. Отдельно следует отметить, что Платформа для работы с XML-документами в бинарном формате поддерживает технологию Fast Infoset, что обеспечивает меньший объем файлов и более высокую скорость обработки, для этого во

встроенном языке имеются соответствующие объекты - **ЧтениеFastInfoSet** и **ЗаписьFastInfoSet**.

Также следует отметить формат **EnterpriseData**, который основан на XML и разработан для обмена информацией между любыми информационными системами, является бизнес-ориентированным и включает в себя описание бизнес-сущностей из различных областей бизнеса и обеспечивает совместимость снизу вверх. Формат используется для синхронизации данных между программными продуктами самой фирмы «1С».

JSON (JavaScript Object Notation) – это текстовый формат обмена данными, базирующийся на языке JavaScript, который в сравнении с XML требует меньше памяти. В Платформе реализовано несколько методов для работы с этим форматом: средства потоковой записи и чтения (объект внутреннего языка **ЗаписьJSON**), средства сериализации в JSON примитивных типов и коллекций 1С:Предприятия с помощью глобальной процедуры **ЗаписатьJSON** и средства сериализации/десериализации прикладных типов 1С:Предприятия, поддерживающих XDTO сериализацию с помощью объекта языка **СериализаторXDTO**.

Для работы с HTML документами во встроенном языке реализованы объекты для последовательной работы (**ЗаписьHTML**, **ЧтениеHTML**), а так же для объектной работы в рамках модели DOM (**СписокУзловHTML**, **СписокЭлементовHTML** и др.). Документы могут быть сгенерированы программно, получены из файла, получены из Интернет ресурса, или загружены из макета типа HTML-документ.

Встроенный язык Платформы позволяет создавать ZIP-архивы (**ЗаписьZipФайла**, **ЧтениеZipФайла**), а также выполнять их декомпрессию, есть поддержка паролей, сжатый архив можно представить в виде двоичных данных, из архива можно извлекать только требуемые элементы (**ЭлементыZipФайла**, **ЭлементZipФайла**), для имён файлов используется кодировка UTF8.

Для работы с файлами в формате DBF (dBase III) в системе используется объект — **XBase (КоллекцияПолейXBase, ПолеXBase)**, который позволяет создавать новые файлы баз данных (БД), открывать существующие файлы для чтения или записи с возможностью изменения структуры БД (только для новых файлов) и создания или изменения файлов-индексов (**КоллекцияИндексовXBase, ИндексXBase, КлючXBase**).

Для работы с двоичными данными во встроенном языке Платформы используются, прежде всего, потоки (**Поток, ФайловыйПоток и ПотокВПамяти**), которые предназначены для последовательного чтения/записи двоичных данных произвольного объёма. Поток может быть создан непосредственно из фала (по имени файла) или из объекта **ДвоичныеДанные**. Помимо очевидных задач с обработкой и конвертацией данных объект **ДвоичныеДанные** позволяет наладить взаимодействие со специализированными устройствами. На базе потоков могут быть созданы объекты **ЧтениеДанных и ЗаписьДанных**, которые позволяют работать с потоками с учетом типов данных: записать или прочитать число, строку, дату и т.п. Для удобства работы с **ДвоичнымиДанными** ограниченного размера с произвольным доступом в оперативной памяти используется объект **БуферДвоичныхДанных**, который помимо представления данных в виде чисел, объединения или разделения буферов позволяет выполнять побитовые операции с целыми числами: И, ИЛИ, НЕ, ИНЕ, исключительное ИЛИ, а также побитовые операции сдвигов влево и вправо.

Automation-сервер 1С:Предприятия позволяет управлять приложением системы 1С:Предприятие 8 так, как бы это делал обычный пользователь, и предоставляет доступ ко всем свойствам и методам глобального контекста Платформы, а также имеет специфичные для режима Automation свойства и методы (**Connect** и **NewObject**). Для этого используется СОМ-объект с идентификатором **V82.Application**. Также следует отметить, что 1С:Предприятие 8 может выступать и в роли Automation клиента, для этого используется **СОМОбъект**.

Существует возможность работы с Платформой как с СОМ-объектом через внешнее соединение (V82.COMConnector), работа с которым отличается от режима Automation-сервер тем, что в случае внешнего соединения запускается небольшой внутрипроцессный СОМ-сервер, в котором нет доступа к функциональным возможностям Платформы связанным с организацией пользовательского интерфейса. Что позволяет реализовать более быструю установку соединения и более быстрое обращение к свойствам и методам объектов 1С:Предприятия 8, что в конечном счёте приводит к меньшему расходу ресурсов операционной системы.

Технология внешних компонентов позволяет создавать программы, которые будут динамически подключаться и расширять возможности 1С:Предприятие, создавая новые объекты. Для этого используется интерфейс системного программирования - Native API. Следует отметить, что внешняя компонента может порождать события, которые обрабатываются в предопределенной процедуре языка **ОбработкаВнешнегоСобытия**, что позволяет реализовывать асинхронный обмен данными. Кроме того, внешние компоненты могут добавлять свои страницы свойств в диалог параметров системы 1С:Предприятие 8.

Внешние источники данных позволяют работать с объектами внешних баз данных так, как будто они хранятся в самой информационной базе Платформы. Для этого используются ODBC-источники, доступные в операционных системах Windows и Linux, причем наиболее полная поддержка языка запросов Платформы реализована с СУБД Microsoft SQL Server, IBM DB2, PostgreSQL и Oracle Database.

HTTP-сервисы как объект конфигурации позволяют разработчику с помощью встроенного языка программирования сформировать тело и заголовки ответа на HTTP-запросы, что в сравнении с SOAP web-сервисами обеспечивает меньший объем передаваемых данных и создает меньшую вычислительную нагрузку. Методы идентифицируются в URL (Uniform Resource Locator - Унифицированный указатель ресурса), а параметры передаются или в URL или внутри запроса. Для каждого HTTP-сервиса создаётся один или несколько шаблонов, которые задают путь, по которому доступен сервис, а для каждого шаблона задаются один или несколько методов, выполняющих обработку данных, где определяются: требуемый HTTP метод и процедура обработки данных на встроенном языке программирования, работающая с объектами **HTTPСервисЗапрос** и **HTTPСервисОтвет**. Формат возвращаемых данных определяет программист. Функционирование HTTP-сервисов обеспечивается веб-сервером совместно с Платформой с помощью модуля расширения веб-сервера.

Web-сервисы реализуют поддержку протокола SOAP (Service Oriented Architecture Protocol), который является одним из современных стандартов интеграции информационных систем. Протокол SOAP ориентирован на гетерогенные информационные системы. Функционирование Web-сервисов обеспечивается веб-сервером совместно с Платформой с помощью модуля расширения веб-сервера. Для доступа к дру-

гим внешним системам из системы 1С:Предприятие по протоколу SOAP используется объект конфигурации – ссылка на веб-сервис (**WS-ссылка**), которая создается на базе опубликованного сторонним поставщиком WSDL (Web Services Description Language - язык описания веб-сервисов) описания веб-сервиса. Следует отдельно подчеркнуть, что Платформа поддерживает оптимизированную передачу двоичных данных по протоколу MTOM (Message Transmission Optimization Mechanism - механизм оптимизации передачи сообщений).

Интернет-почта (объект **ИнтернетПочта**) позволяет передавать и получать данные в различных форматах (текст, HTML, графика, двоичные данные и т. д.) посредством писем электронной почты по протоколам IMAP, POP3 и SMTP с возможностью использовать защищённые соединения SSL/TLS и STARTTLS, при этом существует возможность получать исходные тексты почтовых сообщений и программно указывать произвольный Content-type при отправке.

Платформа 1С:Предприятие 8 поддерживает два встроенных механизма обмена данными : механизм распределенных информационных баз, который позволяет выполнить интеграцию только с идентичными конфигурациями «1С:Предприятия 8», и универсальный механизм обмена данными, который может быть использован для создания гетерогенных распределенных систем. Встроенные механизмы обмена данными используют следующие объекты конфигурации: механизмы XDTO (XML Data Transfer Objects), планы обмена (описывают перечень узлов для интеграции и состав обмениваемых данных), средства XML-сериализации (выполняют преобразование объектов конфигурации в текстовое представление и обратно), а также средства чтения/записи XML-документов (выполняют формирование и разбор XML-документа). Встроенные механизмы обмена данными поддерживают он-лайн и офф-лайн режимы, позволяют создавать практически любую топологию узлов, выполняют передачу и, в случае необходимости, повторную передачу только измененной информации с контролем целостности данных и коллизий, выполняют компрессию и декомпрессию передаваемых данных, а также не требуют дополнительных больших затрат на разработку.

Платформа автоматически генерирует REST-интерфейс и публикует его на веб-сервере, который обеспечивает доступ ко всем объектам конфигурации по протоколу OData 3.0, что позволяет осуществлять CRUD операции над основными объектами конфигурации, кроме того через REST-интерфейс доступны некоторые методы встроенного языка. REST-интерфейс поддерживает форматы Atom/XML и JSON. Для взаимодействия с внешними REST сервисами из "1С:Предприятия 8" необходимо использовать встроенные в Платформу средства работы с HTTP.

Встроенные средства работы с HTTP (HTTPS с поддержкой TLS 1.0 — TLS1.2, ГОСТ 34.10-2012) клиента позволяют, устанавливать параметры HTTP-соединения, работать с HTTP-заголовками и телом запроса (с автоматическим перекодированием в требуемую кодировку), вызывать произвольный метод с использованием Basic-авторизации, авторизации с помощью учётной записи операционной системы или с помощью клиентского сертификата.

Встраиваемый веб-клиент может быть полезен для интеграции в корпоративные порталы, для чего выполняется публикация приложения веб-клиента (построено на технологиях DHTML и XMLHttpRequest) на веб-сервере (Apache или IIS). Доступ к веб-клиенту осуществляется по протоколам HTTP или HTTPS. Приложение веб-клиента для своей работы требует наличия интернет-браузера: Windows Internet Explorer,

Mozilla Firefox, Google Chrome или Safari. В веб-клиенте реализована поддержка технологии PWA (Progressive Web Apps), что позволяет сделать веб-приложение максимально похожим на обычное приложение и повысить скорость его работы. Следует отметить, что веб-клиент также ограниченно поддерживается на мобильных устройствах с ОС Android (Google Chrome) и на iPhone/iPad (Safari).

Взаимодействие с Платформой также возможно посредством протоколов FTP, FTPS и FTPES посредством объекта **FTPСоединение**; при этом поддерживаются активный или пассивный режимы работы ftp-соединения, базовая авторизация, изменение стандартного порта, работа через прокси-сервер посредством объекта **ИнтернетПрокси**, получение и передача файлов посредством объекта **FTPФайл**, создание каталогов, переименование файлов и каталогов, смена текущего каталога, получение информации о файлах и каталогах, установка защищенного соединения (TLS 1.0 — TLS1.2) и поддержка сертификатов сервера.

Архитектура предлагаемого решения. Наиболее интересным представляется вариант автоматического безопасного обмена данными между информационными системами и платформой 1С:Предприятие, показанный на рисунке.

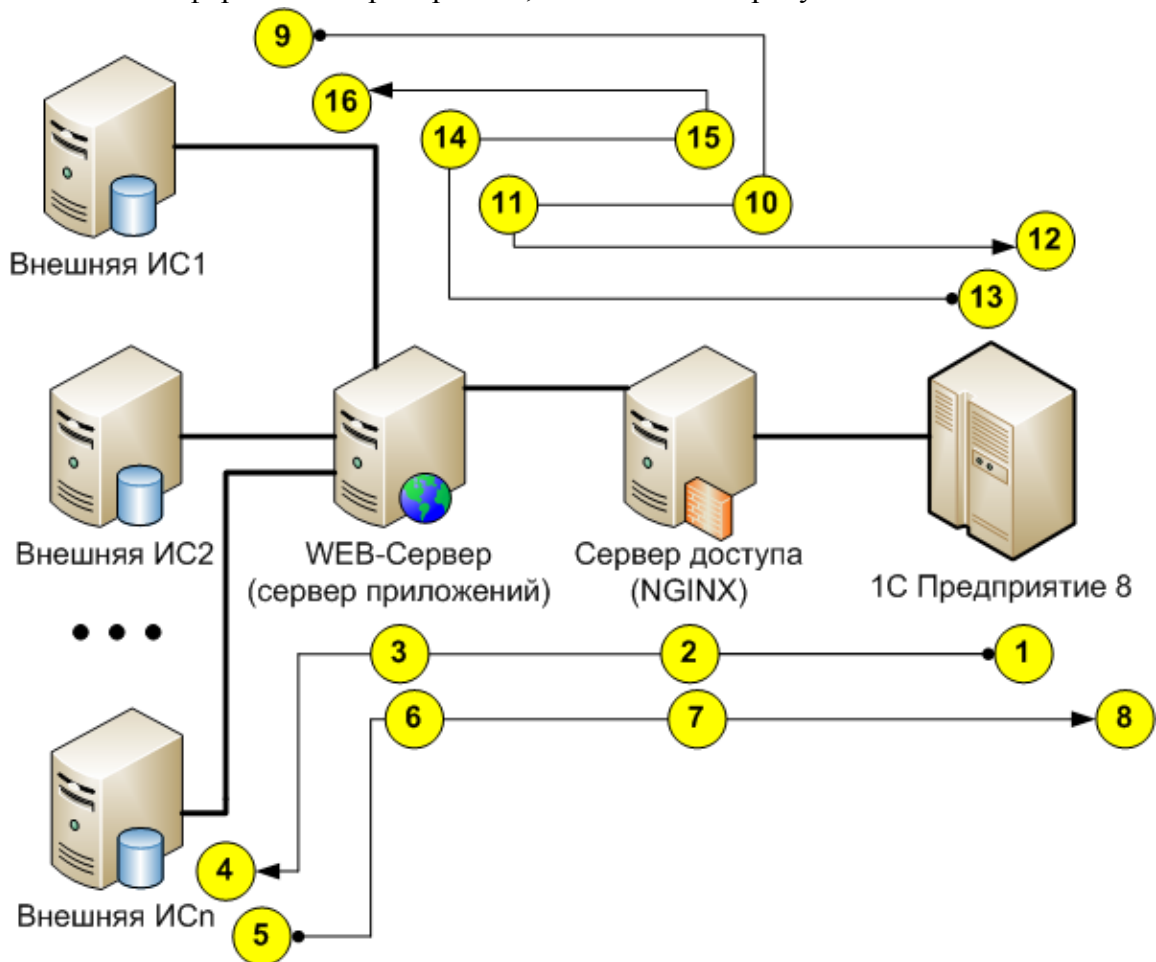


Рисунок – Архитектура организации взаимодействия

Для реализации межсистемного взаимодействия потребуется два дополнительных компонента: WEB-сервер (IIS, Apache) и сервер доступа (Nginx).

На WEB-сервере развернут SOAP сервис, реализованный, например, на языке C# [7-11], выполняющий задачи взаимодействия с внешними информационными системами.

ми, и задачи дополнительной обработки информации, реализация которых на Платформе представляет определённую сложность.

Сервер доступа предназначен для обеспечения информационной безопасности, здесь решаются такие задачи:

- 1) ограничение доступа по IP-адресу;
- 2) базовая авторизация;
- 3) базовая аутентификация;
- 4) шифрование трафика;
- 5) аутентификация по сертификату клиента;
- 6) проксирование и балансировка нагрузки;
- 7) модификация запроса (опционально).

WEB-сервер реализует следующие функции:

- 1) выполняет взаимодействие с внешними информационными системами (ИС1..ИСn);
- 2) обслуживает один SOAP-сервис для запросов со стороны 1С:Предприятия;
- 3) обслуживает второй SOAP-сервис для запросов со стороны информационных систем;
- 4) выполняет дополнительную обработку информации на производительном аппаратном обеспечении.

Существуют два основных сценария межсистемного взаимодействия:

- обращение Платформы к одной или нескольким информационным системам: ИС1..ИСn (шаги 1 -8);
- обращение одной из информационных систем (ИС1..ИСn) к серверу 1С:Предприятие (шаги 9 - 16).

Далее кратко рассмотрим базовые шаги сценариев взаимодействия.

Шаг 1. Создание запроса к SOAP-сервису, для этого на стороне Платформы лучше всего подходит объект конфигурации **WS-ссылка**.

Шаг 2. Авторизация, аутентификация, создание защищенного канала связи на базе протокола https и проксирование запроса к WEB-серверу.

Шаг 3. Получение запроса, его лексический разбор, выполнение действий пре-добработки и отправка запроса на сервера информационных систем.

Шаг 4. Получение запроса от WEB-сервера и его выполнение на стороне информационной системы.

Шаг 5. Отправка ответа от информационной системы к WEB-серверу.

Шаг 6. Получение ответа WEB-сервером на свой запрос и постобработка результатов запроса с последующей отправкой результата на сервер доступа.

Шаг 7. Получение ответа от WEB-сервера и передача его по ранее созданному защищенному каналу связи.

Шаг 8. Получение ответа на SOAP-запрос, лексический разбор результата и его постобработка.

Шаг 9. Создание запроса из информационной системы к SOAP-сервису на стороне Платформы, для этого лучше всего подходят объекты конфигурации для работы с HTTP-сервисом (требует меньше ресурсов), Web-сервисом (оптимальное соотношение функциональность-ресурсоёмкость) или REST протоколом OData 3.0 (присутствует избыточность заранее определённых операций).

Шаг 10. Авторизация, аутентификация, создание защищенного канала связи на базе протокола https и проксирование запроса к WEB-серверу.

Шаг 11. Получение запроса от WEB-сервера, его лексический разбор, выполнение действий предобработки и отправка запроса к 1С:Предприятие, используя модуль расширения веб-сервера, публикуемый Платформой.

Шаг 12. Получение запроса от WEB-сервера и его выполнение.

Шаг 13. Отправка ответа от Платформы к WEB-серверу.

Шаг 14. Получение ответа WEB-сервером на свой запрос и постобработка результатов запроса с последующей отправкой результата на сервер доступа.

Шаг 15. Получение ответа от WEB-сервера и передача его по ранее созданному защищенному каналу связи.

Шаг 16. Получение ответа от Платформы, лексический разбор результата и его постобработка.

Заключение. Рассмотренный вариант автоматического безопасного обмена данными между информационными системами и платформой 1С:Предприятие 8 хорошо себя зарекомендовал на практике в ОАО «Кыргызтелеком» с позиций информационной безопасности, производительности, хорошей масштабируемости, кроме того, возможность реализации обработки данных на стороне WEB-сервера с привлечением языка программирования С# существенно расширяет функциональные возможности платформы 1С:Предприятие 8.

Литература

1. Хрусталева Е.Ю. Технологии интеграции 1С:Предприятия 8.3. – М.: 1С-Паблишинг, 2020. – 503 с.
2. Способы интеграции с 1С. <https://habr.com/ru/company/1c/blog/308420/> (Дата обращения: 07.09.2020).
3. Бояркин В.Э., Филатов А.И. 1С: Предприятие 8. Конвертация данных: обмен данными между прикладными решениями. – М.: 1С-Паблишинг, 2008. – 179 с.
4. Архитектура платформы 1С:Предприятие (версия 8.3.18). Интеграция. <https://v8.1c.ru/platforma/integraciya/> (Дата обращения: 07.09.2020).
5. Обмен данными и интеграция. <https://v8.1c.ru/tekhnologii/obmen-dannymi-i-integratsiya/mekhanizmy-platformy/> (Дата обращения: 07.09.2020).
6. Хрусталева Е.Ю. Облачные технологии «1С:Предприятия». – М.: 1С-Паблишинг, 2016. – 217 с.
7. Хейлсберг А., Голд П., Торгерсен М., Вилтамут С. Язык программирования С#. Включая С# 4.0. – СПб: Питер, 2012. – 784 с.
8. Джепикс Ф., Троелсен Э. Язык программирования С# 7 и платформы .NET и .NET Core. – М: Вильямс, 2018. – 1328 с.
9. Рихтер Д. CLR via С#. Программирование на платформе Microsoft.NET Framework 4.5 на языке С#. – СПб: Питер, 2017. – 896 с.
10. Скит Дж. С# для профессионалов. Тонкости программирования. – М: Вильямс, 2017. – 608 с.
11. Прайс М. С# 7 и .NET Core. Кросс-платформенная разработка для профессионалов. – СПб: Питер, 2018. – 640 с.

УДК 004.75

В. Гайдамако, dolpha@gmail.com

Институт машиноведения и автоматики НАН КР, Бишкек

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МНОГОУРОВНЕВОГО ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСЧИСЛЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Оценка производительности приложений и облачных сервисов крайне важна как во время проектирования приложения или сервиса – для разработчика, так и во время эксплуатации – для провайдера и клиента. В статье рассмотрен подход к оценке производительности трехуровневого веб-приложения с помощью аналитического моделирования на основе исчисления реального времени. Приведен пример построения ИРВ-модели, вычислены суммарная задержка на всех компонентах и задержка, получаемая с помощью свертки мин-плюс алгебры.

Ключевые слова: оценка производительности, аналитическое моделирование, модульный анализ производительности, исчисление реального времени.

Введение

Аналитическое моделирование является наименее затратным способом оценки производительности системы на ранних этапах проектирования. Наиболее распространенными подходами в аналитическом моделировании являются теория массового обслуживания, теория управления, сетевое исчисление (network calculus), стохастические сети с вознаграждениями [1,2]. В любом случае аналитическое моделирование должно обеспечить адекватность модели моделируемой системе и короткое время анализа так, чтобы этап моделирования стал частью процесса разработки системы.

Исчисление реального времени (ИРВ) используется для определения и предсказания соблюдения жестких ограничений времени исполнения в системах реального времени и встроенных системах. ИРВ основано на сетевом исчислении [3,4], которое было разработано для анализа прохождения потоков данных через сеть и часто используется для оптимизации параметров архитектуры систем обработки потоков пакетов. В работе [5] обосновано применение методов исчисления реального времени к оценке времени ответа приложений для облачных систем, а также возможности моделирования облачной среды и ее компонент – рабочей нагрузки, обработки задач, выделения ресурсов для виртуальных машин (ВМ), взаимного влияния (интерференции) ВМ на производительность, управления автономными ресурсами, консолидации серверов, а также стратегии масштабирования облачных вычислений (горизонтального и / или вертикального).

Моделируемое приложение. Рассмотрим пример трехуровневого веб-приложения, включающего уровень презентации (Р) – веб-сервер, уровень приложения (В) – сервер приложений и уровень данных (D) – сервер баз данных (рис.1). В облачных системах все эти сервера существуют в нескольких экземплярах и являются

программными, так как работают на виртуальных машинах. Цель моделирования – предсказать время ответа для веб-приложения и определить, будет ли оно меньше дедлайна (для веб-приложений обычно 2 с) при известных характеристиках работы изолированного приложения на каждом уровне.

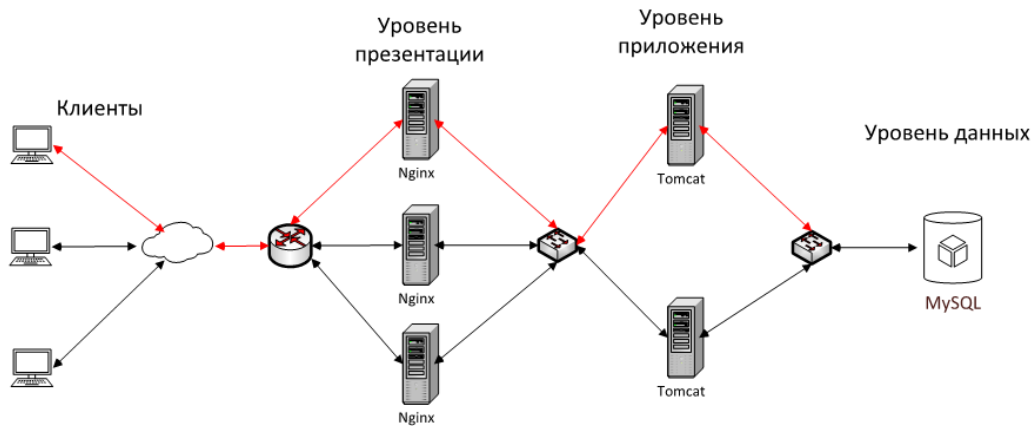


Рисунок 1 – Трехуровневое веб-приложение

При обработке запроса выполняются следующие задачи: 1) запрос пользователя с веб-сервера пересылается на сервер приложений, 2) сервер приложений посылает запрос к серверу баз данных, 3) сервер баз данных выполняет запрос или серверную процедуру и пересылает результат серверу приложений, 4) сервер приложений получает результат запроса, формирует ответ и пересылает его на веб-сервер для 5) презентации пользователю. Так как веб-сервер работает с созданием канала (statefull), запросы от пользователя и презентация результатов производятся одной виртуальной машиной (ВМ). Запрос пользователя проходит через виртуальные машины ВМ1, ВМ2, ВМ3, затем обратно к ВМ2, ВМ1, пользователь видит результат в своем браузере (рис.2) [5].

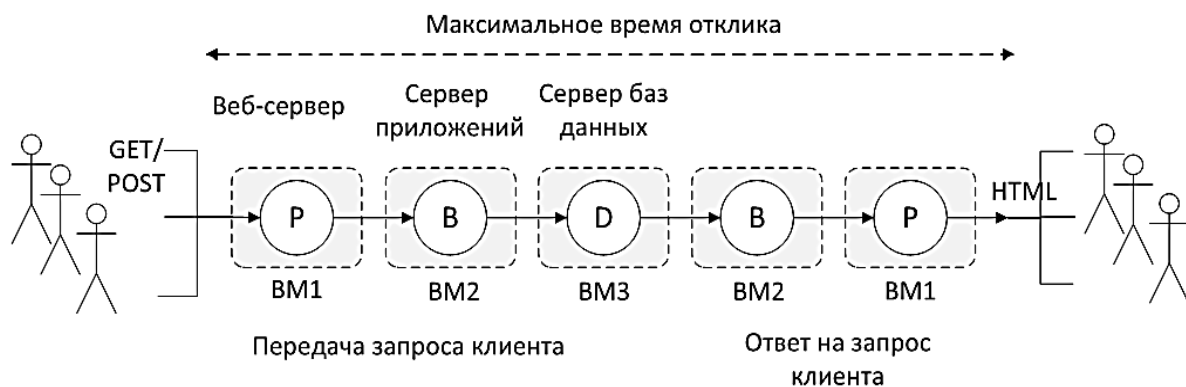


Рисунок 2 – Обработка запроса пользователя веб-приложением

Модульный анализ производительности с использованием исчисления реального времени

Модульный анализ производительности представлен в [4-7]. Для проведения модульного анализа производительности с ИРВ (МА-ИРВ) необходимо построить абстрактную модель производительности, включающую модель нагрузки и модель обслуживания. Абстрактная модель должна включать сведения о доступных вычислительных и коммуникационных ресурсах, о приложениях (или выделенных программных/аппаратных компонентах), а также об архитектуре самой системы.

