

Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал
№ 10 (103)/2022 Том 1

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Макаровский Денис Анатольевич

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

• **Штерензон Вера Анатольевна**

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

• **Синьковский Антон Владимирович**

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

• **Штерензон Владимир Александрович**

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

• **Зыков Сергей Арленович**

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

• **Дронсейко Виталий Витальевич**

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А
E-mail: info@euroasia-science.ru ;
www.euroasia-science.ru

Учредитель и издатель ООО «Логика+»
Тираж 1000 экз.

СОДЕРЖАНИЕ

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

Абиева Г.С., Изгибаева А.А., Жакыпова Г.М.
ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦИИ
ВОЗДУХА.....3

Ефремов А.Н.
АРХИТЕКТУРА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА АНОДНО-ОКИСНЫХ
ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИИ И ЕГО СПЛАВАХ6

Любимов В.В.
УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ БЛОК И ЕГО
ВАРИАНТЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТОМЕТРОВ
НА БАЗЕ КВАРЦЕВЫХ ДАТЧИКОВ С
ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ
РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ14

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

Амосова Н.Н.
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕОРИИ МАССОВОГО
ОБСЛУЖИВАНИЯ.....23

Перевозников Е.Н.
СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ С
ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ.....26

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 628.973.4:621.311.1

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ СИСТЕМ РЕКУПЕРАЦИИ ВОЗДУХА

Абиева Гульдана Солтановна

*кандидат технических наук, ассоциированный профессор,
Международная образовательная корпорация (кампус КазГАСА),
Алматы, Казахстан*

<https://orcid.org/0000-0002-0101-2252>,

Игибаева Айдана Аскарровна

*магистрант 2 курса,
Международная образовательная корпорация (кампус КазГАСА),
Алматы, Казахстан*

<https://orcid.org/0000-0003-3312-8716%20>

Жакыпова Гулнур Мухамеджановна

*старший преподаватель, магистр технических наук,
Кызылординский университет имени Коркыт Ата, Кызылорда*

<https://orcid.org/0000-0002-7935-5482>

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.103.1729

АННОТАЦИЯ

В целом основное содержание этой статьи-энергосбережение и снижение затрат . Техническое обслуживание зданий, связанных с устаревшими строительными технологиями. В качестве комплексного решения предлагается внедрение системы рекуперации воздуха как энергоэффективной технологии.

Ключевые слова: энергоэффективные технологии, энергосбережение, энергоэффективность, энергосбережение в строительстве, система рекуперации воздуха.

Применение современных, энергосберегающих окон, несет с собой и существенные проблемы. Причем это многоплановые проблемы, лежащие как в области охраны здоровья людей, находящихся в помещениях, оборудованных такими окнами, так и области сохранности самих зданий, в которых имеются такие окна. Кратко можно напомнить, что применение таких окон без сопряженных специальных мер по обеспечению контролируемой принудительной вентиляции ведет к изменению качественного состава воздуха в помещениях (снижается уровень кислорода, повышается содержание углекислого газа, радона и пр.), что отрицательно сказывается и на текущем самочувствии, и на общем состоянии здоровья людей. Кроме того, применение таких окон приводит, как правило, к росту влажности в помещениях, обуславливающей появление и развитие (в дальнейшем очень трудно удаляемой) плесени, т.е. колоний грибов, что имеет двойко проявляющиеся, отсроченные негативные последствия. Во-первых, некоторые виды плесневых грибов смертельно опасны для человека и, во-вторых, все виды плесневых грибов оказывают разрушительное воздействие на строительные конструкции зданий и сооружений. В Европе в связи с начавшимся, после замены ранее установленных окон на современные энергосберегающие, ускоренным процессом разрушения зданий, стоявших до этого столетия, даже сформировался термин «синдром большого здания» и в настоящее время запрещена установка

таких окон без выполнения специальных мер, обеспечивающих необходимую вентиляцию [15].

Обострению ситуации в части необходимости использования рекуператоров на территории СНГ способствует как стремительно дорожающие энергоносители (что объективно подталкивает людей искать пути снижения расхода энергии на поддержание комфортной температуры в помещениях), так и призывы руководителей разного уровня, от самого высокого до низового, в массовом порядке заменять ранее установленные окна на современные [15].

Возможности энергосбережения в системе вентиляции весьма конкретны, так как за счет удаления перерасхода энергии чем в сравнении с проектируемыми данными, так и ее проектногорасхода по уменьшению.

В начальное мероприятие включены сети регулировки воздуховодов, установок калориферных и завес воздушно-тепловых.

Уменьшая проектный расхода энергии получают только при применении теплоты уходящего воздуха из помещений.

Когда экономика сильно неустойчива, то может быть сильно повышена вторая группа эффективности мероприятий и разрешено только применять простейшие конструкции энергосберегающих аппаратов, которые не требуют огромных финансовых вложений.