Реальная система представляется в виде абстрактных аналитических компонент (ИРВ-компоненты), поведение которых может быть детерминированным или недетерминированным [4-7]. ИРВ принадлежит к классу так называемых детерминированных теорий массового обслуживания. Оно детерминировано в том смысле, что всегда можно найти жесткие верхние и нижние границы показателей производительности (задержки). Это отличает его от класса методов недетерминированного, или стохастического анализа, таких как теория массового обслуживания (ТМО) и теория управления, для которых жесткие гарантии в целом предоставлены быть не могут.

Детерминированные теории массового обслуживания, в частности, МА-ИРВ, позволяют определять жесткие границы для показателей производительности, оценить наихудший сценарий, то есть максимальную задержку как для отдельного компонента, так и для всех компонентов, через которые проходит поток событий [5,6].

Но ИРВ не позволяет моделировать среднее время отклика. Для этой цели лучше использовать стохастические подходы, например, ТМО. Вероятностный анализ на основе ИРВ, описанный в [5], может быть полезен для получения гарантий мягкого реального времени в облачной инфраструктуре. В то же время, в отличие от ИРВ, средняя величина задержки, используемая в анализе на основе ТМО, не позволяет получить никаких гарантий времени отклика.

Таким образом, трехуровневое веб-приложение можно смоделировать в виде пяти ИРВ-компонент (очереди). Входной поток событий представляется конечным числом типов событий – это HTTP-запросы браузера клиента к веб-серверу. Далее на веб-сервере входной поток HTTP-запросов преобразуется в поток запросов от веб-сервера к серверу приложений. Сервер приложений преобразует поток запросов от веб-сервера в поток запросов к базам данных. Сервер баз данных преобразует поток запросов от сервера приложений в поток ответа на запрос. Входной поток представляется кривыми поступления, причем входной поток на ресурсе (ВМ) преобразуется в выходной поток, который, в свою очередь, будет являться входным потоком для следующей ВМ [5].

Для инфраструктуры рис.2 исчисление реального времени может быть применено для аналитического определения максимального времени отклика приложения и максимальной длины очереди на обслуживание с учетом дисциплины обслуживания на различных ресурсах обработки. Среднее время обработки с помощью ИРВ не определить.

Функции и кривые поступления и обслуживания

Определение 1. (Функции поступления и обслуживания). Поток событий может быть описан функцией поступления R , где $R(t)$ означает количество событий, которые произошли (поступили) в интервал времени $[0, t)$.

Вычислительные или коммуникационные ресурсы могут быть описаны функцией обслуживания C , где $C(t)$ означает количество событий, которые были обслужены в интервал времени $[0, t)$ [5].

Определение 2. (Кривые поступления и обслуживания), Верхняя и нижняя кривые $\alpha^u(\Delta)$, $\alpha^l(\Delta) \in \mathbf{R}_{\geq 0}$ ($\mathbf{R}$ – множество действительных чисел) поступления функции поступления $R(t)$ удовлетворяют следующему неравенству:

$$\alpha^l(t-s) \leq R(t) - R(s) \leq \alpha^u(t-s), \forall s, t: 0 \leq t$$

Верхняя и нижняя кривые обслуживания

$$\beta^u(\Delta), \beta^l(\Delta) \in \mathbf{R}_{\geq 0}$$

функции обслуживания $C(t)$ удовлетворяют неравенству:

$$\beta^l(t-s) \leq C(t) - C(s) \leq \beta^u(t-s), \forall s, t: 0 \leq t \text{ [5].}$$

Верхняя и нижняя кривые поступления обобщают и описывают все возможные трассировки потока событий (спорадические, периодические, периодические с джиттером), их можно получить из трассировок реальных серверов или имитационных моделей на временных отрезках конечной длины, например, методом скользящего окна. Кривые поступления также могут рассматриваться как количество запросов ресурса в интервал времени. Кривые обслуживания представляют минимальное и максимальное количество ресурсов, доступных в интервале времени, и могут быть получены из характеристик ресурса, аналитически или путем проведения измерений.

Конкретные и абстрактные компоненты системы

Поток событий в системах реального времени, как и в нашем примере, обычно проходит через цепочку ресурсов или выполняет цепь задач, а каждая задача выполняется на отдельном ресурсе. Входной поток событий $R(t)$ трансформируется конкретным компонентом, доступность которого описывается функцией обслуживания $C(t)$, в выходной поток $R'(t)$, а доступные ресурсы теперь могут быть описаны функцией $C'(t)$. Абстрактный компонент ИРВ трансформирует входные кривые поступления α^u и обслуживания β^l в выходные кривые α^u и β^l (рис.3).

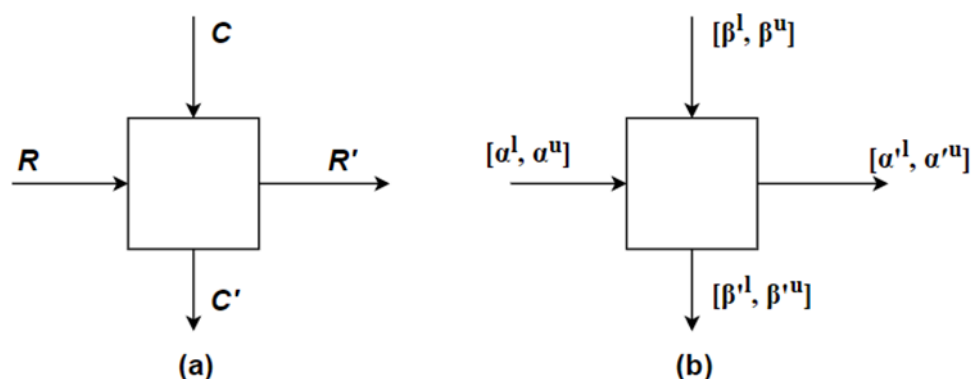


Рисунок 3 – Трансформация входных функций в выходные; (а) Конкретные функции поступления $R(t)$ и обслуживания $C(t)$ в конкретном обрабатывающем ресурсе трансформируются в выходные функции R' и C' ; (б) Абстрактные кривые поступления α^u и обслуживания β^l абстрактным компонентом (ресурс ИРВ) трансформируются в выходные кривые α^u и β^l .

Соотношение между входными и выходными кривыми определяется характеристиками компонента (семантикой обработки). Например, конкретный компонент, который при поступлении события для его обработки запускает полностью вытесняемую задачу, дисциплина планирования активных задач – очередь (FIFO), используется «жадная» стратегия исполнения, может быть описан уравнениями min-плюс и max-плюс алгебры [6]:

$$\alpha^u = \min \{(\alpha^u \otimes \beta^u) \oslash \beta^l, \beta^u\},$$

$$\alpha^l = \min \{(\alpha^l \oslash \beta^u) \otimes \beta^l, \beta^l\},$$

$$\beta^u = (\beta^u - \alpha^l) \overline{\oslash} 0,$$

$\beta^l = (\beta^l - \alpha^u) \overline{\otimes} 0$, где операторы $\otimes$, $\oslash$, означают min-plus свертку (convolution) и обратную min-plus свертку (deconvolution) [4-8].

$$(f \otimes g)(\Delta) = \inf_{0 \leq \lambda \leq \Delta} \{f(\Delta - \lambda) + g(\lambda)\}$$

$$(f \oslash g)(\Delta) = \sup_{\lambda \geq 0} \{f(\Delta + \lambda) - g(\lambda)\} \quad .$$

Символы свертки и обратной свертки max-plus алгебры дополняются чертой сверху [4–8].

$$(f \overline{\otimes} g)(\Delta) = \sup_{0 \leq \lambda \leq \Delta} \{f(\Delta - \lambda) + g(\lambda)\} \quad ,$$

$$(f \overline{\oslash} g)(\Delta) = \inf_{\lambda \geq 0} \{f(\Delta + \lambda) - g(\lambda)\} \quad .$$

Описанное поведение в системах реального времени и встроенных системах называют компонентом с фиксированными приоритетами. Будем считать, что поведение веб-серверов, серверов приложений и серверов баз данных вполне соответствует описанному. Для компонент с другим поведением потребуются другие уравнения [6].

Если поток событий проходит через множественные ресурсы с минимальными кривыми обслуживания $\beta_1^l, \beta_2^l, \beta_3^l, \dots, \beta_n^l$ с использованием дисциплины очереди (FIFO), минимальная кривая обслуживания этого потока событий может быть вычислена с помощью итеративной свертки [5,6]:

$$\beta^l = (((\beta_1^l \otimes \beta_2^l) \otimes \beta_3^l) \otimes \dots) \otimes \beta_n^l.$$

Таким образом, при моделировании веб-приложения необходимо задать максимальную кривую запросов и минимальные кривые обслуживания для каждой из ИРВ-компонент и вычислить суммарную кривую обслуживания. Максимальная задержка будет выражена максимальным горизонтальным расстоянием между максимальной кривой поступления и минимальной кривой обслуживания, а максимальное количество запросов в очереди – максимальным вертикальным расстоянием.

Построение абстрактной модели ИРВ. На рис.2 приведена декомпозиция процедуры обслуживания запроса пользователя, представим упрощенную абстрактную модель ИРВ в виде последовательности задач, выполняющихся на виртуальных серверах (рис. 4).

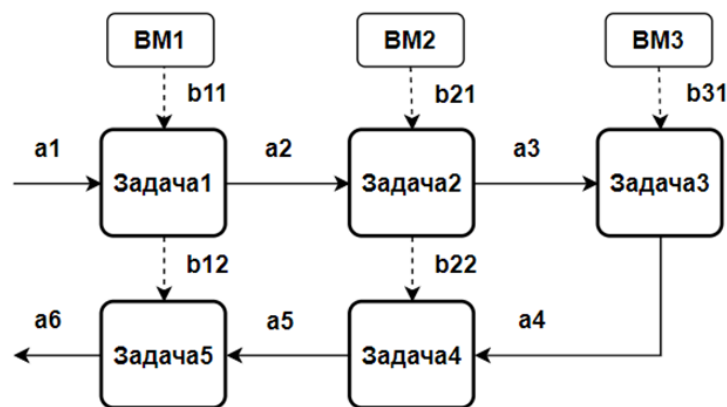


Рисунок 4 – ИВЛ-модель трехуровневого веб-приложения

Каждый компонент имеет свои входные и выходные кривые поступления и обслуживания. Поток данных в модели ИРВ изображают горизонтально, использование ресурсов – вертикально. Для простоты в рассматриваемой модели

предполагается, что задачи имеют одинаковый приоритет. Моделирование проводится в MATLAB с помощью пакета RTC Toolbox [8].

Модульный анализ производительности в RTC Toolbox

Для проведения анализа модели, представленной на рис. 4, прежде всего нужно построить кривые поступления и обслуживания [8]. На данном этапе не будем рассматривать линии связи и устройства коммутации, будем считать, что запросы и ответы от серверов отправляются и принимаются мгновенно независимо от размера сообщения, хотя, разумеется, на практике это не так, и нужно модулировать линии коммутации.

Рассмотрим поведение системы на интервале 100 мс.

Кривые обслуживания. Строим кривые обслуживания с помощью функции `rtcfs`.

```
b11 = rtcfs(1);
b21 = rtcfs(2);
b31 = rtcfs(2);
```

Функция `rtcfs(B)` создает набор кривых обслуживания, соответствующих полностью доступному ресурсу с полосой пропускания B (для процессора это скорость обработки) [8]. Предполагаем, что для диспетчеризации используется дисциплина FIFO, задача поступает на процессор и освобождает его после завершения. Кривые, которые строятся – это всегда пара, массив из двух кривых – верхней (индекс 1) и нижней (индекс 2). Функции `rtcfsu` и `rtcfsl` создают верхнюю и нижнюю кривые обслуживания для такого ресурса. Например, `b11(1)` – верхняя кривая обслуживания, то есть максимально доступные ресурсы сервера VM1, `b11(2)` – минимальные доступные ресурсы.

Кривые поступления. Построим график функции и кривые поступления (прибытия). Допустим, из логов реального сервера на окне 100 мс получено, что запросы от пользователей поступили в 0, 5, 8, 11, 15, 18, 21, 25, 27, 31, 33, 35, 39, 40, 45, 48, 54, 57, 61, 66, 69, 72, 75, 78, 83, 86, 88, 90, 94, 96, 100. Задаем график функции прибытия:

```
R=rtccurve([ [0,1,0]; [5,2,0]; [8,3,0]; [11,4,0]; [15,5,0]; [18,6,0]; [21,7,0]; [25,8,0]; [27,9,0]; [31,10,0]; [33,11,0]; [35,12,0]; [39,13,0]; [40,14,0]; [45,15,0]; [48,16,0]; [54,17,0]; [57,18,0]; [61,19,0]; [66,20,0]; [69,21,0]; [72,22,0]; [75,23,0]; [78,24,0]; [83,25,0]; [86,26,0]; [88,27,0]; [90,28,0]; [94,29,0]; [96,30,0]; [100,31,0]; ] );
```

Теперь необходимо задать кривые поступления в виде периодической функции `rtcpjd(p, j, d)`, где p – период, j – джиттер, d – минимальная временная дистанция между событиями. Чем выше джиттер, тем больше расстояние между верхней и нижней кривыми поступления:

```
a=rtcpjd(3, 10, 0);
```

Для проверки соответствия смоделированных кривых поступления функции поступления выполняется отбратная мин-свертка кривой, описывающей поток запросов, кривая свертки нигде не должна быть выше верхней кривой поступления.

```
S = rtcmindeconv(R, R);
```

Кривые можно вывести с помощью команды

```
>> rtcplot(R, 'r', a, 'r--', b11, 'g', b21, 'g:', b31, 'g--', 100);
```

Рассчитаем выходной поток запросов, кривую обслуживания для ресурсов, не занятых обработкой запросов, максимальную задержку и размер буфера с помощью

функции `rtcgpc` для компонентов GPC (General Processing Component, Компонент общей обработки) (рис.5).

Сначала рассчитаем задержки для каждой задачи в цепочке и суммируем их.

Задача 1. Веб-сервер принимает от пользователя запрос и пересылает его серверу приложений.

```
e1=2; (здесь указывается худшее ожидаемое время выполнения)
[a2 b12 del1 buf1] = rtcgpc(a, b11, e1);
disp(['delay = ', num2str(del1), '; buffer = ', num2str(buf1)]);
```

Получаем `delay = 4; buffer = 4.`

Если выполнение задачи будет занимать 2 мс

```
delay = 8; buffer = 4
```

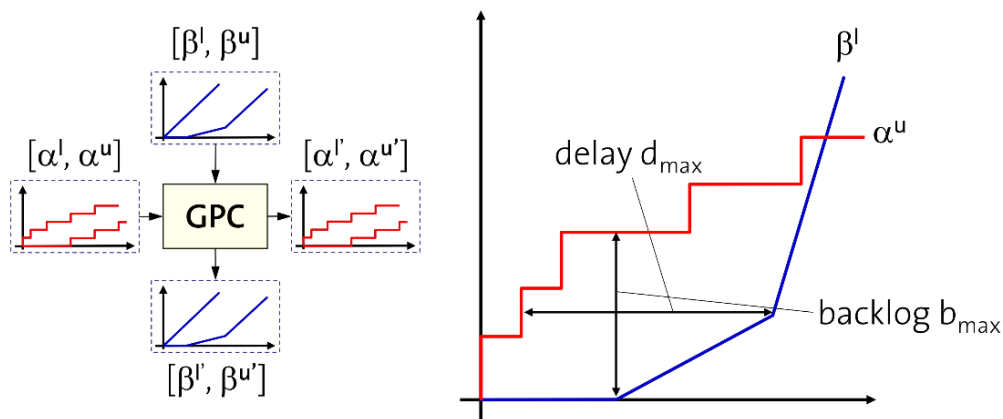


Рисунок 5 – Компонент общей обработки и графическое представление максимальной задержки (delay) и максимальной очереди (backlog) [8]

Задача 2. Сервер приложений формирует запросы к базе данных и пересылает их серверу, `e2=3;`

```
[a3 b22 del2 buf2] = rtcgpc(a2, b21, e2);
delay = 1.5; buffer = 1
```

Задача 3. Сервер баз данных формирует ответ на запрос сервера приложений.

```
e3=4;
[a4 b32 del3 buf3] = rtcgpc(a3, b31, e3);
disp(['delay = ', num2str(del3), '; buffer = ', num2str(buf3)]);
delay = 2; buffer = 1
```

Задача 4. Сервер приложений получает ответ от сервера баз данных и пересылает его веб-серверу.

```
e4=2;
[a5 b23 del4 buf4] = rtcgpc(a4, b22, e4);
delay = 13; buffer = 6
```

Задача 5. Веб-сервер получает ответ от сервера приложений и пересылает результат на браузер клиента.

```
e5=1;
[a6 b13 del5 buf5] = rtcgpc(a5, b12, e5);
disp(['delay = ', num2str(del5), '; buffer = ', num2str(buf5)]);
delay = 40; buffer = 14
```

Суммарная задержка:

$del = del1 + del2 + del3 + del4 + del5 = 64.5 \text{ мс}$

Заметим, что если время выполнения задачи 5 будет равно 2, получим

$delay = Inf; \text{ buffer} = Inf$

Это означает, что веб-сервер не сможет обработать все приходящие запросы, и они будут накапливаться «бесконечно», то есть нужно подключать второй сервер. Результат «бесконечность» на любом из серверов означает, что необходимо увеличение количества серверов данного типа.

Суммарную задержку можно посчитать и другим способом:

$delay_add = rtcdel(a, b11, e1) + rtcdel(a2, b21, e2) +$
 $rtcdel(a3, b31, e3) + rtcdel(a4, b22, e4) + rtcdel(a5, b12, e5);$

Результат – тот же, 64.5.

Теперь проведем расчет через свертку кривых обслуживания.

$delay_opt = rtcdel(a, b11, e1, b21, e2, b31, e3, b22, e4, b12, e5);$
 $delay = 46.5$

Результаты показывают, что суммирование задержек на компонентах дает более пессимистичную оценку.

Зададим кривые обслуживания для ресурса с разделением времени – TDMA (Time Division Multiple Access) для задач той же продолжительности. Функция $rtctdma(S, C, B)$ создает кривые обслуживания для ресурсной модели TDMA со слотом длины S , TDMA циклом C и полосой пропускания B . С ресурсами процессоров, как в первом случае, при обслуживании в порядке поступления с полностью доступным процессором (1, 2, 4) сразу получаем «бесконечность»:

$cpu1 = 2;$
 $cpu2 = 4;$
 $cpu3 = 4;$

$b11 = rtctdma(2, 3, cpu1);$
 $b21 = rtctdma(2, 3, cpu2);$
 $b31 = rtctdma(4, 6, cpu3);$

$delay1 = 6; \text{ buffer} = 4$
 $delay2 = 1.75; \text{ buffer} = 2$
 $delay3 = 4; \text{ buffer} = 3$
 $delay4 = 9; \text{ buffer} = 6$
 $delay5 = 30.5; \text{ buffer} = 11$

Суммарная задержка (сумма задержек на компонентах) : 51.25

Суммарная задержка (оптимизированная задержка) : 33.75

Расчеты для обслуживания в порядке поступления с полностью доступным процессором и скоростями процессоров (2, 4, 4) дают результат:

$delay1 = 4; \text{ buffer} = 4$
 $delay2 = 0.75; \text{ buffer} = 1$
 $delay3 = 1; \text{ buffer} = 1$
 $delay4 = 4; \text{ buffer} = 4$
 $delay5 = 11; \text{ buffer} = 7$

Суммарная задержка (сумма задержек на компонентах) : 20.75

Суммарная задержка (оптимизированная, результат свертки) : 16.75

Задание кривых обслуживания для TDMA с длиной слота, равной периоду, моделирует систему, аналогичную системе с полностью доступным процессором

```
b11 = rtctdma(2,2,cpu1);  
b21 = rtctdma(2,2,cpu2);  
b31 = rtctdma(4,4,cpu3);
```

Результат аналогичен предыдущему.

Для компонентов с разными моделями обслуживания:

```
b11 = rtcfs(cpu1);  
b21 = rtctdma(2,3,cpu2);  
b31 = rtctdma(4,6,cpu3);  
delay1 = 4; buffer = 4  
delay2 = 2.5; buffer = 3  
delay3 = 5.25; buffer = 4  
delay4 = 9.25; buffer = 7  
delay5 = 13.5; buffer = 10
```

Суммарная задержка (сумма задержек на компонентах): 34.5

Суммарная задержка (оптимизированная, результат свертки): 26

В более детальных моделях необходимо учитывать длину и количество передаваемых сообщений, характеристики линий передачи и сетевого оборудования. Для моделирования процесса предоставления ВМ предусматриваются периоды простоя. Чтобы смоделировать взаимное влияние ВМ, работающих на одном физическом сервере, на производительность (интерференция ВМ), в ИРВ-модель можно добавить дополнительный логический компонент производительности (недетерминированный компонент ИРВ). В частности, кривая обслуживания этого компонента позволит моделировать недетерминированный доступ к общим ресурсам в виртуализированных средах. Для анализа производительности этот абстрактный компонент должен быть правильно откалиброван. Должно быть выяснено количество ВМ на физическом сервере, при котором взаимное влияние является приемлемым. Это может быть определено аналитически с использованием, например, теории массового обслуживания или измерено на реальных серверах [5].

Параметры компонент могут определяться в процессе мониторинга облачной системы [1,2,9,10] и использоваться для управления инфраструктурой облачной системы и автобалансировки на основе ИРВ. Изменение длины очереди или задержки, вычисленных на базе данных мониторинга, будет сигналом о необходимости изменения количества экземпляров серверов, миграции ВМ на другие физические сервера, в другие центры обработки данных (ЦОД) или принятия других решений по горизонтальному или вертикальному масштабированию.

Заключение

Приведенные примеры моделирования трехуровневого веб-приложения, показывают, что ИРВ применимо для аналитической оценки производительности приложений, причем к компонентам построенной ИРВ-модели могут применяться разные значения параметров, отражающих как характеристики виртуальных серверов, так и дисциплину обслуживания. Расчеты проводятся относительно быстро, что позволяет применять ИРВ как при проектировании инфраструктуры приложения или облачного сервиса, так и для мониторинга и автобалансировки. Рассмотренная модель приложения является упрощенной, в ней не учтено количество и размеры сообщений, передаваемых между серверами, а также характеристики линий связи, в более подробных рабочих моделях это должно учитываться. Также при использовании

нескольких экземпляров серверов каждого типа должны учитываться накладные расходы на перенаправление входных потоков событий на выбранный сервер. ИРВ-моделирование также применимо к облачным системам, предоставляющим «как сервис» датчики, актуаторы или другие устройства. Многие процессы в таких системах являются строго периодическими с дедлайном, взаимодействие с устройствами производится в реальном времени и при проектировании инфраструктуры и выборе оборудования должны учитываться требования жесткого реального времени.

Литература

1. QiangDuan, Cloud service performance evaluation: status, challenges, and opportunities – a survey from the system modeling perspective. // Digital Communications and Networks, Volume 3, Issue 2, May 2017, Pages 101-111. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352864816301456>, (дата обращения 25.10.2020)
2. Гайдамако В.В. Обзор методов мониторинга и оценки производительности компонент облачной информационно-измерительной системы // Проблемы автоматизации и управления, №2 (37), 2019, с. 26–38
3. Росляков А. В., Лысиков А. А. Применение теории стохастических сетевых исчислений к анализу характеристик VPN. // T-Comm. 2013, №7, с.106-109
4. Philipp Rümmer. A Short Introduction to Real-time Calculus. // Uppsala University 2014. URL: <http://www.it.uu.se/edu/course/homepage/realtid/ht14/schedule/workload-models-2.pdf> / (дата обращения 25.10.2020)
5. Гарай Г.Р., Черных А., Дроздов А.Ю. Сравнительный анализ методов оценки производительности многоуровневых облачных приложений. Труды ИСП РАН, том 27, вып. 6, 2015 г., стр. 199-224. DOI: 10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-14.
6. E. Wandeler, L.Thiele, M.Verhoef. P.Lieverse. System architecture evaluation using modular performance analysis: a case study // Computer Science International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2006, Pages 649–667.
7. W. Haid, S. Perathoner, N. Stoimenov, L.Thiele. Modular Performance Analysis with Real-Time Calculus. // PhD Course on Automated Formal Methods for Embedded Systems DTU – Lyngby, Denmark – June 11, 2007. URL: http://www2.imm.dtu.dk/courses/02917/MPA_RTC_DTU07.pdf / (дата обращения 25.10.2020).
8. RTC Toolbox Tutorial. URL:<https://www.mpa.ethz.ch/static/Tutorial.html> / (дата обращения 25.10.2020).
9. G. Aceto, A. Botta, W. De Donato, and A. Pescapè, "Cloud monitoring: A survey" // Computer Networks, vol. 57, pp. 2093-2115, 2013.
10. Cloud monitoring guide. / URL:<https://docs.microsoft.com/en-us/azure/cloud-adoption-framework/manage/monitor/>(дата обращения 25.10.2020).

УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ

УДК 621.317.384:621.316.06

**А.Р. Айдарова, Ч.М. Бузурманкулова, А.Б. Калмурзаев,
Н.А. Суюнтбекова**

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова
aidarova_2010@mail.ru, buzurmankulova79@mail.ru, apsi_kg@mail.ru

ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРОСЕТИ ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ

В статье предложено описание экспериментальной установки с возможностью управления работой электроприемников (ЭП) в различных режимах работы нейтрали электросети. Такая возможность позволяет оценивать влияние режимов работы на потери электроэнергии с помощью физической модели элементов электросети. Кроме того, рассмотрен способ измерения потерь электроэнергии в таких элементах сети. Дано обоснование возможности использования диода для модельного представления воздушного промежутка (фаза – земля) при возникновении замыкания повреждённой фазы с землей в сетях с изолированной нейтралью. В качестве примера рассмотрено решение задачи по моделированию групповой электрической нагрузки, в соответствии с которым программно управляются (подключаются или отключаются) ЭП с применением функционального модуля КАМАК. Исходными данными для моделирования индивидуальных графиков ЭП и группового как суммы индивидуальных являются: количество ЭП; номинальные мощности этих ЭП; минимальные и максимальные длительности непрерывной работы каждого ЭП между паузами и законы распределения этих случайных величин; минимальные и максимальные длительности пауз ЭП и законы их распределения; общая длительность моделирования. Приведена блок-схема моделирующего алгоритма.

Ключевые слова: потери мощности; качество электроэнергии; система электроснабжения; экспериментальная установка с элементами АСНИ

Введение. В процессе передачи электрической энергии по электрическим сетям неизбежны ее потери, которые приводят к дополнительному расходованию энергоресурсов на электростанциях.

Поэтому, несмотря на то, что основные факторы, определяющие потери в электрических сетях, хорошо известны и исследованы, необходимы тщательные анализы всех составляющих потерь и причин их появления.

Использование новых multifunctional средств моделирования и измерения параметров электрических режимов позволит глубже исследовать влияние дополнительных факторов, которыми ранее при анализе пренебрегали.

К числу дополнительных и малоисследованных факторов относится низкое качество электроэнергии и в первую очередь хаотические составляющие токов и напряжений, а также их несинусоидальность и несимметрия. Это в первую очередь связано с увеличением количества и повышением установленной мощности электроприемников с нелинейным и несимметричным характером нагрузок.

В настоящее время нет достаточно обоснованных рекомендаций по проведению качественного анализа режимов и потерь электроэнергии [1-3]. Поэтому исследовательские работы, связанные с решением выше отмеченной проблемы, и разработка инструментария для экспериментального исследования (для исследования влияния дополнительных и малоисследованных факторов на потери) являются актуальными и имеют несомненно теоретический и практический интерес.

Постановка задачи. В электрических сетях, где показатели качества электрической энергии не находятся в установленных стандартом границах, необходимы дополнительные исследования, направленные на уточнение степени влияния на потери таких явлений, как накладываются на гармонические процессы хаотические колебания при присутствии интергармонических составляющих [2].

Проведение дополнительных исследований более рационально на экспериментальных установках, где у исследователя есть возможность управления режимами работы ЭП и качеством электроэнергии (РРЭП и КЭ), что позволяет оценивать влияние РРЭП и КЭ на потери электроэнергии с помощью физической модели элементов электросети, тогда как при натурных испытаниях у исследователя ограничены возможности по варьированию разными факторами, влияющими на РРЭП и КЭ, из-за невозможности вмешиваться в технологические процессы производства.

Существующие способы измерения технических потерь основаны на измерении входящей в элемент сети электроэнергии, а также отходящих от него ее значений. При этом разность этих энергий определяет значение искомой потери. Однако используемые приборы калиброваны при чисто синусоидальном токе и напряжении [4], поэтому такой способ дает большую погрешность.

Микропроцессорные системы имеют свои недостатки, которые связаны с дискретизацией входного сигнала, когда входной сигнал относится к нестационарным случайным процессам, тогда возможны ошибки маскировки частот [5].

В статье поставлена задача разработки лабораторной установки (ЛУ) с элементами автоматизированной системы научных исследований (АСНИ), с помощью которой изучалось бы влияние РРЭП и КЭ на потери электроэнергии на физических моделях элементов электрической сети с применением измерительного прибора, основанного на калориметрическом способе измерения. Разработанная лабораторная установка с элементами АСНИ является дальнейшим развитием идеи, заложенной в работе [6].

Результаты разработки. Разработанная экспериментальная установка (ЭУ) (рис.1) позволяет исследовать РРЭП и КЭ на потери в элементах сети, которые представлены своими физическими моделями.

ЭУ представлено: 1 – физическая модель электрической сети (ФМЭС) и 2 – устройства для автоматического управления экспериментом (АУЭ).

ФМЭС и АУЭ состоят из следующих элементов: трехфазный источник электрической энергии с фазными напряжениями соответственно e_a, e_b, e_c ; К – калориметр, содержащий физическую модель исследуемого элемента сети (рис.2); РИТ – регулируемый измерительный трансформатор тока, обеспечивающий контроль режима работы сети; C_{ab}, C_{ac}, C_{bc} – межфазные емкости линии электропередачи; C_a, C_b, C_c – регулируемые конденсаторы, имитирующие емкости фаз сети относительно

земли. Возможность регулирования значения этих конденсаторов позволяет моделировать работу электрической сети в горных условиях, когда каждая из фаз воздушной линии может иметь различное расстояние по отношению к земле. Электрические нагрузки представлены линейными (Z_a, Z_b, Z_c) и нелинейными (Z_a^H, Z_b^H, Z_c^H) резисторами соответственно. Качество электроэнергии в исследуемой сети регулируется подключением или отключением нелинейных резисторов. Отключения или включения резисторов осуществляются программным способом с помощью реле через РУР (регистр управления реле). Алгоритм управления соответствует графику электрических нагрузок, который предварительно моделируется в соответствии с вероятностными или детерминированными законами включения или отключения ЭП. В качестве уточнения поясним на примере, что означает «вероятностный или детерминированный закон включения или отключения ЭП»: например, если ЭП является сварочным аппаратом, то продолжительность

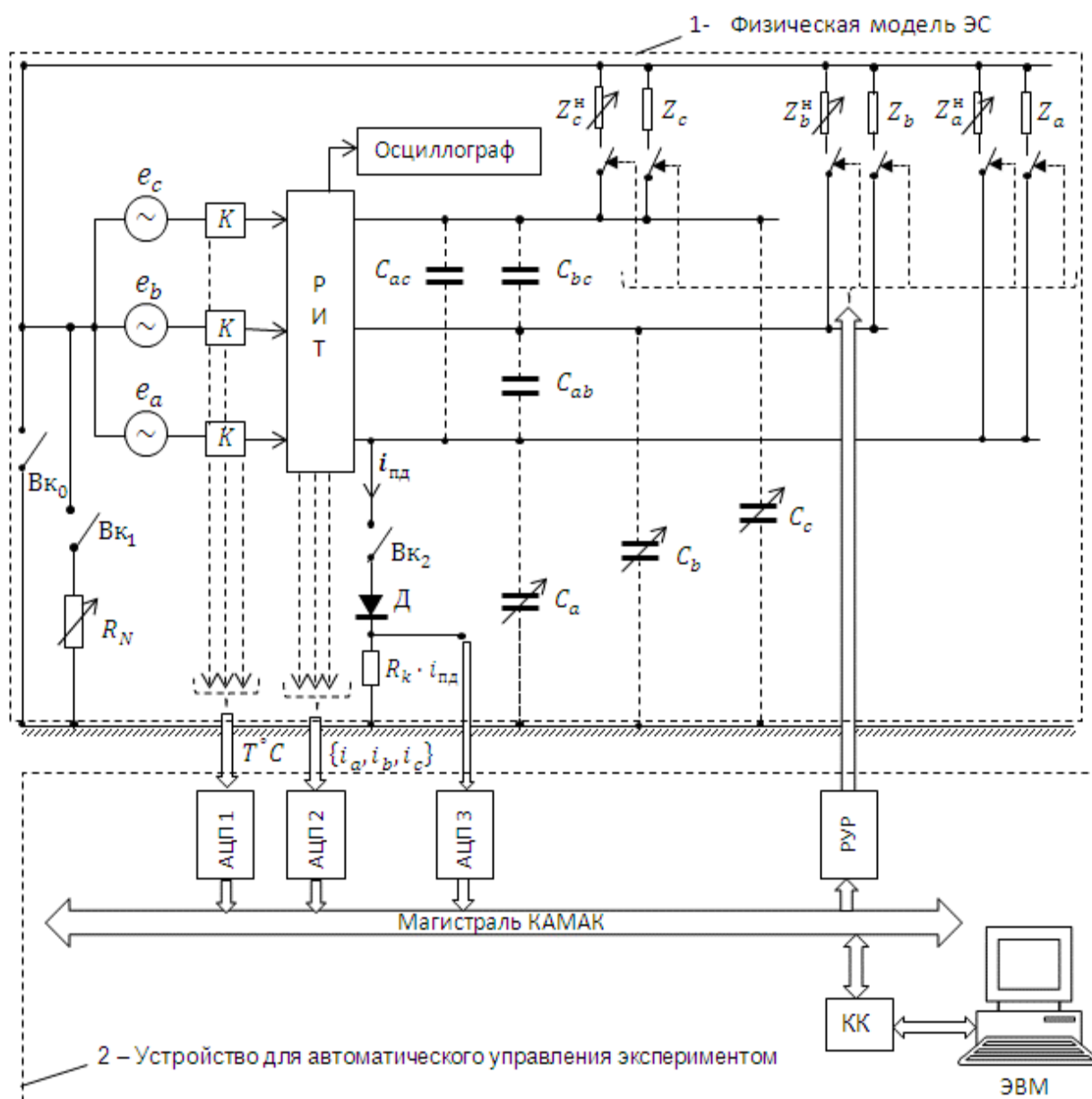


Рисунок 1 – Схема лабораторной установки с элементами АСНИ

горения или негорения электрической дуги подчиняется вероятностному закону, закон которого задается плотностью распределения продолжительности существования или отсутствия электрической дуги, кроме того, этот процесс сильно нелинейное; если, например, ЭП – светильник с люминесцентными лампами, который надо отключить после окончания рабочей смены, то этот процесс детерминирован, т.е. время отключения заранее известно.

Заметим, что в процессе работы ЭП в стохастическом режиме также изменяется и степень симметричности сети.

Изменяя состояния элементов ЛУ – B_{k0} и B_{k1} , т.е. выключателей, экспериментатор может менять тип электрической сети (ЭС). При их разомкнутых состояниях нейтраль ЭС изолирована. При разомкнутом B_{k0} и замкнутом B_{k1} нейтраль ЭС заземлена через низкоомный или высокоомный резистор R_N в зависимости от его значения. При замкнутом B_{k0} и разомкнутом B_{k1} нейтраль ЭС глухо заземлена. Разомкнув контакты B_{k0} , B_{k1} и замкнув B_{k2} , моделируем работу сети с изолированной нейтралью при замыкании одной фазы на землю. Д – диод, его наличие означает появление перемежающейся электрической дуги между фазой А и землей, т.е. является моделью дугового промежутка. Обоснование этого положения дано ниже по тексту. Замыкание без него означает возникновение металлического замыкания. R_k – калиброванный резистор, падение напряжения от протекающего через него тока i_{pd} позволяет изучить закон изменения этого тока, вызванного возникновением перемежающейся электрической дуги.

Описание основных элементов ФМЭС: 1. Калориметр – измерительный прибор потери электроэнергии. Следует отметить, что этот прибор (рис.2) в нашей установке предназначен для проведения исследований, где оценивается степень влияния на потери в элементах сети от тока с искаженной синусоидой. Элемент сети представлен физической моделью и содержится внутри калориметра.

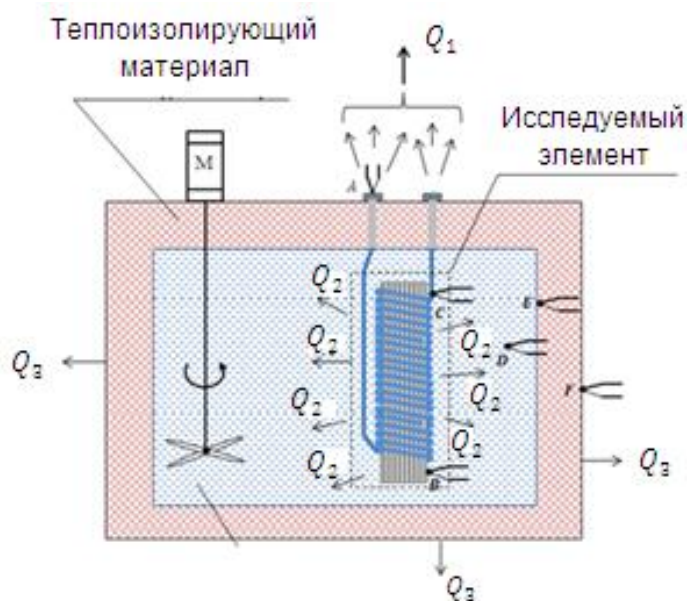


Рисунок 2 – Калориметр с моделью элемента сети

Рассматриваемый способ основывается на следующей идее [7]. Исследуемый элемент электрической сети в виде физической модели помещается в теплоизолированную емкость заданного объема, которая заполнена диэлектрической жидкостью с заданными теплофизическими характеристиками и начальной температурой.

При протекании электрического тока через исследуемый элемент в течение определенного времени в нем за счет потери электроэнергии выделяется тепло, которое поглощается жидкостью, нагревая ее до определенной температуры.

Так как нам известны продолжительность эксперимента, начальная и конечная температуры, теплофизические характеристики и масса жидкости, а также масса физической модели элемента и его теплофизические характеристики, то можно рассчитать потери электроэнергии в физической модели. Все необходимые расчетные формулы для определения потери электроэнергии в физической модели приведены в [7]. Следует отметить, что такой способ применим только при проведении научных исследований.

1. Датчик тока в виде регулируемого измерительного трансформатора – РИТ [8]. Выше по тексту отмечено, что он обеспечивает контроль режима работы сети в процессе эксперимента. РИТ (рис.3) конструктивно представляет собой сердечник 1 цилиндрической

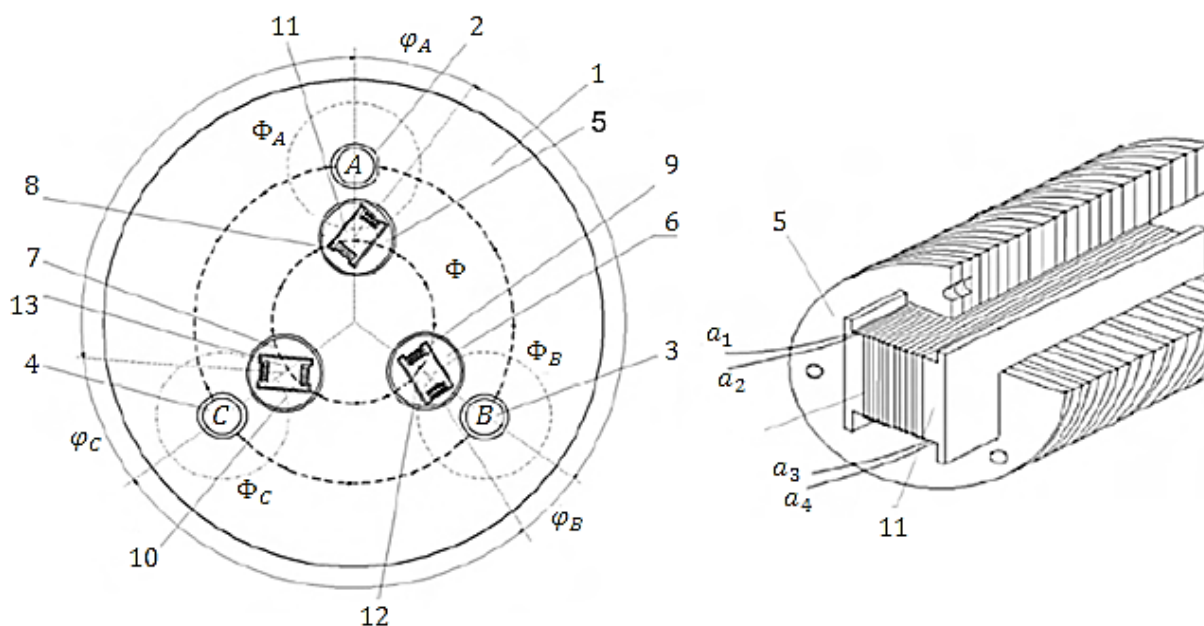


Рисунок 3 – Конструкция РИТ

формы из соответствующего магнитного материала. В сердечнике просверлены отверстия, которые по отношению друг к другу расположены под углом в 120° . Элементы с номерами 2, 3, 4 представляют проходные изоляторы с токоведущими стержнями фаз А, В, С, которые являются первичными обмотками. Магнитные потоки Φ_A , Φ_B , Φ_C образованы этими обмотками. Внутренние отверстия 5, 6, 7 цилиндрической формы расположены напротив соответствующих проходных изоляторов 2, 3, 4. Обмотки 8, 9, 10 намотаны на рамки 11, 12, 13 и установлены в

расточке внутренних отверстий 5, 6, 7 соответственно напротив фаз А, В, С. Ориентации фаз таковы, что плоскости этих рамок расположены в зоне результирующего вращающегося магнитного поля Φ , полученного от токов нагрузок I_A, I_B, I_C , протекающих по первичным обмоткам устройства.

2. Диод.

Обоснование возможности использования диода для модельного представления воздушного промежутка (фаза - земля) при возникновении замыкания повреждённой фазы с землей.

В работе [9] изложено, как возникает пробой воздушного промежутка в неоднородном поле, образованном между электродами «острие –плоскость». В нашем случае «острие» соответствует фазе воздушной линии, а «плоскость» – земле.

В воздушной линии, когда возникает условие начала электрического разряда между фазой и землей, ионизационные процессы начинаются у электрода – острия, так как там напряженность электрического поля наибольшая. При этом возникает определенное количество свободных электронов и положительных ионов в результате ударной ионизации. Явление имеет место, когда налетающая на атом (молекулу) другая атомная частица (свободные электроны, изначально возникающие в атмосфере за счет взаимодействия молекул воздуха с внешними энергетическими излучениями) сообщает валентному электрону энергию $\delta W \geq q \cdot U_{и}$. Описанный выше процесс можно записать так: $A + \vec{e} = A^+ + \vec{e} + \vec{e}$.

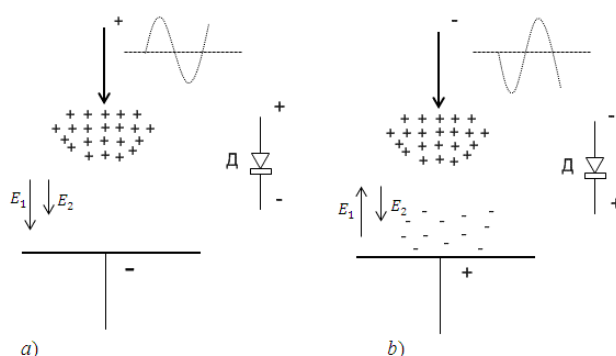


Рисунок 4 – Модельное представление воздушного промежутка (фаза – земля) в виде диода Д, когда произошло замыкание фазы с землей из-за повреждения фазы

Характер распределения частиц A^+ и $\vec{e}$ в промежутке между электродами зависит от соотношения их масс. Так как масса ионов A^+ намного больше массы электронов $\vec{e}$, то для случая, когда электрод – острие положительной полярности (рис.4, а), электроны из-за ничтожной инерционности быстро перемещаются в его сторону и там нейтрализуются. В результате в области электрода - острия образуется положительный объемный заряд, который усиливает поле во внешней области и тем самым способствует развитию разряда. Ослабление поля получается при отрицательной полярности электрода-острия (рис.4, б). Поэтому напряжение пробоя при положительной полярности электрода-острия меньше, чем при отрицательной его полярности, что подтверждено в работе [9]. Вследствие этого дуговой промежуток можно заменить диодом, имеющим нелинейную вольтамперную характеристику.

Структура устройства для автоматического управления экспериментом – АУЭ

1. ЭВМ в виде персонального компьютера (ПК), в оперативную память которого загружена управляющая программа, соответствующая задаче исследования; устройство сопряжения ПК с ФМЭС в виде аппаратуры КАМАК, предназначенное для обмена информацией между измерительной аппаратурой, используемой в эксперименте, и ЭВМ; 2. АЦП1 – многоканальный помехозащищённый аналого-цифровой преобразователь в виде функционального модуля КАМАК, который преобразует аналоговые сигналы в виде напряжений, поступающих от термодатчиков, находящихся в калориметре; 3. АЦП2 – многоканальный помехозащищённый аналого-цифровой преобразователь в виде функционального модуля КАМАК, который преобразует аналоговые сигналы в виде напряжений, поступающих от РМИТ; 4. АЦП3 – одноканальный аналого-цифровой преобразователь в виде функционального модуля КАМАК, который преобразует сигнал в виде напряжения, поступающего от калиброванного резистора в цифровой. По этому сигналу мы изучаем закон изменения тока $i_{нд}$; 5. РУР – регистры управления реле в виде функционального модуля, предназначенные для подачи управляющих сигналов к реле, которое своими контактами включает или отключает нагрузки в виде резисторов ($Z_a, Z_a^H, Z_b, Z_b^H, Z_c, Z_c^H$); 6. КК – предназначено для согласования стандартов информации между системой КАМАК и вычислительной машиной.

Управляющая программа написана на языке TURBO Pascal с использованием процедур для работы с модулями КАМАК (версия 01.12.97) через контроллер крейта КК009М.

В качестве примера рассмотрим одну из возможностей ЛУ по моделированию групповой электрической нагрузки (рис.5), в соответствии с которым программно управляются (подключаются или отключаются) нагрузки (Z_a, Z_b, Z_c), (Z_a^H, Z_b^H, Z_c^H) с применением РУР функционального модуля КАМАК.

Исходными данными для моделирования индивидуальных графиков нагрузки и группового как суммы индивидуальных являются: количество ЭП – N ; номинальные мощности этих ЭП P_k ($k = 1 \div N$); минимальные и максимальные длительности непрерывной работы каждого ЭП между паузами и законы распределения этих случайных величин; минимальные и максимальные длительности пауз ЭП и законы их распределения; общая длительность моделирования – T .

На блок-схеме рис.5: блок 1 соответствует подпрограмме разыгрывания длительности работы i -го ЭП мощностью $P(iT)$ в текущий момент времени IT , а 2 – подпрограмме разыгрывания паузы этого же ЭП. Если запустим программу, написанную в соответствии с алгоритмом (рис.5), с параметрами $T = 14$ мин., $N = 28$ шт., где T – продолжительность моделирования в минутах, N – количество электроприемников, то получим результат моделирования в виде двухмерной матрицы G_T , содержание которой приведено на рис. 6.

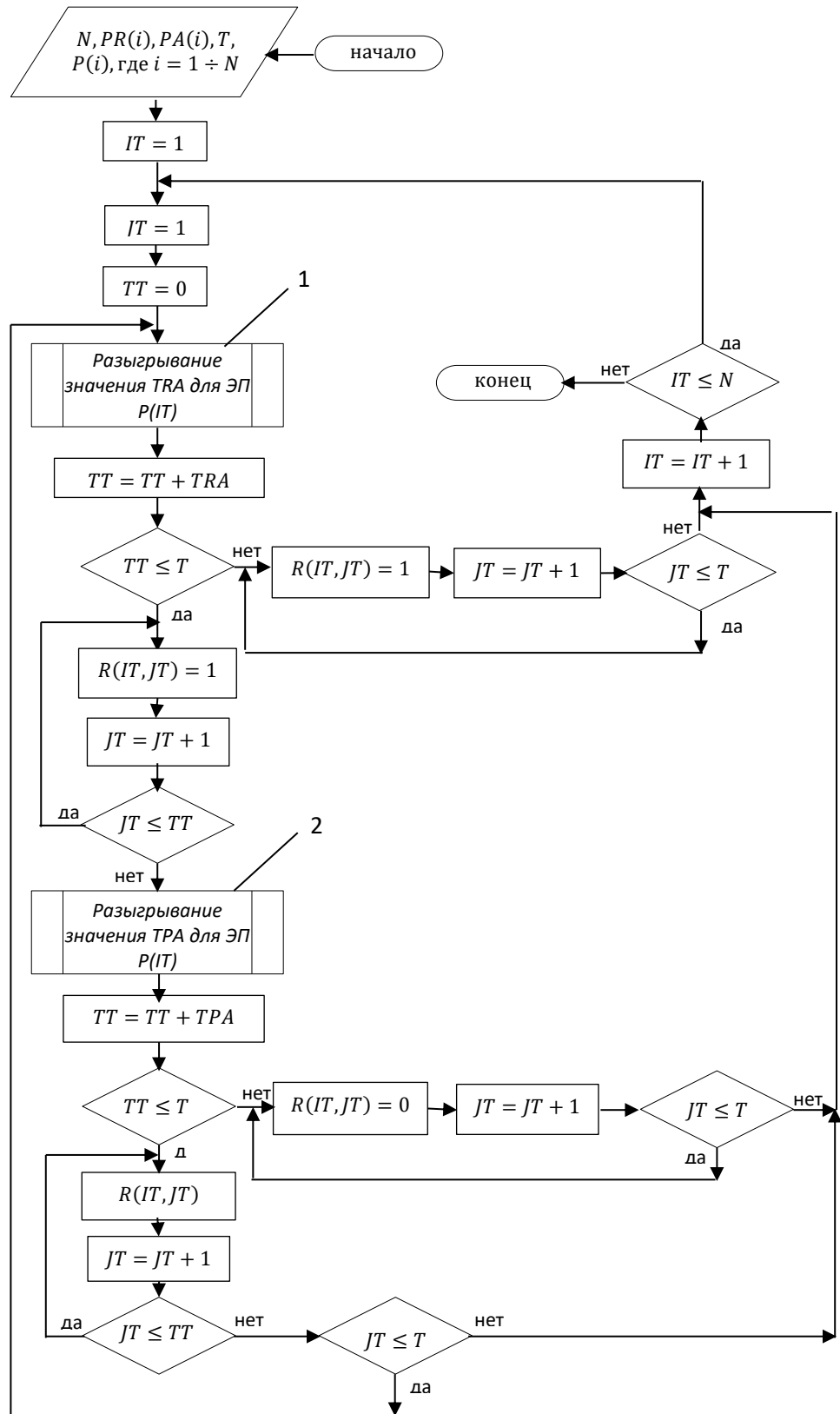


Рисунок 5 – Блок-схема моделирующего алгоритма

N	T													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0
	2	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1
	3	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1
	4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
	5	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
	6	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
	7	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1
	8	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
	9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0
	10	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	11	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
	12	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1
	13	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	1	1
	14	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	0
	15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	16	1	0	0	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0
	17	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
	18	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0
	19	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1
	20	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	0	0
	21	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1
	22	1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0
	23	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
	24	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1
	25	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1
	26	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0
	27	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1
	28	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1

Рисунок 6 – Результат имитационного моделирования

Как видно, матрица Gr состоит из нулей и единиц, нули соответствуют паузам, а единицы – включенным состояниям электроприемников. Например, на этой матрице – двенадцатая строка, имеющая следующую структуру, соответствует режиму работы

12	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

12-го ЭП, который проработал всего 14 минут, из них вначале в течение 5 минут находился во включенном состоянии, затем 7 минут в состоянии паузы, а далее 2 минуты опять в работе. Для получения группового графика достаточно произвести следующую операцию: $P_{gp}(t) = Gr' \cdot P$, где правая часть – произведение транспонированной матрицы и вектора. Элементами вектора P являются мощности электроприемников.

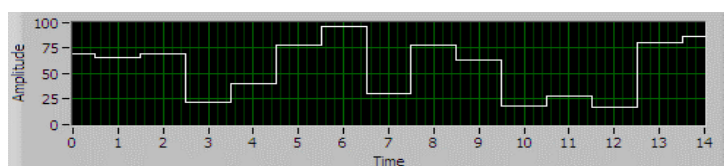


Рисунок 7 – Результат имитационного моделирования

График зависимости $P_{об}(t)$ представлен на рис.7.

В соответствии с этим графиком осуществляется управление, т.е. включения или отключения нагрузки в виде резисторов ($Z_a, Z_a^H, Z_b, Z_b^H, Z_c, Z_c^H$). Кроме того, такие графики со стохастическим характером изменения нагрузки позволяют понять о характере аналитической взаимосвязи между вероятностными законами функционирования ЭП и потерями в питающие эти ЭП токопроводами. Такая информация имеет как практическую, так и научную ценность.

Заключение. Предложена экспериментальная установка с элементами АСНИ, имеющая возможность управления РРЭП и КЭ. Такая возможность позволяет оценивать влияние РРЭП и КЭ на потери электроэнергии с помощью физической модели элементов электросети. Кроме того, рассмотрен способ измерения потерь электроэнергии в таких элементах сети. Дано обоснование возможности использования диода для модельного представления воздушного промежутка (фаза – земля) при возникновении замыкания повреждённой фазы с землей. В качестве примера для демонстрации одной из возможностей ЛУ рассмотрено решение задачи по моделированию групповой электрической нагрузки, в соответствии с которым программно управляются (подключаются или отключаются) нагрузки с применением функционального модуля КАМАК.

Литература

1. Боровиков В.С., Харлов Н.Н. Оценка добавочных потерь активной мощности и электроэнергии в линиях с высоким коэффициентом искажения синусоидальности тока // <https://portal.tpu.ru/science/konf/eers/archive/2010/sect-1.pdf>. – С. 5–10.
2. Фёдоров В.К. Возникновение и идентификация хаотических режимов в электроэнергетических системах / В.К. Фёдоров, П.В. Рысев, Е.Ю. Свешникова, С.Ю. Прусс, Д.В. Рысев // Омский научный вестник, 2009. – №1(77). – С.117–122.
3. Жежеленко И.В. Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения промышленных предприятий / И.В. Жежеленко // Электрика, 2008. – № 10. – С. 3–11.
4. Арриллага Дж. и др. Гармоники в электрических системах: Пер. с англ. / Дж. Арриллага, Д. Бредли, П. Боджер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.: ил.
5. Бендатель Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных: Пер. с англ. – М.: Мир, 1989. – 540 с.: ил.
6. Арфан Аль Хакам, Сатаркулов К.А. Компьютерное управление экспериментом в системах электроснабжения промышленных предприятий // Наука и новые технологии, 2006. – № 1. – С. 50–54.
7. Ниязов Н.Т., Усубалиева Г.К., Калматов У.А., Суюнтбекова Н.А. // Способ определения отдельных видов потерь электроэнергии в компонентах электрической сети на их физических моделях. XIII Всероссийское совещание по проблемам управления. – М. 2019. – С. 2765–2773.
8. Сатаркулов Т.К., Иманакунова Ж.С., Абылгазиев Ж.С., Корпобаева А.К., Айдарова А.Р., Калматов У.А. Регулируемый многофункциональный измерительный трансформатор / Патент 1791 КР. Официальный бюллетень № 10 (198). – С. 14–15.
9. Воробьев Г.А. Диэлектрические свойства электроизоляционных материалов. – Томск: Изд-во Томск. ун-та, 1984. – 126 с.: ил.

К. Сатаркулов, к.т.н., satarkulov46.k@mail.ru

Г.Н. Ниязова, gulmira-n.86@mail.ru

Институт машиноведения и автоматики НАН КР

Т. Кабаев, tkabaev1947@gmail.com

Р.А. Мырзаканова, raisa-nargiza@mail.ru

Кыргызский государственный технический университет им. И.Раззакова

УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПО МОНИТОРИНГУ МАСЛЯНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Показаны способы расширения функциональных возможностей существующих информационно-управляющих систем мониторинга силовыми масляными трансформаторами (СМТ) с помощью разработанных новых устройств для: обнаружения газовых пузырьков (УОГП) в СМТ; измерения тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) в СМТ без отбора проб масла в процессе его эксплуатации. Определение конструктивных параметров УОГП, а также значения электрического напряжения, подаваемого на электродные системы УОГП, можно реализовать на основе результатов моделирования. Отмечено, что моделирование характера распределения электрического поля в межэлектродных областях УОГП с трансформаторным маслом, содержащим газовые пузыри, легко реализовать с помощью комплекса программ ELCUT. Этот же программный продукт можно использовать и при определении конструктивных параметров устройства измерения $tg\delta$.

Ключевые слова: мониторинг; масляный силовой трансформатор; газовые пузырьки; трансформаторное масло; калориметр; моделирование; электрическое поле.

Введение

Одним из важных требований к электроснабжению многих промышленных предприятий является обеспечение непрерывности технологических процессов. Поэтому к электротехническому оборудованию таких предприятий предъявляются высокие требования надежности. Непредвиденные аварии силовых трансформаторов, в том числе и силовых масляных трансформаторов (СМТ), как правило, влекут за собой остановку технологической установки с значительным экономическим и экологическим ущербом [1, 2, 3].

В связи с вышеизложенным для предотвращения аварийного отказа необходимо повысить требования к системе диагностирования СМТ [4].

Постановка задачи

В настоящее время вопросы идентификации внутренних развивающихся дефектов по тепловому полю малоизучены [5]. В [6] рассмотрена информационно-управляющая система (ИУС) для диагностирования СМТ, основанная на использовании

соответствующих датчиков, которые контролируют тепловое поле в верхних слоях над обмотками СМТ.

В данной работе предлагается ряд устройств, которые, по нашему мнению, позволят расширить функциональные возможности упомянутой выше ИУС. Устройства предназначены для:

- измерения тангенса угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) трансформаторного масла (ТМ) в процессе эксплуатации СМТ, без предварительного отбора проб масла;
- оперативной регистрации появления газовых пузырьков в ТМ. Например, из-за возникновения короткозамкнутых витков в обмотках СМТ.

Однако газовыделение возможно и в результате разрушения изоляции – например, при воздействии частичных разрядов (ч.р.) на твердую изоляцию. В [7] отмечено, что состав растворенного и выделяющегося газа существенно зависит от вида повреждений трансформатора:

- возникновение дуги только в масле;
- электрические разряды в маслобарьерной изоляции (МБИ);
- слабые ч.р. в МБИ, начинающиеся при температуре выше 400°C;
- термическое разложение масла;
- термическое разложение МБИ.

Эти повреждения уточняются при анализе газа. В перечисленных выше случаях слаборастворимые в масле газы (табл. 1) обнаруживаются в объемах над поверхностью масла (например, в газовом реле), а газы с большей растворимостью обнаруживаются в масле [8], ухудшая его электроизоляционные свойства.

Таблица 1

Предельная растворимость газа в минеральном масле
(насыщенный раствор при 20°C и $9,8 \cdot 10^4$ Па) % по объему

Газ	Содержание газа в масле	Газ	Содержание газа в масле
Воздух	10,3	Оксид углерода (CO)	9
Азот (как часть воздуха)	6,98	Метан (CH_4)	30
Кислород (как часть воздуха)	3,03	Углекислый газ (CO_2)	120
Азот (N_2)	8,6	Этан (C_2H_6)	280
Кислород (O_2)	15,9	Этилен (C_2H_4)	280
Водород (H_2)	7	Ацетилен (C_2H_2)	400
Аргон (Ar)	15	Пропилен (C_3H_6)	1200
-	-	Пропан (C_3H_8)	1900

Кроме выше отмеченного, в данной работе также предлагаются способ и устройство, позволяющие измерить пробивное напряжение ТМ без отбора проб в процессе эксплуатации СМТ.

Результаты работы

Информационно-управляющая система (ИУС) по мониторингу СМТ с предлагаемыми в работе дополнительными устройствами представлена на рис. 1.

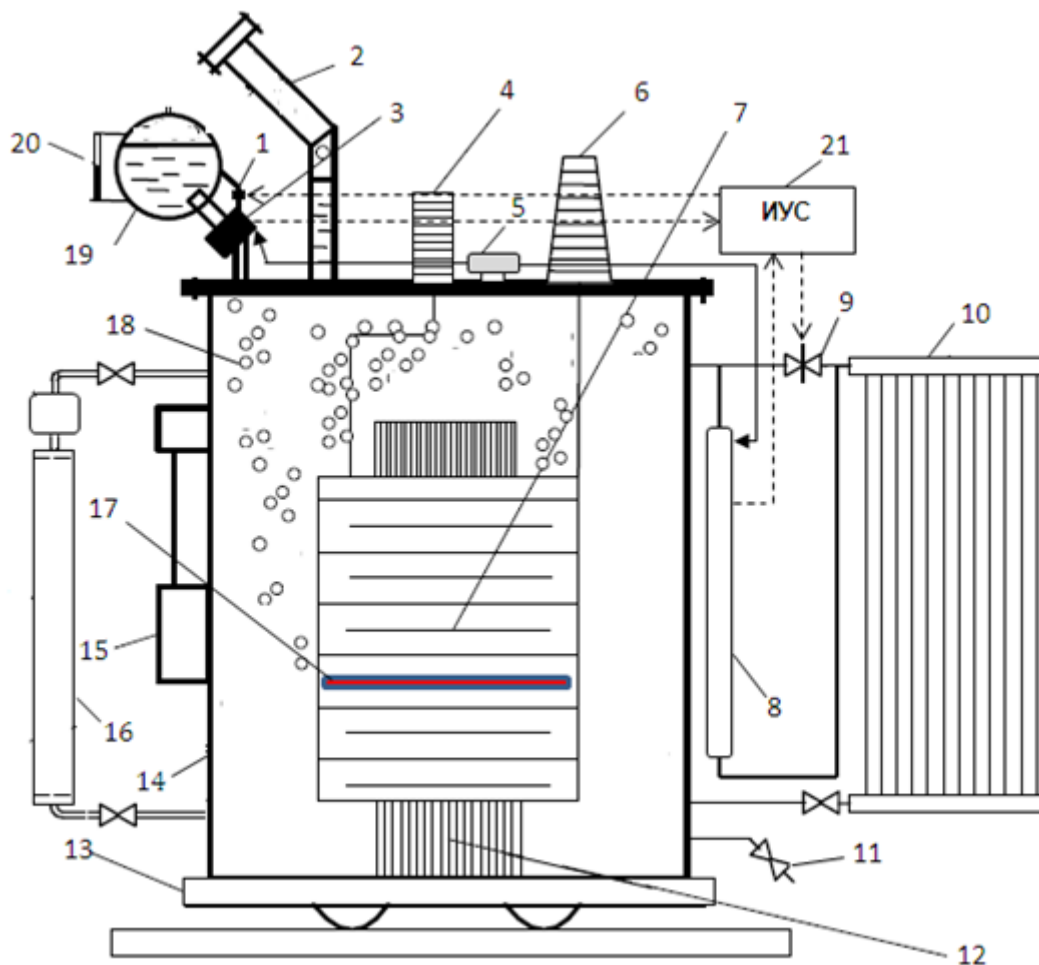


Рисунок 1 – Схема силового масляного трансформатора: 1 – соединительная трубка с дистанционно управляемым клапаном; 2 – выхлопная труба; 3 – устройство для регистрации газовых пузырьков в масле; 4 – вывод (ввод) НН; 5 – компактный высоковольтный трансформатор (КВТ), необходимый для функционирования устройств 3 и 8; 6 – ввод (вывод) ВН; 7 – обмотки высшего и низшего напряжений; 8 – устройство для измерения значения $\tan \delta$ ТМ без отбора проб, в процессе эксплуатации СМТ; 9 – кран с дистанционно управляемым клапаном; 10 – радиаторы системы охлаждения; 11 – кран для слива масла; 12 – магнитопроводы; 13 – тележка с катками; 14 – бак; 15 – устройство регулирования под нагрузкой (РПН); 16 – термосифонный фильтр; 17 – короткозамкнутый виток; 18 – пузырьки газа; 19 – расширитель; 20 – указатель уровня масла; 21 – информационно-управляющая система (ИУС).

Устройство для регистрации газовых пузырьков в масле 3 представлено на рис. 2 и выделено пунктирной линией. Его корпус изготовлен из механически прочного диэлектрического материала. Устройство 3 вертикально отходит от трубопровода 1, соединяющего бак трансформатора 2 с расширителем 4, а также соединено с расширителем при помощи тонкой высокопрочной диэлектрической трубки 5. Как

показано на рис. 2, а, в это устройство вмонтированы две металлические пластины 6, выполняющие роль электродов плоского конденсатора.

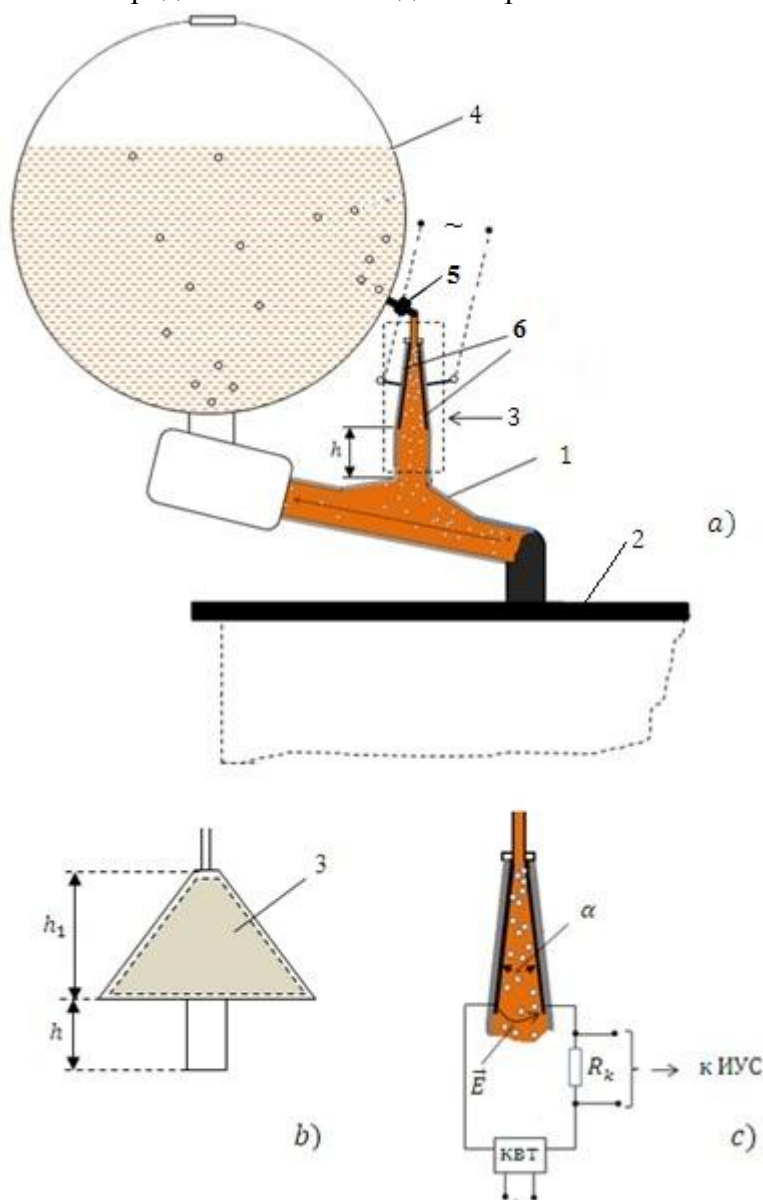


Рисунок 2 – Конструкция устройства для регистрации газовых пузырьков в масле: 1 – трубопровод; 2 – бак трансформатора; 3 – устройство для регистрации газовых пузырьков в масле; 4 – расширитель; 5 – дистанционно управляемый клапан; 6 – металлические пластины, выполняющие роль электродов плоского конденсатора; h – высота цилиндрической части устройства 3; h_1 – высота электрода 6; R_k – калиброванный резистор; КВТ – компактный высоковольтный трансформатор.

Устройство 8 (рис. 1) для измерения значения $\operatorname{tg} \delta$ ТМ без отбора проб, в процессе эксплуатации СМТ, представляет собой теплоизолированный снаружи, вертикально расположенный цилиндрический конденсатор (ЦК) с электродами 3 и 5 (рис. 3). Через него сверху вниз может перемещаться ТМ. В этом устройстве заранее, с

высокой точностью, должны быть известны массы и теплоемкости всех элементов, которые могут поглощать тепло.

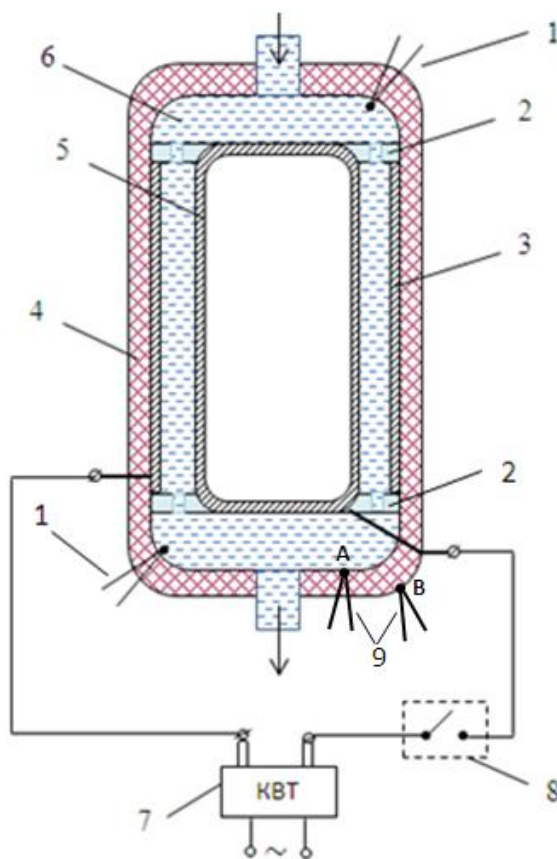


Рисунок 3 – Устройство для калориметрического способа измерения значения $\tan \delta$ ТМ: 1 – термодатчики; 2 – фиксирующие элементы из диэлектрика с малой теплоемкостью; 3 – электрод ЦК; 4 – теплоизолирующий диэлектрический материал; 6 – протекающее сверху вниз ТМ; 7 – компактный высоковольтный трансформатор; 8 – дистанционно управляемый выключатель; 9 – термодатчики, измеряющие температуру во внутренней и внешней поверхностях теплоизолирующего материала 4

Алгоритм функционирования ИУС при обнаружении газовых пузырьков

Предположим, что СМТ работает в номинальном режиме без перегрузки.

1. В ИУС поступил сигнал от датчиков (конструкция и место положения этих датчиков представлены в работе [6]), информируя о возрастании температуры в верхних слоях масла над какой-нибудь обмоткой СМТ. Одной из причин возрастания температуры может стать, например, возникновение короткозамкнутых витков в обмотках СМТ.

2. ИУС отправляет диспетчеру информацию об этом событии и производит следующие действия: для уточнения факта появления газовых пузырьков в масле, ИУС, в соответствии с управляющей программой дает команду на включение высоковольтного трансформатора 5 (рис. 1) и подачу напряжения на электроды конденсатора в устройстве для регистрации газовых пузырьков в масле 3 (рис. 1).

3. Если между плоскими конденсаторами 6 (рис. 2, а), особенно в верхних участках, накопились газовые пузырьки (в исходном состоянии дистанционно

управляемый клапан 5 закрыт), то в этом месте возникают ч.р.

4. Падение напряжения в калиброванном резисторе R_k (рис. 2, с) от импульсов тока ч.р. подается к соответствующим входам ИУС.

5. После регистрации ч.р. ИУС дает команду на открытие клапана 5 (рис. 2, а) и отключение КВТ. Тем самым накопившиеся между обкладками электродов 6 газовые пузырьки устремляются вверх, в сторону расширительного бачка. После этого подается команда на закрытие клапана 5. Таким образом, регистрируются газовые пузырьки в ТМ, причины появления которых были упомянуты в начале статьи.

Для определения конструктивных параметров УОГП, а также расчета величины напряжения, подаваемого на электроды 6 (рис. 2, а), при котором возникают ч.р. в газовых пузырьках, можно воспользоваться комплексом программ ELCUT [9]. С его помощью можно моделировать двухмерные поля методом конечных элементов [10].

Определив конструктивные параметры УОГП, изготавливается его физическая модель, с помощью которой можно уточнять расчетные параметры путем проведения реальных экспериментов. В процессе экспериментов можно снять и осциллограмму падения напряжения в калиброванном резисторе R_k от импульсов тока ч.р. С помощью этого сигнала, который подается на соответствующий вход ИУС, устанавливается факт появления газовых пузырьков в ТМ СМТ.

Алгоритм функционирования ИУС при измерении тангенса угла диэлектрической потери $tg\delta$

Тангенс угла диэлектрических потерь ($tg\delta$) позволяет выявить дефекты масла на ранней стадии их возникновения.

Измерение $tg\delta$ масла в процессе эксплуатации СМТ происходит в следующей последовательности (все действия реализуются автоматически командами от ИУС):

1. По команде ИУС закрывается дистанционно управляемый клапан крана 9 (рис. 1). В результате в калориметр поступает масло из бака СМТ.

2. Дается команда на дистанционно управляемый выключатель устройства 8 (рис. 1) подачей на обкладки конденсатора установленного напряжения U . В это время снимаются показания термодатчиков (фиксируется температура масла), засекается время начала подачи напряжения на обкладки конденсатора.

3. По истечении определенного времени Δt снова снимаются показания термодатчиков и дается команда на отключение напряжения, подаваемого на электроды конденсатора устройства 8.

За отрезок времени Δt некоторая часть тепловой энергии, выделившейся в масле за счет диэлектрической потери, поглощается контактируемыми с ней элементами калориметра. Просуммировав энергию, поглощенную маслом и всеми остальными элементами, и разделив получившуюся сумму на Δt , определим мощность потерь P . В то же время известна формула $P = U^2 \omega \cdot C \cdot tg\delta$, тогда:

$$tg\delta = \frac{P}{U^2 \omega C},$$

где U – напряжение, приложенное к электродам цилиндрического конденсатора (рис. 3), C – емкость этого конденсатора, $\omega = 2\pi f$.

При определении тепловой энергии Q , выделившейся за счет диэлектрической потери (ДП) в ТМ, под воздействием приложенного к электродам ЦК напряжения U (рис. 3), принимаем допущения:

1. Electrodes ЦК изготовлены из тонкостенных медных листов и имеют малую тепловую инерционность, вследствие чего за короткое время принимают температуру окружающей среды.

2. Не учитывается тепловая энергия, поглощённая мелкими элементами ЦК.

Все формулы для проведения тепловых расчетов взяты из [12].

Тепловая энергия (ТЭ) Q , выделившаяся за счет ДП в ТМ под воздействием приложенного к электродам ЦК напряжения U , в основном расходуется на нагрев электродов и корпуса Q_1 , а также на тепловые потери с поверхности ЦК Q_2 , т.е. его можно представить в виде:

$$Q = Q_1 + Q_2,$$

где Q_1 – ТЭ, израсходованная на нагрев внутреннего и внешнего электродов и корпуса ЦК:

$$Q_1 = c_{\text{мед}} \cdot (m_1 + m_2) \cdot \Delta T + c_{\text{кор}} \cdot m_{\text{кор}} \cdot \Delta T_{\text{кор}}.$$

В этом выражении $c_{\text{мед}}$ – удельная теплоемкость меди; $(m_1 + m_2)$ – суммарная масса медных электродов; $c_{\text{кор}}$ – удельная теплоемкость материала, из которого изготовлен корпус ЦК; $m_{\text{кор}}$ – масса корпуса; $\Delta T = (T_2 + T_1)$, где T_1 и T_2 – начальная и конечная температура ТМ; $\Delta T_{\text{кор}}$ – разность средней и начальной температуры корпуса $(T_A + T_B) / 2$.

Тепловые потери с поверхности корпуса ЦК Q_2 определяются конвекционным потоком (тепловое излучение незначительно) по формуле:

$$Q_2 = \gamma (T_{\text{Вср}} - T_0) s_2 \cdot t,$$

где s_2 – площадь внешней поверхности корпуса; $T_{\text{Вср}}$ – средняя температура на поверхности корпуса в точке В; γ – коэффициент теплоотдачи; T_0 – температура окружающей среды; t – время измерения.

В заключение отметим, что в работе предложено устройство, которое в отличие от газового реле оперативно реагирует на появление в СМТ газовых пузырьков, и его функционирование основано на электрическом принципе. Предложен способ измерения $\tan \delta$ трансформаторного масла в СМТ без отбора проб масла, в процессе его эксплуатации.

Литература

1. Боднар В.В. Нагрузочная способность силовых масляных трансформаторов – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 176 с.
2. Васютинский С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов – Л.: Энергия, 1970. – 432 с.
3. Система автоматизации управления техническим состоянием технологического оборудования нефтегазовых производств / Баширов М.Г. [и др.] // Нефтегазовое

- дело: электрон. науч. журн., 2011. – № 3. – С. 26–40. URL: http://www.ogbus.ru/authors/Bashirov/Bashirov_4.pdf (дата обращения: 19.11.2020).
4. Семенов В.В. Контроль состояния маслonaполненного оборудования на основе хроматографического анализа газосодержания масла // Информационные технологии в науке, проектировании и производстве (Computer-Based Conference): Материалы IX Всеросс. науч.-техн. конф. – Новгород: Новг. гос. техн. ун.-т, 2003.– С. 14–15.
 5. Костюкова Т.П., Семенов В.В. Анализ видов, последствий и критических отказов силового энергетического оборудования. Методы обеспечения эксплуатационной безопасности // VII симпозиум «Электротехника 2010»: Сборник научных трудов. – М. 2003. – С. 69–72.
 6. Калматов У.А., Сатаркулов К. Диагностирование силовых трансформаторов по характеру распределения температурного поля в верхних слоях масла // Проблемы автоматики и управления. 2019, №1 (36).
 7. Muller R., Potthoff K., Soldner K. The analysis of gases dissolved in the oil as a means of monitoring transformers and detecting faults. – CIGRE, rep. 12–02, 1970.
 8. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1979. – 224 с.: ил.
 9. ELCUT Моделирование двумерных полей методом конечных элементов, руководство пользователя. – Санк-Петербург, 2010.
 10. Сильвестер П., Феррари Р. Методы конечных элементов для радиоинженеров и инженеров электриков. – М.: Мир, 1986. – 229 с.
 11. Асанова С.М., Айдарова А.Р., Сатаркулов К.А. Исследование диагностических возможностей параметров переходных процессов в цепях с распределенными параметрами // Известия КГТУ им. И. Раззакова, 26/2012.
 12. Болгарский, А.В., Термодинамика и теплопередача: учеб.для вузов / А.В. Болгарский, Г. А. Мухачев, В. К. Щукин. – М.: Высш. шк., 1975. – 495 с.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 006.91.001: 536.5.081; 536.5.081

А.А. Абдукаюмов, abduraufabdukayumov@gmail.com, Узбекистан

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ СУММАРНОГО ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Приведены результаты исследования взаимосвязи понятий «метрологическая прослеживаемость», «неопределенность измерений», «единство измерений» и «передача размера единиц величин» между собой и источников неопределенности результата измерения суммарного теплового сопротивления текстильных материалов, выявлены основные источники неопределенности результата измерения суммарного фонового сопротивления текстильного материала.

Ключевые слова: прослеживаемость, неопределенность, метрологическая, измерение, суммарное, тепловое, сопротивление.

Введение

Повышение качества и конкурентоспособности производимой продукции является важнейшей задачей развитого государства.

Постановлением Президента Республики Узбекистан от 16 сентября 2019 года № ПП-4453 «О мерах по дальнейшему развитию легкой промышленности и стимулированию производства готовой продукции» утверждены целевые параметры производства и экспорта текстильной, швейно-трикотажной, кожевенно-обувной и пушно-меховой продукции с высокой добавленной стоимостью на базе углубленной переработки сырья исходя из спроса рынка на 2020–2025 годы [1].

В целях обеспечения конкурентоспособности продукции на мировом рынке, защиты потребителя от недобросовестности изготовителя, подтверждения показателей качества продукции, Законом Республики Узбекистан «О сертификации продукции и услуг» (статья 2) предусмотрено осуществление её сертификации [2].

Перечень производимых в Республике Узбекистан и ввозимых на ее территорию видов продукции, подлежащих обязательной сертификации утверждён постановлением Кабинета Министров Республики Узбекистан от 28 апреля 2011 года №122 «О дополнительных мерах по совершенствованию процедур сертификации и внедрения систем менеджмента качества» [3].

В соответствии с указанным Перечнем одежда трикотажная машинного или ручного вязания, комплекты одежды профессиональные для пожарных, обувь и аналогичные изделия подлежат обязательной сертификации.

Также в Республике Узбекистан принят общий технический регламент «О безопасности продукции лёгкой промышленности», который утверждён постановлением Кабинета Министров Республики Узбекистан от 11 мая 2016 года № 148 [4]. Виды продукции, охваченные данным техническим регламентом (*тканые, трикотажные и нетканые полотна; изделия швейные из материалов текстильных; чулочно-носочные изделия; покрытия и изделия ковровые из текстильных, нетканых материалов, и войлока; головные уборы; текстильно-галантерейные изделия*) также подлежат обязательной сертификации.

Международными документами в области метрологии и оценки соответствия установлено, что для обеспечения признания протоколов испытаний в зарубежных странах, основным требованием к средствам измерений, используемым в испытательных лабораториях, является прослеживаемость результатов измерений, полученных с помощью каждого конкретного средства измерений.

Понятия «метрологическая прослеживаемость» и «неопределенность измерений» появились в метрологической практике с принятием международного стандарта ISO/IEC 17025 [5], предъявляющего требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.

В соответствии с международным словарем по метрологии (VIM) [6], метрологическая прослеживаемость (*metrological traceability*) – это свойство результата измерений, посредством которого результат можно соотнести к эталону через документально подтверждённую непрерывную цепь калибровок, обуславливающих неопределенность измерений.

Концепция метрологической прослеживаемости является важной для практического применения, так как позволяет сравнить точность измерений в соответствии со стандартизированной процедурой оценки неопределенности измерения.

Поэтому для обеспечения прослеживаемости измерений необходима оценка неопределенности измерений, которая в соответствии с VIM [6] определяется как неотрицательный параметр, характеризующий дисперсию количественной величины, который можно приписать измеряемой величине на основе используемой информации.

Одним из важных показателей, подлежащих определению при испытаниях текстильного материала, является его суммарное тепловое сопротивление (СТС).

Изложение основного материала

Суммарное тепловое сопротивление материала R_{Σ} определяют по измеренному значению времени τ охлаждения тепловой ячейки по формуле [7]

$$R_{\Sigma} = \frac{E}{\Phi \cdot K(m - B \cdot E)} \cdot \quad (1)$$

Следовательно, основными источниками неопределенности результата измерения СТС являются:

$E = 3C_1 / (3C_1 + C_2)$ – коэффициент;

$\Phi = C_1 / S$ – тепловой фактор калориметра, Дж/(м²К);

$K = 0,4 + [0,6 / (1 + 2b / D)^2]$ – коэффициент, учитывающий рассеяние теплового потока в пробе;

$m = \frac{\ln \Delta T_1 - \ln \Delta T_2}{\tau}$ – темп охлаждения, с⁻¹;

ΔT_1 и ΔT_2 – разности температур пластины и окружающего воздуха, соответственно в момент времени t_1 и t_2 , К;

S – площадь рабочих поверхностей пластины, м²;

b – толщина исследуемого материала, мм;

D – диаметр пластины (или размер наименьшей стороны прямоугольной пластины), мм.

Доверительные границы случайной погрешности результата измерений $\varepsilon_{\bar{x}}$, как известно, вычисляют по формуле:

$$\varepsilon(\bar{x}) = t \cdot S_{\bar{x}}, \quad (2)$$

где x – измеряемая величина;

t – коэффициент, зависящий от доверительной вероятности P , числа измерений n , закона распределения вероятности и ряда других классификационных характеристик измерений;

$S_{\bar{x}}$ – оценка среднего квадратического отклонения (СКО) результата измерений, вычисляемая по формуле

$$S_{\bar{x}} = \frac{S_x}{\sqrt{n}}, \quad (3)$$

где S_x – СКО единичного измерения;

n – число измерений.

СКО прямых измерений, таких, как измерения толщины образца исследуемого текстильного материала, геометрических размеров пластины тепловой ячейки, температуры и времени остывания пластины и ряда других величин определяют по формуле

$$S_x = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{1/2}. \quad (4)$$

СКО результата косвенных некоррелированных измерений величины Z вычисляют по формуле

$$S_{\bar{Z}} = \left[\sum_{j=1}^m \left(\frac{\partial Z}{\partial x_j} \right)^2 \cdot S_{x_j}^2 \right]^{1/2}. \quad (5)$$

Значение частных производных (коэффициентов влияния составляющих погрешностей) $\frac{\partial Z}{\partial x_j}$ вычисляется при средних значениях аргументов $\bar{x}_j$.

В соответствии с формулами (1) – (5) СКО измерения суммарного теплового сопротивления S_{R_Σ} , темпа охлаждения S_m , поправки на рассеяние теплового потока в калориметре S_B , полной теплоёмкостей пластины S_{C_1} и исследуемого материала S_{C_2} , удельной теплоёмкости S_c и поверхностной плотности исследуемого материала S_{ρ_s} , площади поверхности пластины S_s , разности температур пластины и окружающего воздуха S_T , теплового фактора прибора S_Φ , коэффициентов K , E соответственно S_K и S_E определяются следующими формулами [8]:

$$\delta_{R_\Sigma} = \sqrt{\left(1 - \frac{B \cdot E}{m}\right)^{-2} \cdot (\delta_E^2 + \delta_m^2) + \left(\frac{m}{B \cdot E} - 1\right)^{-2} \cdot \delta_B^2 + \delta_\Phi^2 + \delta_K^2}, \quad (6.1)$$

$$\delta_E = \frac{C_2}{3C_1 + C_2} \sqrt{\delta_{C_1}^2 + \delta_{C_2}^2}, \quad (6.2)$$

$$\delta_m = \sqrt{\delta_\tau^2 + \frac{2}{(\ln \Delta T_1 - \ln \Delta T_2)^2} \cdot \delta_{\Delta T}^2}, \quad (6.3)$$

$$\delta_B = \sqrt{\delta_m^2 + \delta_E^2}, \quad (6.4)$$

$$\delta_\Phi = \sqrt{\delta_S^2 + \delta_{C_1}^2}, \quad (6.5)$$

$$\delta_K = \frac{2,4 \cdot b}{D \left(1 + \frac{2b}{D}\right)^3} \sqrt{\delta_b^2 + \delta_D^2}, \quad (6.6)$$

$$\delta_{C_2} = \sqrt{\delta_{C_2}^2 + \delta_{\rho_s}^2 + \delta_S^2}, \quad (6.7)$$

$$\delta_S = 1,41 \cdot \delta_D, \quad (6.8)$$

$$\delta_{\rho_s} = \sqrt{\delta_M^2 + \delta_{S_{II}}^2}, \quad (6.9)$$

где $\delta_{R_\Sigma}, \delta_E, \delta_m, \delta_B, \delta_\Phi, \delta_K, \delta_{C_2}, \delta_{C_1}, \delta_{C_2}, \delta_{\rho_s}, \delta_\tau, \delta_{\Delta T}, \delta_S, \delta_b, \delta_D, \delta_M, \delta_{S_{II}}, \delta_l$, – относительные СКО измерения величин $R_\Sigma, E, m, B, \Phi, K, C_1, C_2, c_2, \rho_s, \tau, \Delta T, S, b, D, M, S_{II}, l$, соответственно;

$C_2 = 1,675 \cdot 10^3$ – удельная теплоёмкость материалов органического происхождения, Дж/кг К;

ρ_s – поверхностная плотность исследуемого материала, кг / м²;

M, S_{II} и l – масса, площадь поверхности и линейные размеры (длина и ширина) пробы, подготовленной для определения поверхностной плотности исследуемого материала, соответственно.

Математические модели относительных неопределенностей $u_{co}(x)$ суммарного теплового сопротивления текстильных материалов аналогичны уравнениям (6.1) – (6.9).

Выводы

1. Показаны взаимосвязи понятий «метрологическая прослеживаемость», «неопределенность измерений», «единство измерений» и «передача размера единиц величин» между собой.

2. Выявлены основные источники неопределенности результата измерения СТС текстильных материалов.

3. Впервые получена математическая модель неопределенности измерения суммарного теплового сопротивления текстильных материалов

4. Вклад каждого источника неопределенности в суммарную стандартную и расширенную неопределенности результата измерения СТС будут описаны в следующей работе.

Литература

1. Постановление Президента Республики Узбекистан от 16 сентября 2019 года № ПП-4453 «О мерах по дальнейшему развитию легкой промышленности и стимулированию производства готовой продукции».
2. Закон Республики Узбекистан «О сертификации продукции и услуг».
3. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 28 апреля 2011 года № 122 «О дополнительных мерах по совершенствованию процедур сертификации и внедрения систем менеджмента качества».
4. Постановление Кабинета Министров Республики Узбекистан от 11 мая 2016 года № 148 «Об утверждении общего технического регламента о безопасности продукции лёгкой промышленности».
5. ISO/IEC 17025:2005 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий
6. JCGM 200:2008 (E/F) International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). (Международный словарь по метрологии. Основные и общие понятия и соответствующие термины. Перевод JCGM 200:2008. Из-во: Санкт-Петербург, НПО «Профессионал», 2009 г.)
7. ГОСТ 20489-75. Материалы для одежды. Метод определения суммарного теплового сопротивления.
8. Хакимов О.Ш., Джаббаров Р.Р., Абдукаюмов А.А. Метод определения случайной погрешности суммарного теплового сопротивления материалов для одежды // Вестник ТашГТУ. – 2001. – № 1. – С.58–61.

УДК 620.953:621.867.1

Бочкарев И. В., Сандыбаева А.Р., Садыков Д.Н.

Институт машиноведения и автоматики НАН КР

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

elmech@mail.ru, aida.kgtu@gmail.com, daemon_dima@mail.ru

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ТУРБОМЕХАНИЗ- МОВ БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА

Рассмотрена структура биоэнергетического комплекса (БК) для анаэробной переработки органических отходов. Показано, что БК состоит из нескольких разнородных структурных составляющих, для работы которых необходимо различное вспомогательное электромеханическое оборудование в виде турбомеханизмов (ТМ), которое обеспечивает перемещение, как исходной биомассы, так и конечного продукта в виде биогаза и удобрений. Очевидно, что по условиям работы БК требуется периодическое регулирование выходных параметров ТМ, причем осуществлять это наиболее экономично регулированием скорости вращения ТМ путем регулирования их приводных электродвигателей, в качестве которых используют асинхронные двигатели (АД). Частоту вращения АД наиболее целесообразно регулировать с помощью преобразователей частоты (ПЧ). Анализ возможных эксплуатационных режимов работы ТМ БК показал, что для этих целей лучше подходят системы векторного управления. Для удобства анализа и исследований электропривода БК разработаны структурные и соответствующие имитационные модели системы «ПЧ – АД – ТМ» с векторным управлением.

Ключевые слова: биоэнергетический комплекс, турбомеханизм в виде насоса или вентилятора, преобразователь частоты, векторное управление, структурная схема, имитационная компьютерная модель.

Введение. Потенциал органических отходов как биоразлагаемого субстрата и источника биотоплива и удобрений является в настоящее время предметом интенсивных научных и промышленных исследований. Поэтому разработка и модернизация высокоэффективных систем переработки и утилизации органических отходов, в частности, отходов животноводства, является весьма актуальной задачей.

Для получения биотоплива и удобрений применяются различные типы биоэнергетических установок (БУ), в которых органические отходы подвергаются анаэробной переработке [1 – 4]. По способу загрузки исходного сырья существует два типа БУ:

➤ БУ периодической загрузки, в которых после загрузки определенной порции сырья осуществляется его переработка в течение определенного заданного времени, после чего работа БУ останавливается и не переработанный остаток сырья (шлам) полностью удаляется. Затем процесс повторяется.

➤ БУ непрерывной загрузки, в которых постоянно осуществляется загрузка сырья небольшими порциями и удаляется равная порция переработанного шлама.

Очевидно, что БУ периодической загрузки обеспечивают нестабильное производство биогаза и имеют определенный перерыв в его выработке. Такие БУ не предусматривают автоматизацию отдельных технологических процессов и используются в не-

больших частных хозяйствах для переработки и утилизации имеющихся отходов животноводческой фермы [5, 6]. Поэтому более перспективными при производстве биогаза в промышленных масштабах являются БУ непрерывной загрузки, которые в настоящее время считаются более предпочтительными и перспективными [1]. В статье рассмотрены вопросы компьютерного моделирования и исследования электрооборудования именно таких БУ на примере установок для переработки отходов животноводства.

Биоэнергетические комплексы для переработки отходов животноводства. Пример возможного выполнения биоэнергетического комплекса (БК) для анаэробной переработки жидких органических отходов показан на рис.1.

Биоэнергетический комплекс состоит из нескольких разнородных структурных составляющих, основными из которых являются животноводческая ферма, которая непосредственно обеспечивает БК исходным сырьем, БУ в виде анаэробного биореактора, в котором это сырье подвергается соответствующей обработке, газгольдер (резервуар для сбора биогаза) и приемник биошлама, в котором накапливаются удобрения.

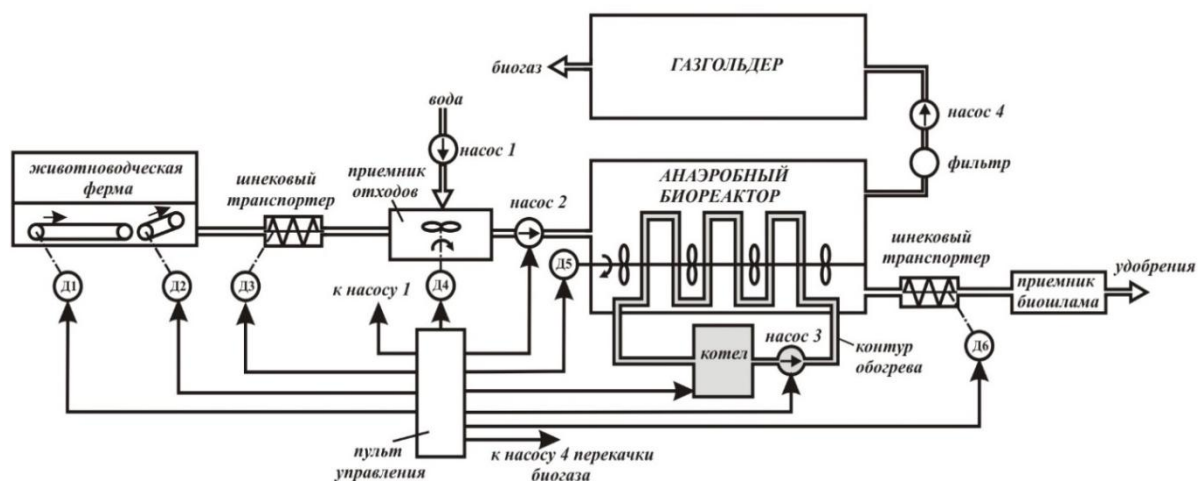


Рисунок 1 – Принципиальная схема биоэнергетического комплекса для переработки отходов животноводства

Для успешной работы основных структурных единиц БК содержит, как видно из рис. 1, различное вспомогательное электромеханическое оборудование в виде турбомеханизмов (насосов и вентиляторов), которое обеспечивает перемещение как исходной биомассы, так и конечного продукта в виде биогаза и удобрений. Все это оборудование имеет свой индивидуальный электропривод (ЭП) на базе асинхронных двигателей (АД), который в совокупности и составляет ЭП БК. Процесс переработки исходного сырья в таком БК подробно описан в [7]. Очевидно, что успешное протекание технологических режимов работы, а также безопасность и надежность работы БК во многом зависят от характеристик и качества работы турбомеханизмов (ТМ).

Очевидно, что по условиям работы БК требуется периодическое регулирование выходных параметров ТМ, к которым относятся производительность Q и напор H . На практике регулирование расхода и напора воды или воздуха в трубопроводах зачастую осуществляют посредством использования различных дроссельных заслонок и регуляторов при сохранении номинальных оборотов приводного электродвигателя ТМ. Однако такой подход приводит не только к большому энергопотреблению ЭП ТМ, но и за-

трудняет процесс автоматизации регулирования Q и H . Использование регулируемого ЭП ТМ позволит полностью исключить потери энергии на преодоление гидравлических сопротивлений заслонок в трубопроводе, а также снизить потребляемую мощность ЭП ТМ, которая изменяется в кубической зависимости от частоты вращения.

Известно, что скорость вращения асинхронных АД регулируют посредством преобразователей частоты (ПЧ). Проведенный анализ возможных эксплуатационных режимов работы БК показал, что для этих целей лучше подходят системы векторного управления.

Для удобства анализа и исследований ЭП БК нами разработаны имитационные модели системы «ПЧ – АД – ТМ» с векторным управлением.

Математическая модель обобщенной асинхронной машины для системы координат, вращающейся с угловой скоростью ω_k с вещественной осью x и мнимой y в операторной форме можно записать в виде следующей системы уравнений [8]:

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{sx} = r(1 + T'_s s) i_{sx} - \omega_k L'_s i_{sy} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx} - k_R p \omega_m \psi_{Ry}, \\ u_{sy} = r(1 + T'_s s) i_{sy} + \omega_k L'_s i_{sx} - \frac{k_R}{T_R} \psi_{Ry} + k_R p \omega_m \psi_{Rx}, \\ 0 = -k_R R_R i_{sx} + \frac{1}{T_R} \psi_{Rx} + s \psi_{Rx} - (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Ry}, \\ 0 = -k_R R_R i_{sy} + \frac{1}{T_R} \psi_{Ry} + s \psi_{Ry} + (\omega_k - p \omega_m) \psi_{Rx}, \\ M = \frac{3}{2} p k_R (\psi_{Rx} i_{sy} - \psi_{Ry} i_{sx}), \\ Js \omega_m = M - M_H. \end{array} \right. \quad (1)$$

где u_{sx} , u_{sy} и i_{sx} , i_{sy} – составляющие напряжения и тока статора по осям x и y ; ψ_{Rx} и ψ_{Ry} – потокосцепления ротора по осям x и y ; s – скольжение ротора; p – число пар полюсов;

$$r = (R_s + k_R^2 R_R); \quad L'_s = (L_s - \frac{L_m^2}{L_R}); \quad k_R = \frac{L_m}{L_R}; \quad T_R = \frac{L_R}{R_R}; \quad L'_s = L_s - \frac{L_m^2}{L_R}; \quad T'_s = \frac{L'_s}{r}; \quad R_s, R_R \text{ и}$$

L_s, L_R – активные сопротивления и индуктивности обмоток статора и ротора; L_m – взаимная индуктивность обмоток статора и ротора; J – момент инерции на валу машины; ω_m – угловая скорость вала машины; M_H – момент инерции рабочего органа; M – электромагнитный момент машины.

Для математического описания частотно регулируемого электропривода с векторным управлением, приведем систему (1) к виду, удобному для компьютерного моделирования. Совместим вектор потокосцепления с осью x , тогда имеем:

$$\psi_{R_{ню}} = \psi_{Rx}; \quad \psi_{Ry} = 0. \quad (2)$$

После ряда преобразования система (1) с учетом (2) примет вид

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{Sx} = (u_{Sx} + \omega_k L'_S i_{Sy} + \frac{k_R}{T_R} \psi_{Rx}) \frac{1}{r(1+T'_S s)}, \\ i_{Sy} = (u_{Sy} - \omega_k L'_S i_{Sx} - k_R p \omega_m \psi_{Rx}) \frac{1}{r(1+T'_S s)}, \\ \psi_{Rx} = \frac{T_R}{(1+T_R s)} k_R R_R i_{Sx}, \\ M = \frac{3}{2} p k_R \psi_{Rx} i_{Sy}, \\ \omega_m = \frac{1}{s} \frac{1}{J} (M - M_H), \\ \omega_k = p \omega_m + k_R R_R \frac{i_{Sy}}{\psi_{Rx}}, \\ \gamma = \frac{1}{s} (\omega_k), \end{array} \right. \quad (3)$$

где γ – угол поворота системы координат, вращающейся со скоростью ω_k .

Система (3) представляет собой математическое описание асинхронного электропривода с векторным управлением. Следует отметить, что управление электроприводом по сути осуществляется заданием вектора тока, а именно его проекций на оси системы координат i_{sx} , i_{sy} . При этом проекция вектора тока на ось x определяет вектор потока сцепления ротора ψ_{Rx} , а проекция вектора тока на ось y определяет момент двигателя M .

Синтез векторного управления в данном случае сводится к расчету контура потока и скорости с подчиненным контуром тока. Структурная схема рассчитываемого векторного управления АД приведена на рис. 2.

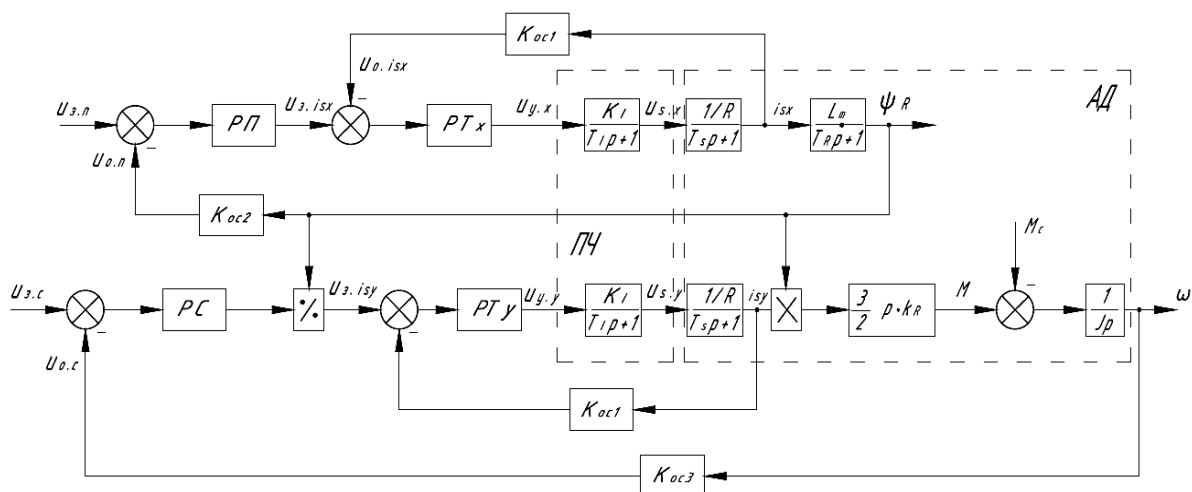


Рисунок 2 – Структурная схема системы векторного управления АД

При построении имитационной модели ПЧ-АД принимаем допущения:

- 1) напряжение источника трехфазного напряжения симметричное и имеет синусоидальную форму;
- 2) пренебрегаем насыщением магнитной цепи двигателя;
- 3) не учитываем потери в стали.

Для наглядности дальнейших исследований и удобства их применения для каждого конкретного случая ЭП в качестве преобразователя частоты принят преобразователь фирмы Delta Electronics типа VFD075M43A, а в качестве приводного двигателя ТМ – АД типа RA132SB2, параметры которого приведены в табл. 1 [9].

Таблица 1 – Паспортные данные двигателя RA132SB2

P_n , кВт	p	n_n , об/мин	η , %	$\cos\varphi$	I_n , А	$\frac{I_{пуск}}{I_{ном}}$	$M_{ном}$, Н·м	$\frac{M_{пуск}}{M_{ном}}$	$\frac{M_{max}}{M_{ном}}$	J , кг·м ²
7,5	1	2890	89	0,89	15	7	24,8	2,5	3,2	0,0185

Максимальную величину управляющего входного и выходного напряжения регуляторов принимаем равным $\pm 10В$ [10, 11]. Исходя из этого, коэффициенты обратной связи по току, по потоку и по скорости будут, соответственно, равны

$$K_{oc1} = \frac{U_{макс.ПЧ}}{I_{макс.ПЧ} \cdot \sqrt{2}}; K_{oc2} = \frac{U_{макс.ПЧ}}{\psi_{Rmax}}; K_{oc3} = \frac{U_{макс.ПЧ}}{\omega_1}, \quad (4)$$

где $U_{макс.ПЧ}$ и $I_{макс.ПЧ}$ – максимальные управляющее напряжение и выходной ток преобразователя частоты; ψ_{Rmax} – максимальный поток ротора двигателя; ω_1 – угловая скорость вращения магнитного поля статора.

Приближенно номинальный поток обмотки ротора двигателя определится как

$$\psi_{Rно} = \frac{M_n}{1,5 \cdot p \cdot k_R \cdot \sqrt{2} \cdot I_{ном} \cdot \cos\varphi_n}. \quad (5)$$

Составление имитационной модели турбомеханизма. При создании модели турбомеханизма (ТМ) учтем следующее. Основными выходными эксплуатационными параметрами любого ТМ (вентилятора или насоса) являются обеспечиваемые им расход (подача) Q и суммарный напор H рабочей среды. Момент, создаваемый ТМ на валу АД, можно определить по энергии, сообщаемой массе m рабочей среды, движущейся со скоростью v :

$$W = \frac{m \cdot v^2}{2} = \frac{(S \cdot v \cdot \rho) \cdot v^2}{2}, \quad (6)$$

где S – сечение трубопровода; ρ – плотность рабочей среды.

Учтем, что расход и напор соответственно равны

$$Q = S \cdot v = C_1 \cdot \omega; H = v^2 \cdot \rho / 2 = C_2 \cdot \omega^2, \quad (7)$$

где C_1 и C_2 – постоянные величины для конкретного ТМ; ω – угловая частота вращения вала приводного двигателя.

С учетом (6) и (7) мощность P и момент M ТМ равны

$$P = \frac{Q \cdot H}{\eta_{TM} \cdot \eta_n} = C \cdot \omega^3; M = \frac{P}{\omega} = C \cdot \omega^2, \quad (8)$$

где $C = C_1 \cdot C_2 = \text{const}$, Н·м/рад²; η_{TM} и η_n – КПД ТМ и передачи.

Модель вентиляторной нагрузки показана на рис. 3. При этом численное значение постоянного коэффициента C выбирается с учетом параметров конкретных ТМ, приводимых от рассматриваемого АД. Этот коэффициент представлен на рис. 3 усилителем.

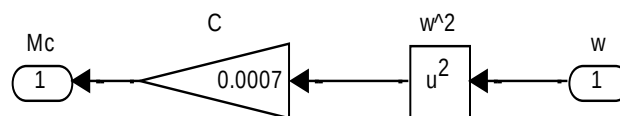


Рисунок 3 – Модель вентиляторной нагрузки. Подсистема «model_of_fan»

Расчет контура регулирования тока. Схема контура тока, по которой производится расчет, приведена на рис. 4.

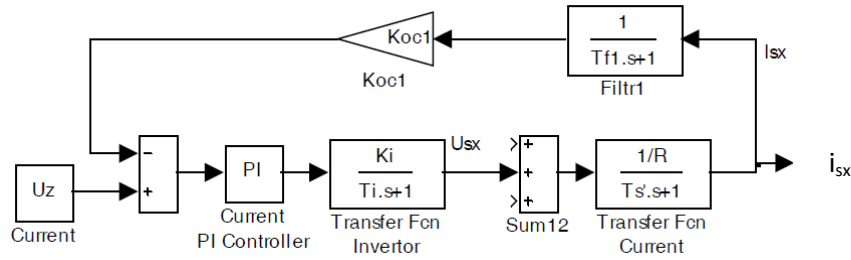


Рисунок 4 – Схема контура регулирования тока

Контур содержит ПИ-регулятор тока (Current PI Controller), инвертор (Transfer Fcn Invertor), фильтр (Filtr1), а в качестве нагрузки выступает статор двигателя (Transfer Fcn Current). В качестве блока задания выступает блок Current. Управляющее напряжение задания тока равно 10В [10, 11]. Передаточная функция инвертора

$$W_{TFI} = \frac{K_I}{T_I s + 1}, \quad (9)$$

где $K_I = U_{\text{л}} / U_{y\text{max}}$ – коэффициент усиления инвертора; $U_{\text{л}}$ – линейное напряжение статора; $U_{y\text{max}}$ – максимальное управляющее напряжение; f_1 – несущая частота ШИМ; $T_I = 0,5 / f_1$ – постоянная времени инвертора.

Передаточные функции фильтра и статора двигателя

$$W_{F1} = \frac{1}{T_{f1}s + 1}; \quad W_{TFC} = \frac{1/R}{T'_s s + 1}, \quad (10)$$

где T_{f1} – постоянная времени фильтра, которая равна периоду опроса данных о реальном токе (для дальнейших расчетов принимаем $T_{f1} = 40$ мкс).

Пропорционально-интегральный регулятор тока будет иметь вид [10, 12]

$$W_{pez1} = k_{pez1} \frac{T_{u31}s + 1}{T_{u31}}, \quad (11)$$

где $k_{pez1} = \frac{T'_s \cdot R}{T_{\mu1} \cdot a_k \cdot K_I \cdot K_{oc1}}$; $T'_s = T_{u31}$ – постоянная времени статора, равная времени

изодрома; $a_k = 2$ – коэффициент оптимизации; $T_{\mu1} = T_I + T_{f1}$ – эквивалентная малая постоянная времени контура тока.

Имитационная модель контура тока, построенная на основании схемы на рис. 4, представлена на рис. 5 (здесь и далее в блоки модели введены результаты расчетов по приведенным формулам при использовании ПЧ типа VFD075M43A и АД типа RA132SB2).

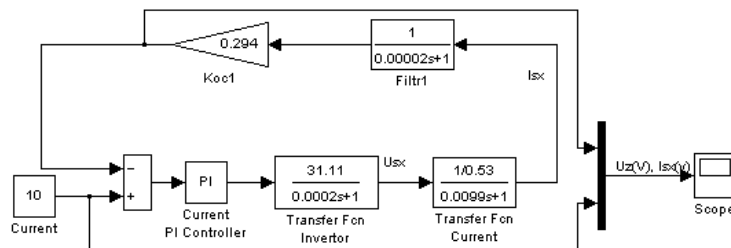


Рисунок 5 – Имитационная модель контура тока

Контур тока оптимизирован по модульному оптимуму (МО). Графики изменения сигнала задания и тока статора в машинных единицах представлены на рис. 6, где величина перерегулирования составляет 4,4% при теоретическом значении 4,3% [12]. Это говорит о правильности расчета контура управления тока.

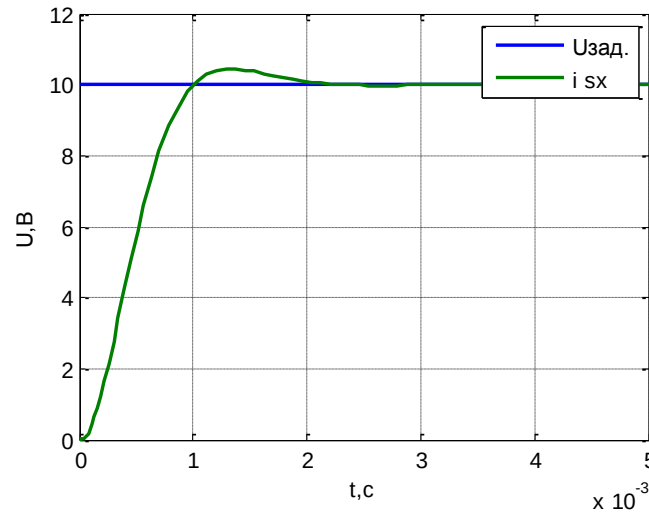


Рисунок 6 – Изменения сигнала задания и тока статора в машинных единицах

Расчет контура регулирования потока. Схема контура потока, по которой производится расчет, приведена на рис.7.

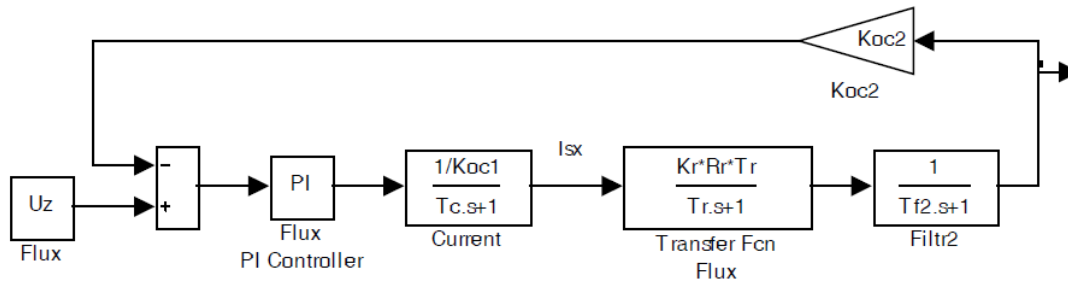


Рисунок 7 – Схема контура регулирования потока

Контур содержит ПИ-регулятор потока (Flux PI Controller), эквивалентный подчиненный контур регулирования тока (Current), блок потока ротора (Transfer Fcn Flux), фильтр (Filtr2) [10, 11]. В качестве блока задания выступает блок Flux. Управляющее напряжение задания потока равно 8 В, что соответствует номинальному потоку 0,9 Вб.

Передаточные функции блоков эквивалентного подчиненного контура регулирования тока, потока ротора и фильтра соответственно определяются по выражениям:

$$W_C = \frac{1/K_{oc1}}{T_C s + 1}; \quad W_{TF} = \frac{k_R \cdot R_r \cdot T_R}{T_R s + 1}; \quad W_{F2} = \frac{1}{T_{f2} s + 1}, \quad (12)$$

где $T_C = a_k \cdot T_{\mu 1}$ – эквивалентная постоянная времени контура тока; T_{f2} – постоянная времени фильтра, которая равна периоду опроса данных о реальном токе (400 мкс).

При этом пропорционально-интегральный регулятор потока будет иметь вид:

$$W_{pez2} = k_{pez2} \frac{T_{u32} s + 1}{T_{u32}}, \quad (13)$$

где $k_{pez2} = \frac{T_R \cdot K_{oc1}}{T_{\mu 2} \cdot a_k \cdot k_R \cdot R_r \cdot T_R \cdot K_{oc2}}$; $T_R = T_{u32}$ – постоянная времени ротора, равная времени изодрома; $T_{u32} = T_C + T_{f2}$ – эквивалентная малая постоянная времени контура потока.

На основании схемы контура регулирования потока (рис. 7) и расчетных данных по формулам (12) ÷ (13), построена имитационная модель контура регулирования потока (рис. 8).

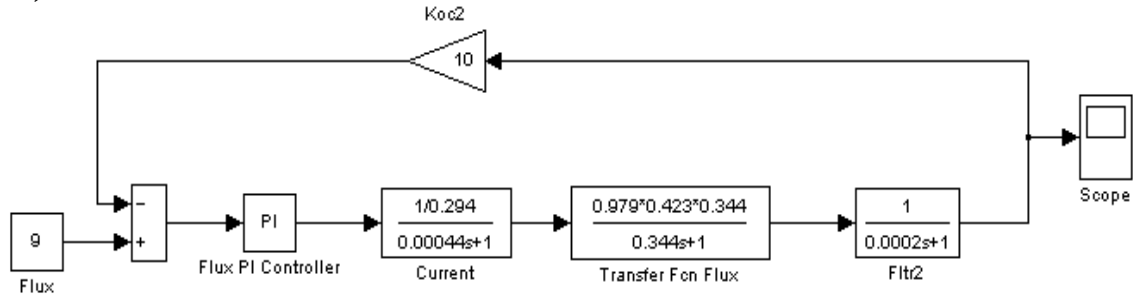


Рисунок 8 – Имитационная модель контура регулирования потока

Контур потока оптимизирован по МО. Осциллограмма изменения потока ротора в абсолютных единицах, полученная на основании имитационной модели (рис. 3.6), представлена на рис. 9. Величина перерегулирования в данном случае составляет 4,1%, при теоретическом значении 4,3% [12]. Это говорит о правильности расчета регулятора потока.

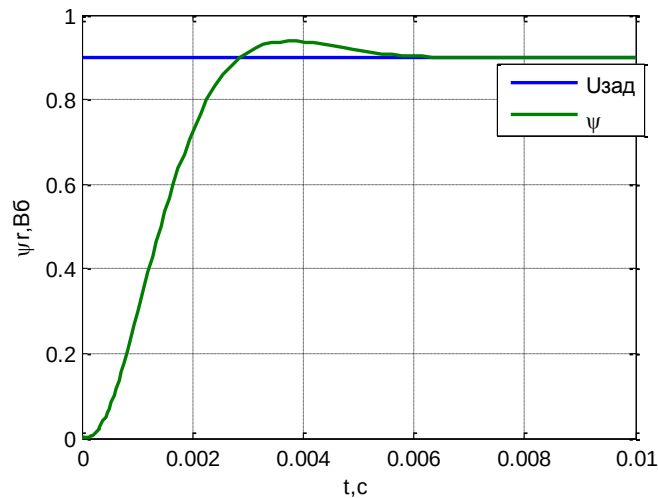


Рисунок 9 – Осциллограмма изменения потока ротора

Расчет контура регулирования скорости. Структурная схема контура скорости показана на рис. 10.

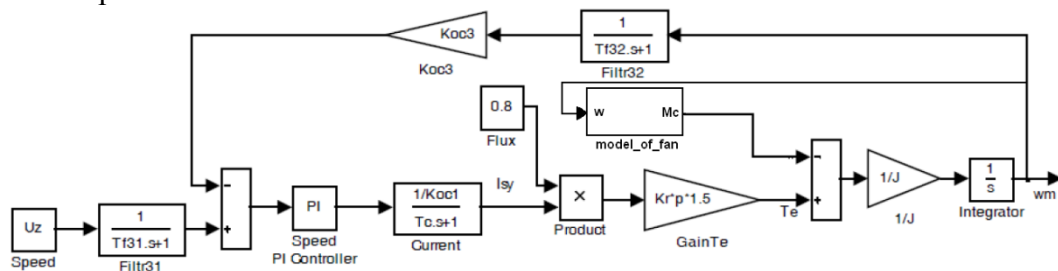


Рисунок 10 – Схема контура регулирования скорости

Схема содержит представленный передаточной функцией (уравнение (12)) эквивалентный подчиненный контур регулирования тока (Current), ПИ-регулятор скорости (Speed PI Controller), фильтр (Filtr32). Задание скорости осуществляется в блоке Speed в машинных единицах (вольтах). Электромагнитный момент двигателя формируется блоками Flux, Product и усилителем Gain Te. Нагрузочный момент задается в блоке Tn. Двигатель представлен двумя блоками: усилителем $1/J$ и интегратором (Integrator).

Коэффициент усиления блока Gain Te и интегратора:

$$K_{Te} = \psi_{R_{инд}} \cdot k_R \cdot p \cdot 1,5; \quad K_J = 1/J. \quad (14)$$

Передаточная функция фильтра:

$$W_{F32} = \frac{1}{T_{f32}s + 1}, \quad (15)$$

где T_{f32} – постоянная времени фильтра, которая равна периоду опроса данных о реальной скорости (400 мкс).

Пропорционально-интегральный регулятор будет иметь вид

$$W_{pez3} = k_{pez3} \frac{T_{u33}s + 1}{T_{u33}}, \quad (16)$$

где $k_{pez3} = \frac{T_{Int} \cdot K_{oc1} \cdot J}{T_{\mu3} \cdot a_k \cdot K_{Te} \cdot K_{oc3}}$; $a_k = b_k = 2$ – коэффициенты оптимизации; $T_{\mu3} = T_C + T_{f32}$ – эквивалентная малая постоянная времени контура скорости; $T_{Int} = 1$ с – постоянная времени интегратора (Integrator) двигателя; $T_{u33} = a_k \cdot b_k \cdot T_{\mu3}$ – эквивалентная постоянная времени контура скорости, время изодрома регулятора.

На основании полученных данных построена имитационная модель контура регулирования скорости (рис. 11).

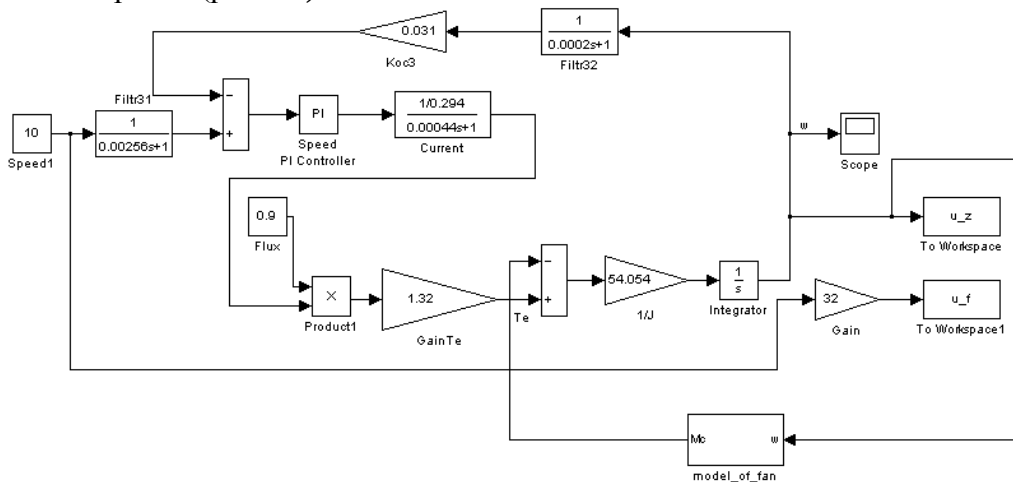


Рисунок 11 – Имитационная модель контура регулирования скорости

Поскольку контур скорости (рис. 10) оптимизирован по симметричному оптимуму (СО), то графики переходных функций имеют большое перерегулирование. Поэтому для компенсации форсирующего звена ПИ-регулятора на выходе блока задания (Speed1) введен фильтр (Filtr31) с передаточной функцией:

$$W_{F31} = \frac{1}{T_{f31}s + 1}. \quad (17)$$

Осциллограмма изменения скорости ротора в абсолютных единицах, полученная на имитационной модели (рис. 11), изображена на рис. 12.

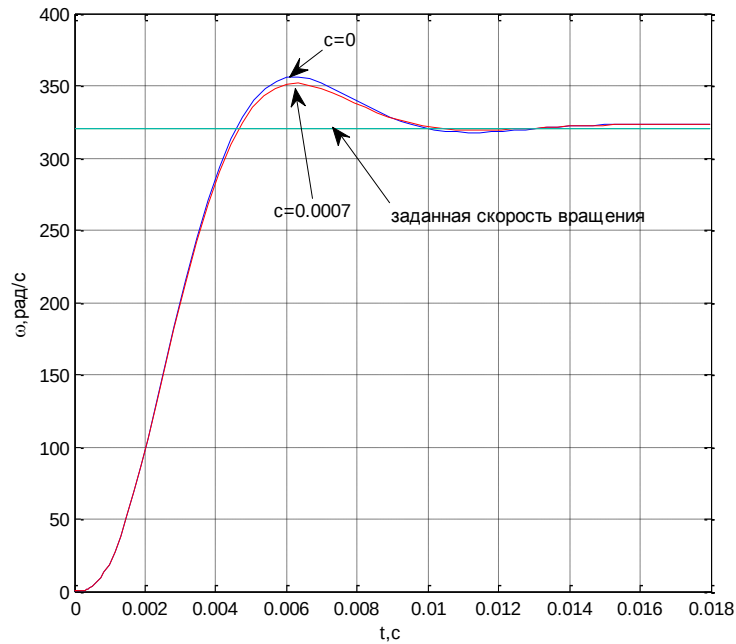


Рисунок 12 – Осциллограмма изменения скорости ротора

Видно, что регулятор отрабатывает воздействие и частота вращения становится равной заданной.

Исследование векторного управления асинхронным двигателем с центробежной нагрузкой. На базе полученных результатов нами разработана имитационная модель ПЧ-АД, где в качестве рабочего органа выступает центробежный вентилятор (рис. 13).

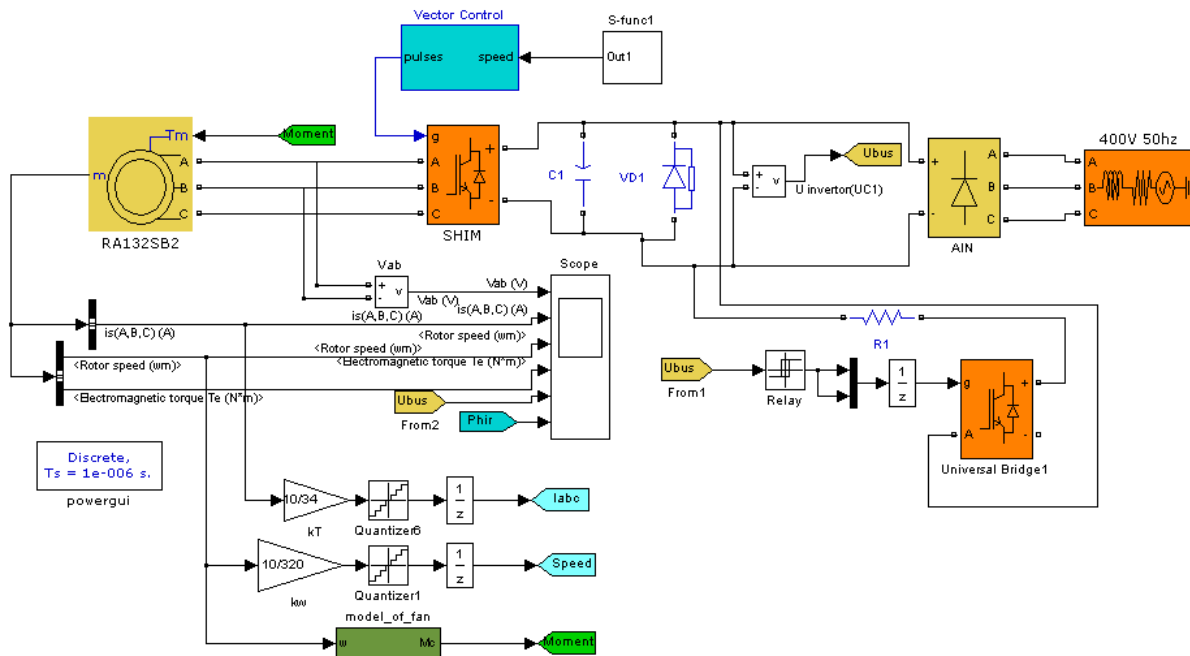


Рисунок 13 – Имитационная модель ПЧ-АД с векторным управлением с вентиляторной нагрузкой

Модель вентиляторной нагрузки представлена подсистемой «model of fan» (рис. 3). Коэффициент C выбран равным $0,00045 \text{ Н}\cdot\text{м}/\text{рад}^2$, т.к. при данном коэффициенте момент нагрузки для двигателя RA132SB2 приблизительно равен номинальному. В ка-

честве источника питания ПЧ использован трехфазный источник напряжения блок '400V 50hz'. Функцию автономного инвертора напряжения выполняет блок 'AIN', а силовая часть широтно-импульсной модуляции представляет собой транзисторный мост – блок 'SHIM', выполненный на IGBT транзисторах.

Задатчик интенсивности скорости ротора 'S-func' на выходе формирует S-образный график разгона и торможения в заданном диапазоне. Задатчик интенсивности сформирован на основе логики «если», которая позволяет задавать команды на разгон или торможение (соответственно 0 или 1) электропривода в блоке 'Timer' (рис. 14).

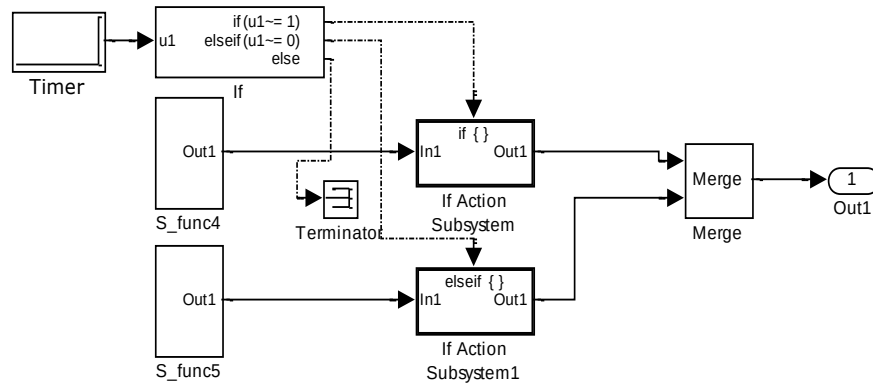


Рисунок 14 – Подсистема блока 'S-func'

Подсистемы формирования S-образных графиков разгона и торможения приведены на рис. 15, где на рис. 15, а представлен блок формирования режима разгона "S_func4", а на рис. 15, б – блок формирования режима торможения "S_func5".

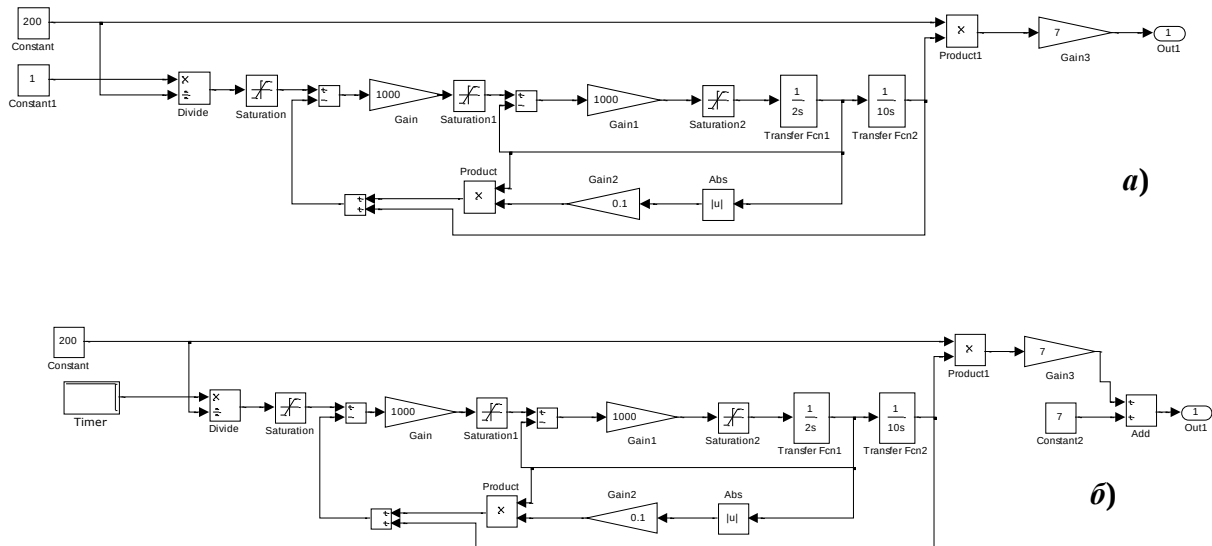


Рисунок 15 – Подсистемы формирования S-образных графиков разгона и торможения

Система векторного управления синтезирована на основе структурной схемы рис. 2 и рассмотренных выше контуров регулирования. На имитационной модели (рис. 13) это подсистема 'Vector Control'. Структура данной подсистемы приведена на рис. 16.

ние электромагнитного момента (рис. 17) двигателя, что положительно сказывается на ресурсе всей системы. На осциллограммах изменения токов статора (рис. 17) видно, что имитационная модель (рис. 13) имеет область неустойчивого режима в диапазоне времени $[0; 0,1]$ секунды. Но, несмотря на это, в целом система отрабатывает заданные сигналы, о чем свидетельствует рассмотренное выше изменение скорости ротора двигателя.

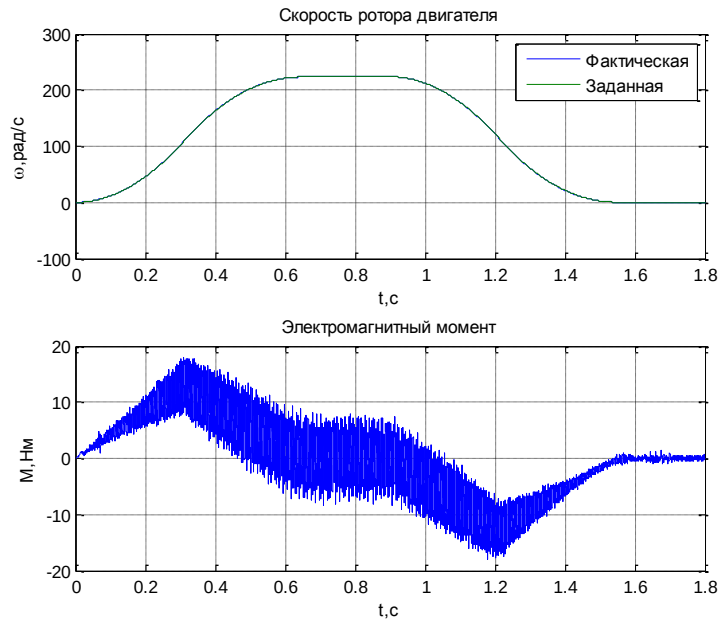


Рисунок 17 – Осциллограммы изменения скорости ротора двигателя и электромагнитного момента

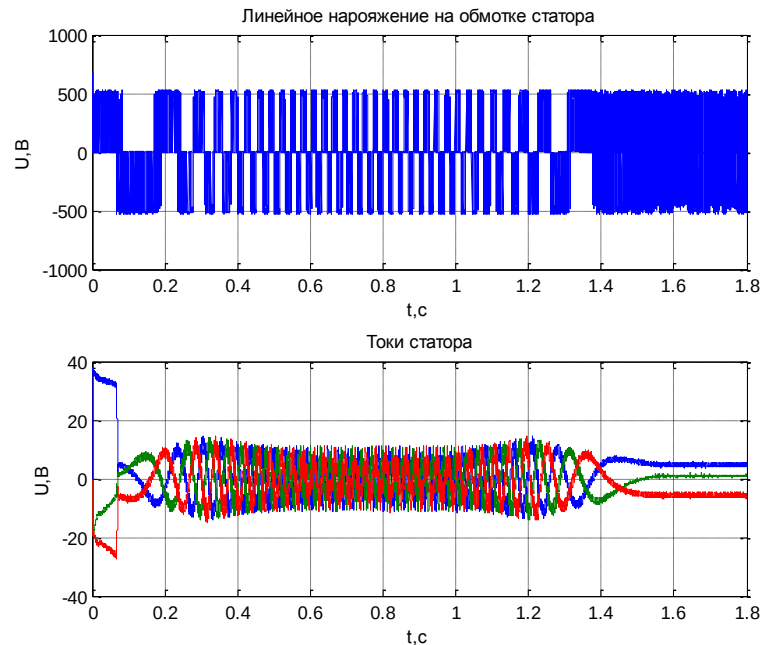


Рисунок 18 – Осциллограммы изменения линейного напряжения на обмотке статора и токов в обмотках статора двигателя

Изменение линейного напряжения на обмотке статора (рис. 18) соответствует применению широтно-импульсной модуляции [13], при этом в данном случае несущая частота ШИМ составляет 1080 Гц.

Влияние вентиляторной нагрузки в частотно-токовом асинхронном электроприводе с векторным управлением (рис. 13) отражается мгновенными значениями изменения скорости ротора и электромагнитного момента двигателя (рис. 19). Опыт проведен аналогично приведенному выше (рис. 17), за исключением диапазона времени моделирования: в данном случае $[0; 0,1]$ секунды.

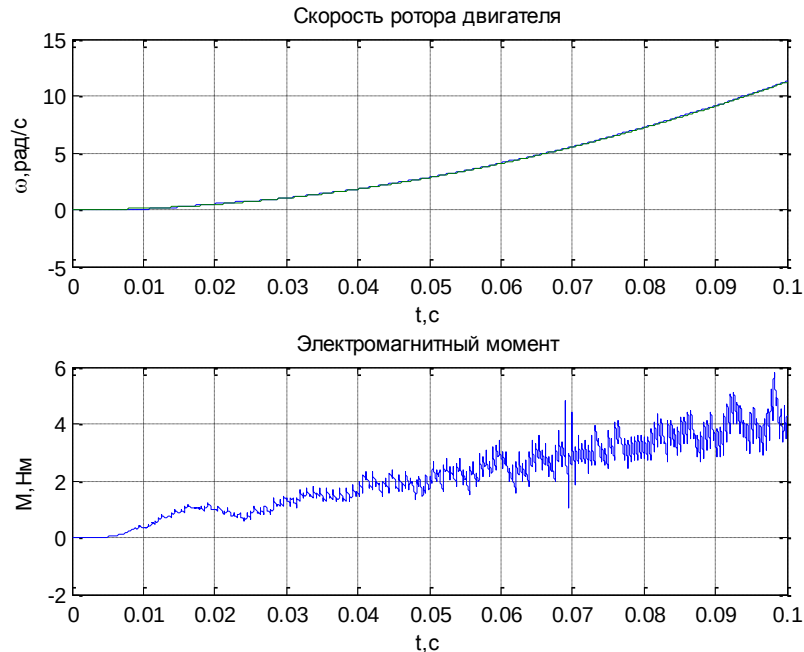


Рис. 19 – Осциллограммы изменения скорости ротора двигателя и электромагнитного момента при пуске с S-образным задатчиком интенсивности

Кроме рассмотренных S-образных задатчиков интенсивности могут быть использованы и линейные задатчики, модель которых представлена на рис. 20.

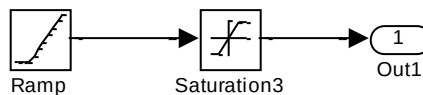


Рисунок 20 – Модель линейного задатчика интенсивности

Данная модель формирует сигнал с максимальной амплитудой $\pm 10\text{В}$, который изменяется линейно по закону:

$$U_3 = k \cdot t, \quad (18)$$

где k – коэффициент, определяющий интенсивность разгона/торможения; t – время моделирования.

Сравнение задатчиков интенсивности проведено на имитационной модели электропривода, показанной на рис. 13, где в качестве линейного задатчика использована модель рис. 20. Так как осциллограммы переходных режимов при разгоне и торможении с одинаковым временем разгона/торможения практически симметричны, то снимаются осциллограммы только в режиме разгона. Полученные осциллограммы изменения скорости ротора двигателя и электромагнитного момента представлены на рис. 21. В обоих случаях время разгона двигателя до установленной скорости 225 рад/с равно 0,65с.

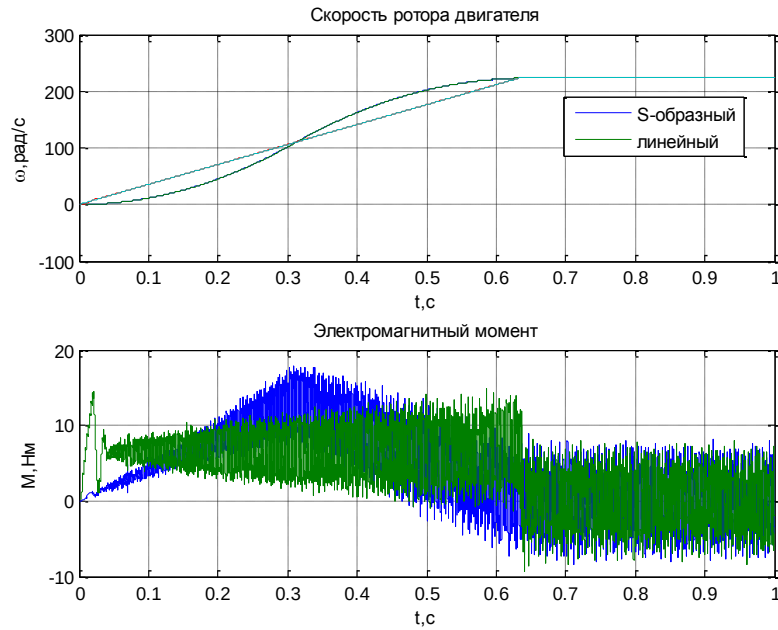


Рисунок 21 – Осциллограммы изменения скорости ротора двигателя и электромагнитного момента в зависимости от вида графика задатчика интенсивности

При этом за время разгона при использовании S-образного задатчика максимальный момент равен 18 Нм, который приходится на середину времени разгона, а при использовании линейного задатчика максимальный момент равен 15 Нм. Видно, что при прочих равных условиях S-образный и линейный задатчики интенсивности обеспечивают примерно одинаковые нагрузки на двигатель при сохранении времени разгона.

Причиной колебаний электромагнитного момента до $t = 0,1$ с при линейном задатчике интенсивности (рис. 21) является рассогласованность сигнала задания скорости, формируемого задатчиками, и его фактическим значением. Осциллограммы изменения сигнала задания и фактического изменения скорости ротора представлены на рис. 22.

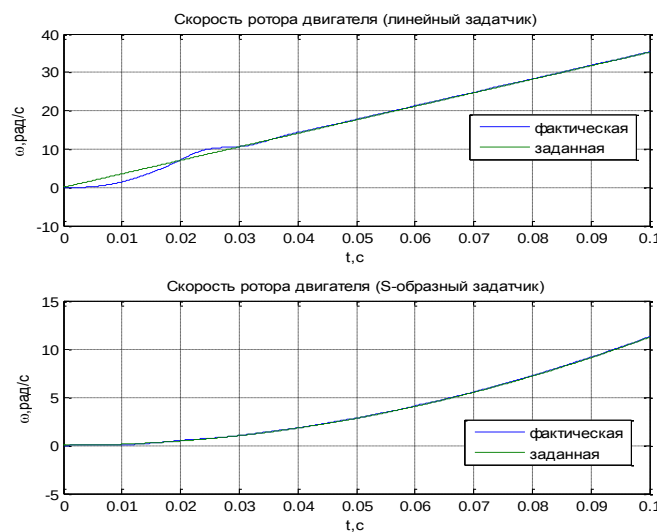


Рисунок 22 – Осциллограммы изменения сигнала задания и фактического изменения скорости ротора при линейном и S-образном задатчике интенсивности

Как видно из рис. 21, применение S-образного задатчика позволяет добиться наименьшей рассогласованности скорости ротора с сигналом задания в сравнении с линейным.

Заключение. Разработаны структурная и соответствующая имитационная модели ПЧ-АД с векторным управлением с вентиляторной нагрузкой, позволяющая моделировать режимы работы ТМ биоэнергетического комплекса и проводить исследования влияния различных факторов на процедуру регулирования частоты вращения их приводного электродвигателя. В частности, получены осциллограммы изменения скорости ротора двигателя и электромагнитного момента в зависимости от вида графика задатчика интенсивности. Изменяя величину коэффициента C (см. (8) и рис. 3), а также параметры приводного электродвигателя (см. табл. 1), можно провести исследование различных типоразмеров ТМ и его ЭП, что позволит осуществлять наиболее рациональный выбор ТМ для электрооборудования БК.

В целом векторное управление асинхронным электроприводом позволяет достичь как высокого диапазона регулирования скорости приводного электродвигателя ТМ, так и высокой точности отработки сигнала задания задатчика интенсивности, что подтверждено результатами моделирования.

Литература

1. Бобович Б. Б., Девяткин В.В. Переработка отходов производства и потребления. – М.: Интермет инжиниринг, 2000. – 495 с.
2. Сидоренко О.Д. Биоконверсия отходов агропромышленного комплекса. – М.: Инфра-М, 2018. – 160 с.
3. Форстер К.Ф., Джонстон Д.В.М., Барнес Д. и др. Экологическая биотехнология. – Л.: Химия. Ленингр. отд-ние, 1990. – 383 с.
4. Веденеев, А.Г., Веденеева Т. А. Биогазовые технологии в Кыргызской республике. – Б.: Типография «Евро», 2006. – 90 с.
5. Шомин А.А. Биогаз на сельском подворье. – М.: Балаклея, 2002. – 68 с.
6. Степанова В. Э. Возобновляемые источники энергии на сельскохозяйственных предприятиях. – М.: Агропромиздат, 1989. – 112 с.
7. Бочкарев И.В., Сандыбаева А.Р., Багиев Х.Г. Система управления электроприводом биоэнергетического комплекса // Проблемы автоматизации и управления, 2020, №1 (38). – С. 33–42.
8. Герман-Галкин С.Г. Matlab & Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. – СПб.: КОРОНА-Век, 2008. – 368 с.
9. Основные технические характеристики электродвигателей серии RA. [Электронный каталог] URL: http://megavattspb.ru/tehnicheskie_harakteristiki_ra.html. [Дата обращения 07.12.2020].
10. Терехин В.Б. Компьютерное моделирование систем электропривода постоянного и переменного тока в Simulink. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 307 с.
11. Терехин В.Б. Разработка моделей элементов и систем автоматизированного электропривода в среде Matlab. – Северск: СТИ НИЯУ МИФИ, 2017. – 511 с.
12. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В. Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов. Часть 1. Введение в технику регулирования линейных систем. Часть 2. Оптимизация контура регулирования. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 156 с.
13. Усольцев А.А. Частотное управление асинхронными двигателями. – СПб: СПбГУ ИТМО, 2006. – 94 с.

УДК 517.962.2

Ю.В. Анищенко, А.Дж. Сатыбаев

Ошский технологический университет

programm85@gmail.com, abdu-satybaev@mail.ru

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ И КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ ЗАДАЧ УРАВНЕНИЯ ГЕОЭЛЕКТРИКИ

Актуальность описанных в статье результатов исследования заключается в необходимости обоснования и создания устойчивого численного метода решения одномерных прямых и обратных задач уравнения геоэлектрики, а также в компьютерной реализации данных задач. Цель достигнута путем рассмотрения и построения численного решения определения коэффициентов уравнения. Разработан алгоритм решения задачи на основе конечно-разностного метода. Проведена компьютерная реализация решения для различных тестовых модельных функций. Получены результаты в виде графиков. Полученные в ходе исследования результаты и выводы могут быть использованы при рассмотрении аналогичных задач. Программа для компьютерной реализации решения была составлена на языке Object Pascal (Delphi XE7). В программе вводятся данные для построения сеточной области, выбираются модельные значения для коэффициентов уравнения геоэлектрики, и вычисление производится по описанному в статье алгоритму.

Ключевые слова: прямая задача, обратная задача, уравнение геоэлектрики, конечно-разностный метод, сходимость решения, алгоритм, одномерная, компьютерная реализация, электропроводимость среды, диэлектрическая и магнитная проницаемость.

Введение. Определение коэффициентов обратных задач уравнения геоэлектрики, которые описывают свойства среды и параметры объекта (например, электромагнитные), по некоторой дополнительной информации имеют большое практическое значение при интерпретации геофизических данных. Рассматриваемая в работе задача относится к обратной динамической задаче для гиперболических уравнений. В таких задачах в качестве дополнительной информации задается след решения соответствующей прямой задачи на некоторой времениподобной поверхности.

Динамические обратные задачи для гиперболических уравнений были исследованы М.М. Лаврентьевым и В.Г. Романовым [1, 2], А.С. Благовещенским [3], А.С. Алексеевым [4]. А развитая В.Г. Романовым методика доказательства локальных теорем существования и единственности решения обратных динамических задач, а также теорем единственности и условной устойчивости в «целом» применяется в исследовании широкого круга обратных задач С.И. Кабанихиным и их учениками.

Разные типы задач, трудности, связанные с некорректностью постановок, различные варианты задания дополнительной информации — всё это обуславливает наличие широкого класса численных методов решения обратных задач.

В данной работе для численного решения поставленной задачи используется метод обращения разностной схемы [5, 6]. Он заключается в замене обратной задачи конечно-разностным аналогом. Затем, решив полученную систему нелинейных алгебраических уравнений, можно получить приближённое решение исходной обратной задачи.

Постановка задачи. Необходимо определить электропроводимость среды $\sigma_0(x_3)$ в одномерной обратной задаче уравнения геоэлектрики [7]:

$$\frac{\partial^2 u_0(x_3, t)}{\partial t^2} = \frac{1}{\varepsilon_0(x_3)\mu_0(x_3)} \left[\frac{\partial^2 u_0(x_3, t)}{\partial x^2} + \frac{\mu'_{0x_3}(x_3)}{\mu_0(x_3)} \cdot \frac{\partial u_0(x_3, t)}{\partial x_3} \right] - \frac{\sigma_0(x_3)}{\varepsilon_0(x_3)} \cdot \frac{\partial u_0(x_3, t)}{\partial t}, \quad (1)$$

$$x_3 \in (0, d), \quad t \in (0, T),$$

$$u_0(x_3, t)|_{t=0} \equiv 0, \quad u'_{0x_3}(x_3, t)|_{x_3=0} = -\frac{1}{2}\delta(t) + \tau_0\theta(t), \quad (2)$$

$$u_0(x_3, t)|_{x_3=0} = f(t), \quad t \in [0, T], \quad (3)$$

где $\varepsilon_0(x_3)$, $\mu_0(x_3)$ – диэлектрическая и магнитная проницаемости, $u_0(x_3, t)$ – распространение электромагнитных волн в среде, $\delta(t), \theta(t)$ – дельта-функция Дирака и тета-функция Хевисайда, $f(t)$ – заданная дополнительная функция для обратной задачи, τ_0, T – заданные положительные постоянные.

Для решения обратной задачи относительно коэффициентов предположим, что выполнено условие [7]

$$(\mu_0(x_3), \varepsilon_0(x_3), \sigma_0(x_3)) \in \Lambda_0, \quad (4)$$

где $\Lambda_0 = \sigma_0(x_3) \in C^6(R_+), \sigma'_{0x_3}(+0) = 0, 0 < M_1 \leq \sigma_0(x_3) \leq M_2, \|\sigma_0(x_3)\|_{C^2} \leq M_3$, здесь M_1, M_2, M_3 – положительные постоянные.

Введем обозначение: $\varepsilon_0(x_3)\mu_0(x_3) = r^2(x_3)$ отсюда $r(x_3) = \sqrt{\varepsilon_0(x_3)\mu_0(x_3)}$. Применим к задаче (1)–(3) метод выпрямления характеристик [8], введя новую переменную и новые функции:

$$x(x_3) = \int_0^{x_3} \sqrt{\varepsilon_0(\lambda)\mu_0(\lambda)} d\lambda \Rightarrow x(x_3) = \int_0^{x_3} r(\xi) d\xi, \quad (5)$$

$$a(x(x_3)) = \varepsilon_0(x_3), \quad b(x(x_3)) = \mu_0(x_3), \quad d(x(x_3)) = \sigma_0(x_3), \quad u(x(x_3), t) = u_0(x_3, t).$$

Чтобы замена переменной $x(x_3)$ была вырожденной, должно быть выполнено следующее условие [8]:

$$x(0) = 0, \quad x(x_3) > 0, \quad \lim_{x_3 \rightarrow \infty} x(x_3) = 0. \quad (6)$$

Произведем выкладки:

$$x'_{x_3}(x_3) = r(x_3), \quad x''_{x_3x_3}(x_3) = r'_{x_3}(x(x_3)), \quad r'_{x_3}(x(x_3)) = r'_x(x) \cdot x'_3 = r'_x(x) \cdot r(x),$$

$$u_{0t}(x_3, t) = u_t(x, t), \quad u_{0tt}(x_3, t) = u_{tt}(x, t), \quad u'_{0x_3}(x_3, t) = u'_x(x_3, t) \cdot x'_{x_3}(x_3),$$

$$\mu_{0x_3}(x_3) = \mu'_x(x) \cdot x'_3(x_3) = \mu'_x(x) \cdot r(x_3),$$

$$u''_{0x_3x_3}(x_3, t) = u_{xx}(x_3, t) \cdot (x'_{x_3}(x_3))^2 + u_x(x, t) \cdot x''_{x_3x_3}(x_3).$$

В результате получаем следующую обратную задачу:

$$\left. \begin{aligned} u_{tt}(x, t) &= \frac{1}{r^2(x)} \left[r^2(x) u_{xx}(x, t) + \left(\frac{r'(x)}{r(x)} u_x(x, t) + \frac{b'(x) \cdot r(x)}{b(x)} u_x(x, t) \right) \cdot r^2(x) \right] - \frac{d(x)}{a(x)} u_t(x, t) = \\ &= u_{xx}(x, t) + \frac{r'(x)}{r(x)} u_x(x, t) + \frac{b'(x)}{b(x)} u_x(x, t) - \frac{d(x)}{a(x)} u_t(x, t), \quad x \in (0, d), \quad t \in (0, T), \\ u(x, t)|_{t=0} &\equiv 0, \quad u_x(x, t)|_{x=0} = -\frac{1}{2\sqrt{a(0)b(0)}} [\delta(t) + \tau_{0\theta}(t)], \\ u(x, t)|_{x=0} &= f(t), \quad t \in [0, T] \end{aligned} \right\} (7)$$

Выделим особенности решения по методике В.Г. Романова [9], представляя решение задачи (7) в виде

$$u(x, t) = \tilde{u}(x, t) + S(x)\theta(t - |x|) + R(x)\theta_1(t - |x|), \quad t \in R, \quad x \in R, \quad (8)$$

где $\tilde{u}(x, t)$ – непрерывная гладкая функция, $\theta_1(t) = t\theta_1(t)$.

Произведем некоторые выкладки:

$$\begin{aligned} u'_t(x, t) &= \tilde{u}'_t(x, t) + S(x)\delta(t - |x|) + R(x)\theta(t - |x|), \\ u''_{tt}(x, t) &= \tilde{u}''_{tt}(x, t) + S(x)\delta'_t(t - |x|) + R(x)\delta(t - |x|), \\ u'_x(x, t) &= \tilde{u}'_x(x, t) + S'_x(x)\theta(t - |x|) - S(x)\delta(t - |x|) + R'(x)\theta_1(t - |x|) - R(x)\theta(t - |x|), \\ u''_{xx}(x, t) &= \tilde{u}''_{xx}(x, t) + S''_{xx}(x)\theta(t - |x|) - 2S'_x(x)\delta(t - |x|) + S(x)\delta'_x(t - |x|) + \\ &+ R''_{xx}(x)\theta_1(t - |x|) - 2R'(x)\theta(t - |x|) + R(x)\delta(t - |x|). \end{aligned}$$

Полученные выкладки подставляем в уравнение (7)

$$\begin{aligned} \tilde{u}''_{tt}(x, t) + S(x)\delta'_t(t - |x|) + R(x)\delta(t - |x|) = \\ u''_{xx}(x, t) + S''_{xx}(x)\theta(t - |x|) - 2S'_x(x)\delta(t - |x|) + S(x)\delta'_x(t - |x|) + R''_{xx}(x)\theta_1(t - |x|) - 2R'_x(x)\theta(t - |x|) + \\ + R(x)\delta(t - |x|) + \left[\frac{r'(x)}{r(x)} + \frac{b'(x)}{b(x)} \right] \left[\tilde{u}'_x(x, t) + S'_x(x)\theta(t - |x|) - S(x)\delta(t - |x|) + R'_x(x)\theta(t - |x|) - \right. \\ \left. - R(x)\theta(t - |x|) \right] - \frac{d(x)}{a(x)} \left[\tilde{u}'_t(x, t) + S(x)\delta(t - |x|) + R(x)\theta(t - |x|) \right]. \end{aligned}$$

При одинаковых коэффициентах $\delta(t - |x|), \theta(t - |x|), \theta_1(t - |x|)$ имеем следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \delta(t - |x|): \quad -2S'(x) + \left[\frac{r'(x)}{r(x)} + \frac{b'(x)}{b(x)} \right] S(x) + \frac{d(x)}{a(x)} S(x) = 0, \\ -2\frac{S'(x)}{S(x)} = \frac{r'(x)}{r(x)} + \frac{b'(x)}{b(x)} + \frac{d(x)}{a(x)}. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\theta(t - |x|): \quad S''(x) - 2R'(x) + \left[\frac{r'(x)}{r(x)} + \frac{b'(x)}{b(x)} \right] S'(x) - R(x) - \frac{d(x)}{a(x)} R(x) = 0,$$

$$2R'(x) + \left[\frac{r'(x)}{r(x)} + \frac{b'(x)}{b(x)} + \frac{d(x)}{a(x)} \right] R(x) = S''(x) + \left[\frac{r'(x)}{r(x)} + \frac{b'(x)}{b(x)} \right] S'(x). \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \theta_1(t-|x|): \quad R''(x) + \left[\frac{r'(x)}{r(x)} + \frac{b'(x)}{b(x)} \right] R'(x) &= 0, \\ -\frac{R''(x)}{R'(x)} &= \left[\frac{r'(x)}{r(x)} + \frac{b'(x)}{b(x)} \right]. \end{aligned} \quad (11)$$

Из уравнения (9) получаем:

$$d(x) = \left\{ -2 \frac{S'(x)}{S(x)} - \frac{r'(x)}{r(x)} - \frac{b'(x)}{b(x)} \right\} \cdot a(x) \Rightarrow d(x) = \left\{ -2 \frac{S'(x)}{S(x)} - \frac{\sqrt{a(x)b(x)}'}{\sqrt{a(x)b(x)}} - \frac{b'(x)}{b(x)} \right\} \cdot a(x). \quad (12)$$

Из уравнения (11) имеем:

$$\begin{aligned} T'(x) &= R''(x), \quad T(x) = R'(x), \\ \frac{T'(x)}{T(x)} &= \left[\frac{r'(x)}{r(x)} + \frac{b'(x)}{b(x)} \right]. \end{aligned}$$

Теперь проинтегрируем полученное выше уравнение:

$$\begin{aligned} \ln T(x) &= -\ln r(x) - \ln b(x) = \ln r^{-1}(x) + \ln b^{-1}(x) = \ln \frac{1}{r(x)} + \ln \frac{1}{b(x)} = \ln \frac{1}{r(x)b(x)}, \\ T(x) &= R'(x) = \frac{1}{r(x)b(x)}, \end{aligned}$$

$$R(x) = \int_0^x \frac{1}{r(\lambda)b(\lambda)} d\lambda = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{a(\lambda)b(\lambda)} \cdot b(\lambda)} d\lambda. \quad (13)$$

Подставляем (13) в (10) и получаем:

$$2 \frac{1}{r(x)b(x)} + \left[\frac{r'(x)}{r(x)} + \frac{b'(x)}{b(x)} + \frac{d(x)}{a(x)} \right] \cdot \int_0^x \frac{1}{r(\lambda)b(\lambda)} d\lambda = S''(x) + \left[\frac{r'(x)}{r(x)} + \frac{b'(x)}{b(x)} \right] S'(x).$$

Проинтегрируем уравнение (9):

$$\begin{aligned} 2 \int_0^x \frac{S'(\lambda)}{S(\lambda)} d\lambda + \int_0^x \frac{r'(\lambda)}{r(\lambda)} d\lambda + \int_0^x \frac{b'(\lambda)}{b(\lambda)} d\lambda + \int_0^x \frac{d(\lambda)}{a(\lambda)} d\lambda \\ 2 \ln S(x) + \ln r(x) + \ln b(x) + \ln e^{\int_0^x \frac{d(\lambda)}{a(\lambda)} d\lambda} &= const \\ \ln S^2(x) \cdot r(x) \cdot b(x) \cdot e^{\int_0^x \frac{d(\lambda)}{a(\lambda)} d\lambda} &= \ln const \\ -2 \ln S(x) = \ln r(x) + \ln b(x) + \ln e^{\int_0^x \frac{d(\lambda)}{a(\lambda)} d\lambda} &\Rightarrow \ln S^{-2}(x) = \ln \left[r(x) \cdot b(x) \cdot e^{\int_0^x \frac{d(\lambda)}{a(\lambda)} d\lambda} \right] \\ S^2(x) \cdot r(x) \cdot b(x) \cdot e^{\int_0^x \frac{d(\lambda)}{a(\lambda)} d\lambda} = 1 &\Rightarrow S^2(x) \cdot \sqrt{a(x)b(x)} \cdot b(x) \cdot e^{\int_0^x \frac{d(\lambda)}{a(\lambda)} d\lambda} = 1 \Rightarrow \\ \Rightarrow S^4(x) a(x) b^3(x) e^{2 \int_0^x \frac{d(\lambda)}{a(\lambda)} d\lambda} &= 1^2 = 1. \end{aligned}$$

$$b^3(x) = \frac{1}{S^4(x)a(x)e^{2\int_0^x \frac{d(\lambda)}{a(\lambda)} d\lambda}} \Rightarrow b(x) = \sqrt[3]{\frac{1}{S^4(x)a(x)e^{2\int_0^x \frac{d(\lambda)}{a(\lambda)} d\lambda}}}. \quad (14)$$

Из (14) получаем:

$$S^2(x) = \frac{1}{\sqrt{a(x)b(x)} \cdot b(x) \exp\left[\int_0^x \frac{d(x)}{a(x)} dx\right]} \Rightarrow S(x) = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{a(x)b(x)} \cdot b(x) e^{\int_0^x \frac{d(x)}{a(x)} dx}}}. \quad (15)$$

Таким образом, функцию $S(x)$ определяем по формуле (15), неизвестную функцию $d(x)$ определим по формуле (12), а неизвестную функцию $b(x)$ определим по формуле (14).

Если учесть все выше изложенное, то из обратной задачи (7) имеем следующую обратную задачу с данными на характеристиках относительно $S(x)$.

$$\left. \begin{aligned} u_{tt}(x, t) &= u_{xx}(x, t) - \left[2 \frac{S'(x)}{S(x)} + \frac{d(x)}{a(x)} \right] u_x(x, t) - \frac{d(x)}{a(x)} u_t(x, t), \\ u(x, t)|_{t=|x|} &= S(x), \quad x \in [0, T], \end{aligned} \right\}, \quad (16)$$

$$u(x, t)|_{x=0} = f(t), \quad t \in [0, T]. \quad (17)$$

Обратная задача заключается в определении функции $d(x)$ — электропроводимости среды при известных функциях $b(x), a(x)$. В силу гиперболичности уравнения и от того, что динамическая дополнительная информация $f(t)$ задана на $[0, 2T]$, наша задача рассматривается в области

$$\Delta(T) = (x, t) : x \in (0, T), |x| < t < 2T - |x|. \quad (18)$$

Конечно-разностное решение. Для численного решения обратной задачи (15) введем сеточную область:

$$\Delta_h(2T) = \{x_i = ih, t_k = kh, h = T / 2N, i = \overline{0, N}, ih \leq kh \leq T - ih\}, \quad (19)$$

и построим разностный аналог дифференциальной обратной задачи (16)–(17):

$$\frac{V_{i+1}^k - 2V_i^k + V_{i-1}^k}{h^2} = \frac{V_i^{k+1} - 2V_i^k + V_i^{k-1}}{h^2} - \left[2 \frac{S_i - S_{i-1}}{hS_{i-1}} + \frac{d_i}{a_i} \right] \cdot \left[\frac{V_i^k - V_{i-1}^k}{h} \right] - \frac{d_i}{a_i} \cdot \left[\frac{V_i^k - V_i^{k-1}}{h/2} \right], \quad (20)$$

$$(x_i, t_k) \in \Delta_h(2T),$$

$$V_i^i = S_i, \quad ih \in (0, Nh), \quad (21)$$

$$V_0^k = f^k, \quad kh \in (0, 2Nh). \quad (22)$$

Также составим разностный аналог формулы (14) для определения неизвестной функции:

$$b_i = \sqrt[3]{\frac{1}{S_i^4 a_i e^{2 \cdot \text{int}(i)}}}, \quad i = \overline{0, N}. \quad (23)$$

где $\text{int}(i)$ – численное решение интеграла $\int_0^x \frac{d(\lambda)}{a(\lambda)} d\lambda$.

Напишем разностный аналог для определения функций $S(x), d(x)$

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{a_i b_i} \cdot b_i e^{\text{int}(i)}}}, \quad i = \overline{0, N}, \quad (24)$$

$$d_i = \left\{ -2 \frac{S_i - S_{i-1}}{h S_{i-1}} - \frac{\sqrt{a(x)b(x)}'}{\sqrt{a_i b_i}} - \frac{b_i - b_{i-1}}{h b_{i-1}} \right\} \cdot a_i, \quad i = \overline{0, N}. \quad (25)$$

Обозначим через $r_i = \frac{\sqrt{a(x)b(x)}'}{\sqrt{a_i b_i}}$, получим:

$$d_i = \left\{ -2 \frac{S_i - S_{i-1}}{h S_{i-1}} - \frac{r_i - r_{i-1}}{h r_{i-1}} - \frac{b_i - b_{i-1}}{h b_{i-1}} \right\} \cdot a_i, \quad i = \overline{0, N}.$$

Компьютерная реализация. Для реализации были заданы разные модельные функции $\mu_0 x_3$, $\sigma_0 x_3$, $\varepsilon_0 x_3$, которые приведены в таблице 1.

Таблица 1

№ п/ п	№ Рис.	Функции			Шаг сетки	Относит. погреш.	Абсолют. погреш.
		σx	μx	εx			
1.	Рис.1	$0.05 \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$	$4\pi \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$	$8.854 \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$	0.01	0,629238	1,548525
2.	Рис.2	Ступенчатая функция	$4\pi \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$	$8.854 \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$	0.0025	11,335828	8,810785
3.	Рис.3	$0.5 \cdot (1 + \cos^2 6.28x)$	$4\pi \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$	$8.854 \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$	0.005	4,681961	2,169048
4.	Рис.4	$0.006 \cdot (1 + \cos^2 6.28x)$	$4\pi \cdot (1 + \cos^2 6.28x)$	$8.854 \cdot (1 + \cos^4 3.14x)$	0.01	0,007108	0,321754
5.	Рис.5	$0.5 \cdot (1 + \cos^4 6.28x)$	$4\pi \cdot (1 + \cos^4 3.14x)$	$8.854 \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$	0.005	10,022345	1,947920

Далее по (5) перешли на новые переменные и получили новые функции $d(x) = \sigma_0 x_3$, $b(x) = \mu_0(x_3)$, $a(x) = \varepsilon_0(x_3)$.

Прямая задача. Определяем по (24) S_i , $i = \overline{0, N}$ – задачу с данными на характеристиках. Значения S_i присваиваем V_i^i , $i = \overline{0, N}$, т.е. определяем значения V на характеристиках. По формуле Тэйлора определяем V_i^{i+1} , а затем вычисляем V_i^{k+1} – прямая задача.

Обратная задача. Из решения прямой задачи V_i^k определяем дополнительную информацию для обратной задачи: $f^k = V_0^k$, $k = 0, 2N$ – это нулевой слой.

Первый слой вычисляем по формуле $V_1^k = (f^{k+1} + f^{k-1}) / 2$. Начиная со второго слоя $k = 2$ обратная задача вычисляется по (20).

При определении последующего слоя обратной задачи каждый раз мы по (21) определяем значение S_i , $i = \overline{0, N}$, в исходном коде программы они обозначены через Sp_i , $i = \overline{0, N}$.

Так как приближенная сеточная функция Sp_i , $i = \overline{0, N}$ определена, то по (23) и (25) можно вычислить сеточные приближенные функции bp_i, dp_i , $i = \overline{0, N}$, неизвестные функции μ_i, σ_i - соответственно.

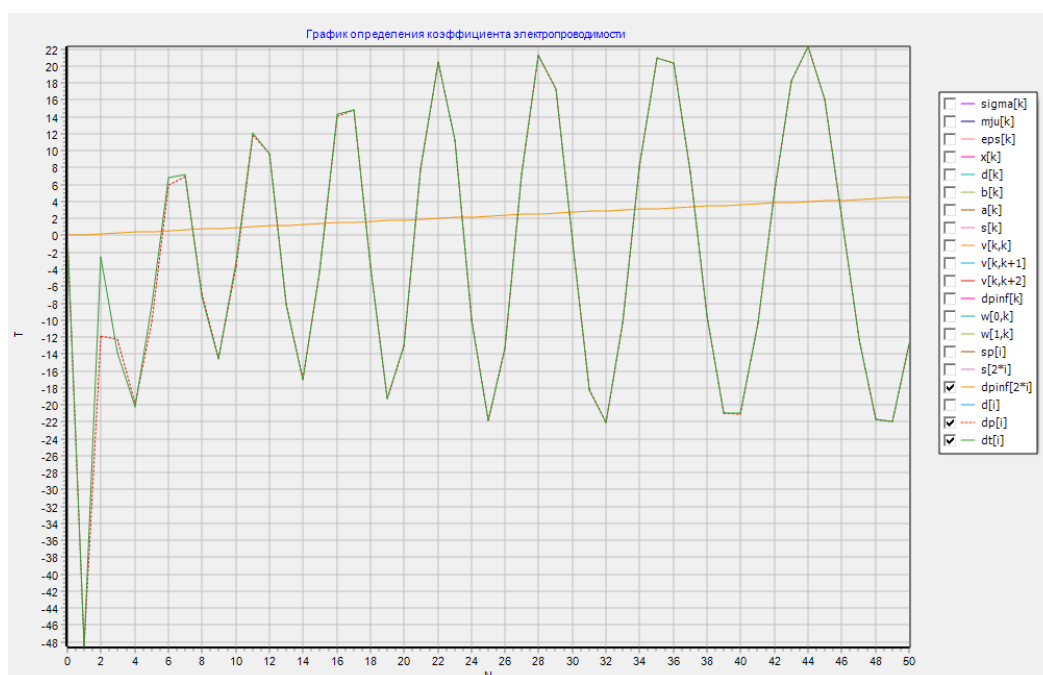


Рисунок 1 – Графики функций $dpinf(x)$ – дополнительная информация для обратной задачи; $\sigma_x = 0.05 \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$; при $\mu_x = 4\pi \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$; $\varepsilon_x = 8.854 \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$; $\tau = 0.01$

Одномерная обратная задача для уравнения геоэлектрики (1)-(3) реализована для функций, указанных в таблице 1, определена функция σ_x .

На рис. 1. – рис. 5. приведены графики $f_t = V(0, t)$ – дополнительная информация для обратной задачи, dp_i, dt_i – приближенная и точная определяемая функция.

Были заданы различные шаги сетки (см. таблицу 1). В двух последних столбцах приведены результаты относительной погрешности, т.е. $\max 1 = (Sp_i - S_i) \cdot 100\% / Sp_i$, $i = \overline{0, N}$ – данные на характеристиках, где Sp_i – приближенные, S_i – точные сеточные функции и результаты абсолютной погрешности неизвестной функции σ_x , т.е. $\max 2 = |dp_i - dt_i|$; $i = \overline{0, N}$, где dp_i – приближенно вычисленные сеточные функции, dt_i – точные сеточные функции.

Из этих данных можно заметить, что при $T=4$ и при шаге $\tau = 0,01$ восстановление неизвестной функции лучше, чем при $T=2$ с шагом $\tau = 0,005$.

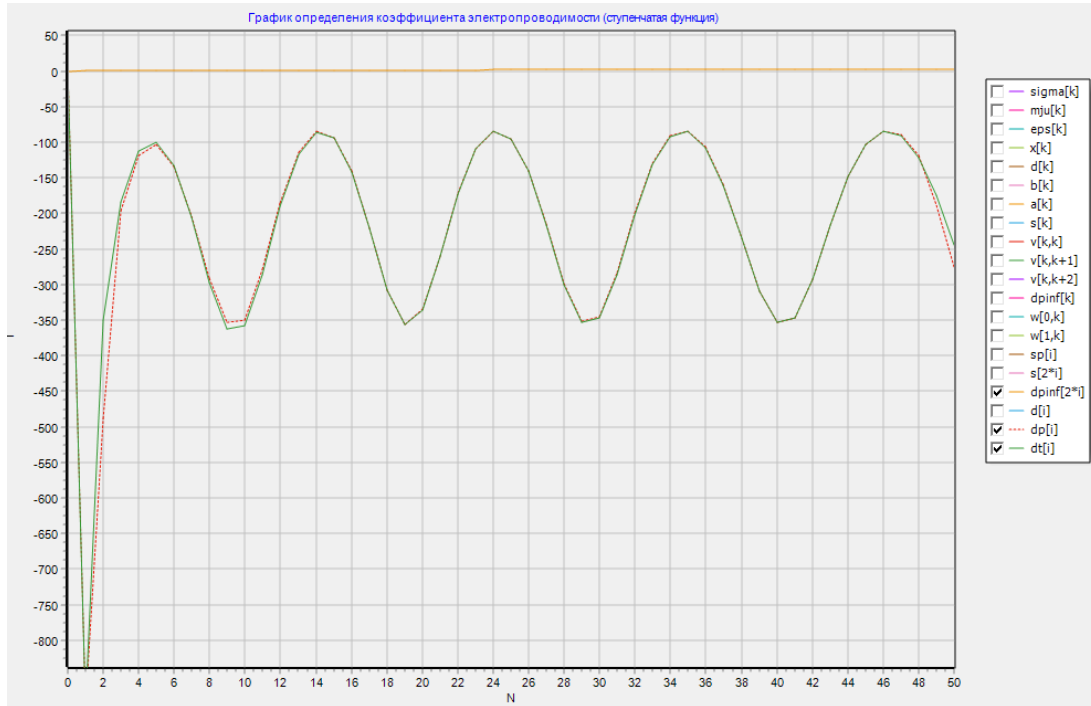


Рисунок 2 – Графики функций $dpinf(x)$ – дополнительная информация для обратной задачи; σ_x = Ступенчатая функция; при $\mu_x = 4\pi \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$; $\varepsilon_x = 8.854 \cdot (1 + \cos^2 6.28x)$; $\tau = 0.0025$

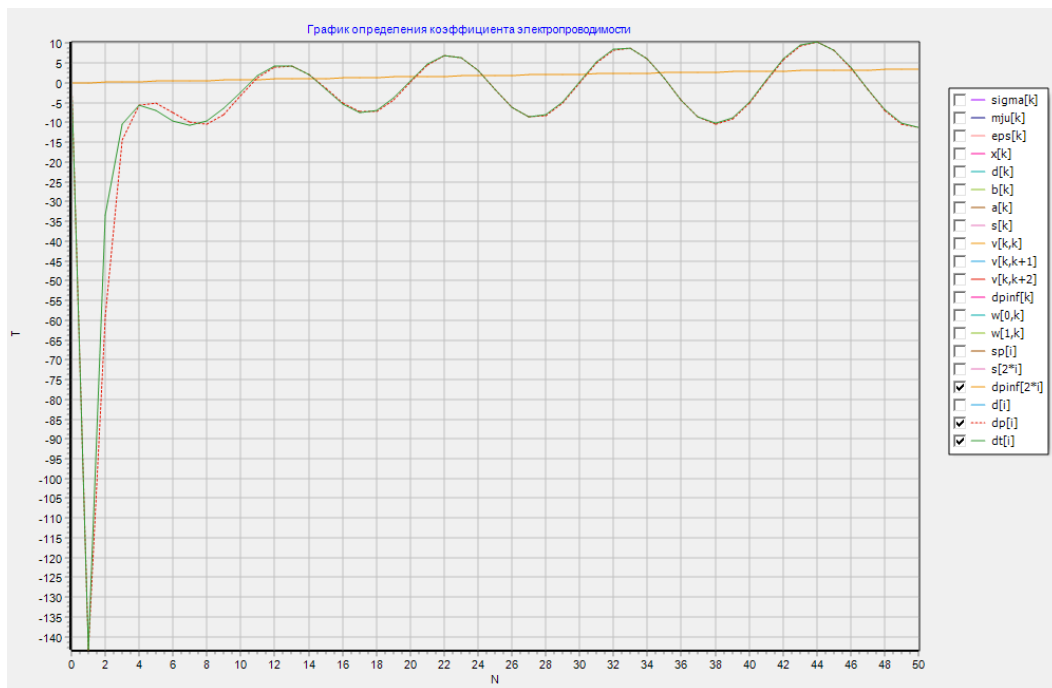


Рисунок 3 – Графики функций $dpinf(x)$ – дополнительная информация для обратной задачи; $\sigma_x = 0.5 \cdot (1 + \cos^2 6.28x)$; при $\mu_x = 4\pi \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$; $\varepsilon_x = 8.854 \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$; $\tau = 0.005$

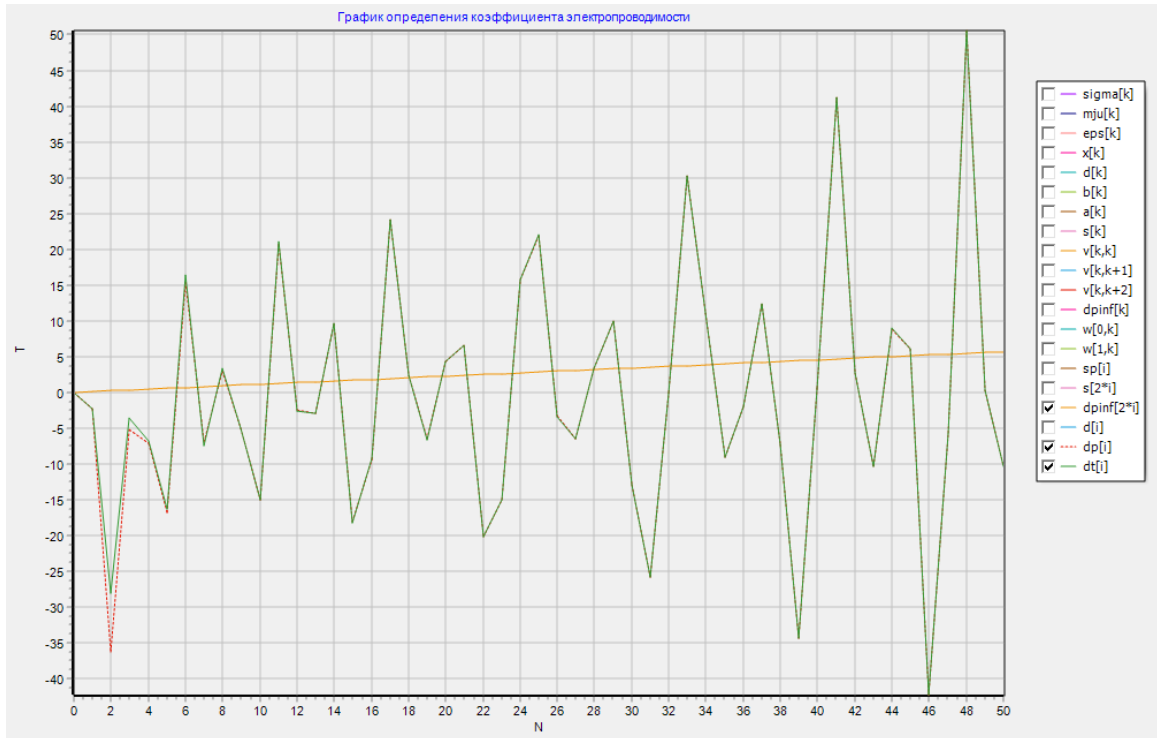


Рисунок 4 – Графики функций $dpinf(x)$ – дополнительная информация для обратной задачи; $\sigma_x = 0.006 \cdot (1 + \cos^2 6.28x)$; при $\mu_x = 4\pi \cdot (1 + \cos^2 6.28x)$; $\varepsilon_x = 8.854 \cdot (1 + \cos^4 3.14x)$; $\tau = 0.01$

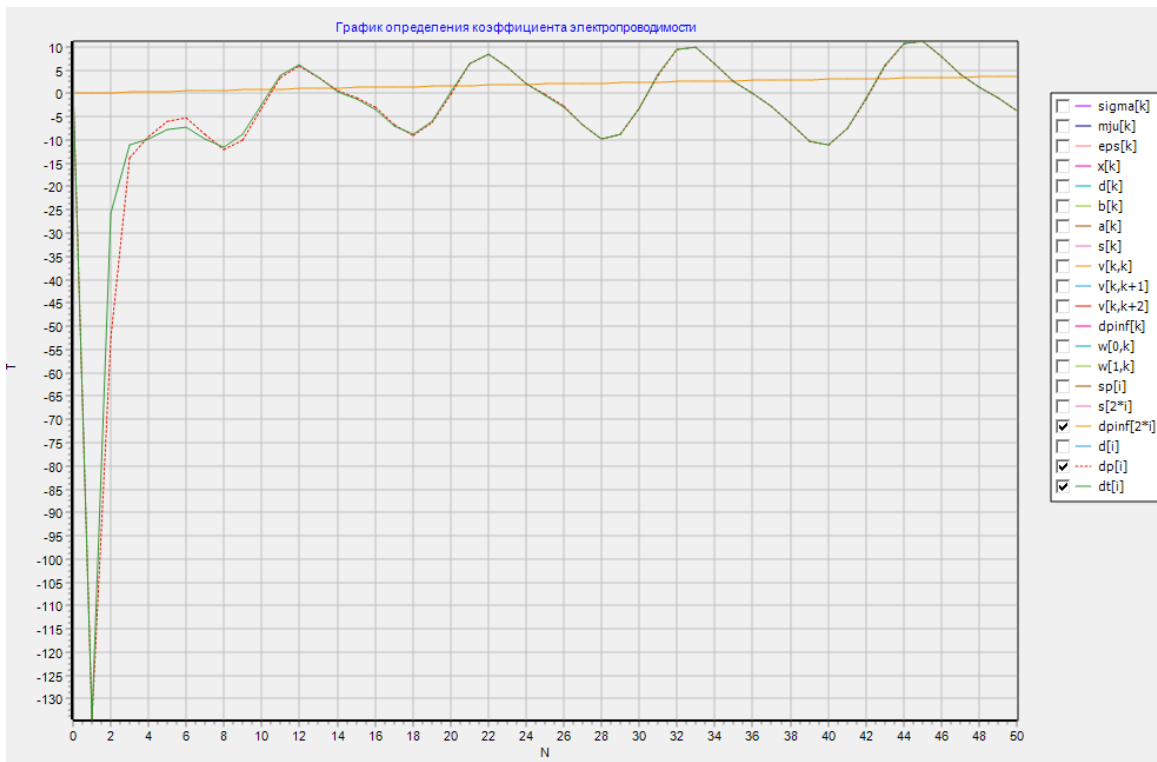


Рисунок 5 – Графики функций $dpinf(x)$ – дополнительная информация для обратной задачи; $\sigma_x = 0.5 \cdot (1 + \cos^4 3.14x)$; при $\mu_x = 4\pi \cdot (1 + \cos^4 3.14x)$; $\varepsilon_x = 8.854 \cdot (1 + \cos^2 3.14x)$; $\tau = 0.005$

Заключение. Составлен конечно-разностный алгоритм решения одномерной прямой и обратной задач и разработана численная компьютерная реализация на языке Object Pascal (Delphi XE7), результаты которой получены в виде графиков. Проведен анализ численного решения определения неизвестных коэффициентов в обратной задаче геоэлектрики.

Литература

1. Лаврентьев, М.М. О некоторых некорректных задачах математической физики [Текст] / М.М. Лаврентьев. – Новосибирск: Изд-во СО АН СССР, 1962. – 92 с.
2. Лаврентьев, М.М. О трех линеаризованных обратных задачах для гиперболических уравнений [Текст] / М. М. Лаврентьев, В. Г. Романов // Докл. АН СССР. – Т. 171. – № 6. – 1966. – С. 1279–1281.
3. Благовещенский, А.С. Об обратной задаче теории распространения сейсмических волн [Текст] / А.С. Благовещенский // Тр. Ленингр. ун-та. – Вып. 1. – 1966. – С. 68–81.
4. Алексеев, А.С. Обратные динамические задачи сейсмологии [Текст] / А.С. Алексеев // Некоторые методы и алгоритмы интерпретации геофизических данных. – М.: Наука. 1967. – С. 9–84.
5. Алексеев, А.С. Некоторые вопросы практического использования обратных динамических задач сейсмологии [Текст] / А.С. Алексеев, В.И. Добринский // Математические проблемы геофизики. АН СССР. Сиб. отд-ние. Вычислительный центр. Новосибирск. – 1975. – Т. 6. – № 2. – С. 7–53.
6. Кабанихин, С.И. Исследование проекционно-разностного метода решения прямой и обратной задачи геоэлектрики [Текст] / С.И.Кабанихин, С.В.Мартаков; ИМ СО АН СССР.– Новосибирск, 1989.–52с.– Препр., №13.
7. Анищенко, Ю.В. Об одном конечно-разностном алгоритме определения магнитной проницаемости в одномерной задаче уравнения геоэлектрики с мгновенным и шнуровым источниками [Текст] / Ю. В. Анищенко. – Известия ВУЗов (Кыргызстан). – 2015. – № 11. – С. 12–18.
8. Кабанихин, С.И. Обратные и некорректные задачи [Текст] / С.И.Кабанихин. – Новосибирск: Сибирское научное издательство, 2009. – 457 с.
9. Романов, В.Г. Устойчивость в обратных задачах [Текст] / В.Г. Романов. – М.: Научный мир, 200. – 304 с.

СОДЕРЖАНИЕ

**ПАМЯТИ АКАДЕМИКА НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ
РЕСПУБЛИКИ ЖАНЫБЕКА ШАРШЕНАЛИЕВА** Исмаилов Бактыбек Искакович.....3

УПРАВЛЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

**К ВОПРОСУ ОБ УПРАВЛЕНИИ «ПАРАМЕТРОМ ПОРЯДКА» ПОВЕДЕНИЕМ
НЕЛИНЕЙНЫХ ДИССИПАТИВНЫХ И РАЗНОТЕМПОВЫХ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ** Шаршеналиев Жаныбек9

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

**ОБ ОДНОМ СПОСОБЕ ОРГАНИЗАЦИИ БЕЗОПАСНОГО ОБМЕНА ДАННЫМИ
МЕЖДУ ПЛАТФОРМОЙ 1С:ПРЕДПРИЯТИЕ 8 С ДРУГИМИ
ИНФОРМАЦИОННЫМИ СИСТЕМАМИ** Янко Дмитрий Владимирович, Шаршеналиев
Жаныбек 15

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ МНОГОУРОВНЕВОГО ВЕБ-
ПРИЛОЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ИСЧИСЛЕНИЯ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ** Гайдамако
Валентина Викторовна.....23

УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ

**ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В
ЭЛЕМЕНТАХ ЭЛЕКТРОСЕТИ ПРИ СТОХАСТИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ
ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ** Айдарова Айгерим Рашидовна, Бузурманкулова Чолпон
Мейманалиевна, Калмурзаев Апсамат, Суюнтбекова Нурила Амантаевна.....33

**УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ПО
МОНИТОРИНГУ МАСЛЯНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ** Ниязова
Гулмира Нуридиновна, Сатаркулов Калмурза, Кабаев Темиржан Кабаевич, Мырзаканова
Раиса Абдырасуловна43

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ
СУММАРНОГО ТЕПЛОВОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ТЕКСТИЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ** Абдукаюмов Абдурауф Абдурашидович.....51

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ТУРБОМЕХАНИЗМОВ БИОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО
КОМПЛЕКСА** Бочкарев Игорь Викторович, Сандыбаева Аида Рысматовна, Садыков
Дмитрий Николаевич56

**ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ И КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПРЯМОЙ И ОБРАТНОЙ
ЗАДАЧ УРАВНЕНИЯ ГЕОЭЛЕКТРИКИ** Анищенко Юлия Владимировна, Сатыбаев Абдыганы
Джунусович 72

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Научно-технический журнал

Компьютерная верстка С.Н. Верзунов

Редактор Е.В. Комарова

Подписано к печати 25.12.2020 г. Формат 70/108 1/8

Печать офсетная. Объем 5,2 п.л. Тираж 200 экз.

Издательство ИМА НАН КР

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265