В процессе испытанных конструкций энергосберегающих аппаратов относятся теплоутилизаторы рекуперативные, которые в теплопередающих поверхностях имеет пленка полиэтиленовая, а также возможно

теплоутилизаторы регенеративные с насадками, которые состоят из друг над другом находящихся волнистого листа из материалов, имеющих наиболее большой коэффициент теплового усвоения.

Конкретный интерес имеется получивший большое распространение за границей теплоутилизатор регенеративный состоящий из двух неподвижных насадок, представленными из имеющих друг над другом волнистых листов. Действующая автоматическая заслонка постоянно в 1 раз в 1...1,5 минуту меняет направления воздушного потока. Такая конструкция компактная и цена материала насадок в полном объеме может компенсировать дополнительные затраты на заслонку, этим и объясняется большая энергоэффективность теплоутилизатора.

Также, вентиляционная система с рекуператором обязательна для индивидуальных энергосберегающих домов на рисунке 3.1.

Основан принцип рекуперации на применении вытяжного теплового воздуха. С помощью тепловых обменных агрегатов появляется передача тепла, которые различают по виду выполнения и способу продвижения воздуха.

По типу оборудования рекуперации тепла используют следующее следующие оборудования:

В процессе испытанных конструкций энергосберегающих аппаратов относятся теплоутилизаторы рекуперативные, которые в теплопередающих поверхностях имеется пленка полиэтиленовая, а также возможно теплоутилизаторы регенеративные с насадками, которые состоят из друг над другом находящихся волнистого листа из материалов, имеющих наиболее большой коэффициент теплового усвоения.

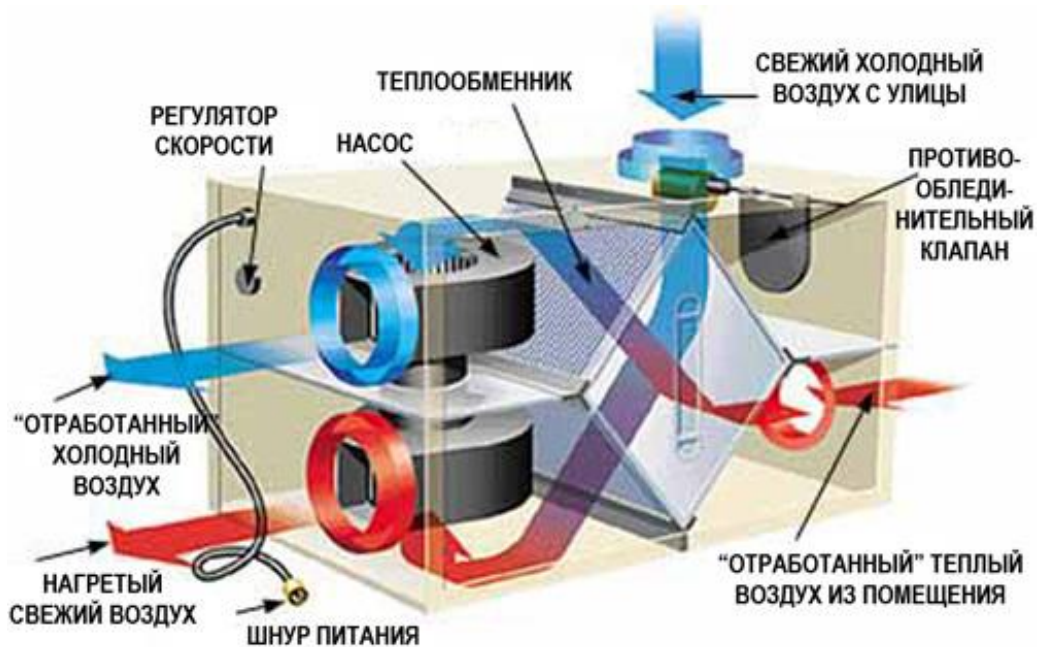


Рисунок 3.1 - Система вентиляции с рекуператором

Данная конструкция выполнена из пластин алюминиевых сплавов, разрабатывающих систему каналов для того чтобы протекали потоки воздуха. Именно при большой теплопроводности стенок

каналов появляется передача тепла приточного воздуха от вытяжного. Коэффициент полезного действия существующего оборудования может достигать до 70% на рисунке 3.2.



Рисунок 3.2. Рекуператор пластинчатый.

Структура рекуператора роторного устроен как барабан, который состоит из больших множественных алюминиевых ячеек, которые вращаются вокруг своей оси. Данная ячейка нагревается, если попадет в зону вытяжного

воздуха. Находясь в зоне приточного воздуха, ячейка дает тепло которое накопило приточному воздуху. Коэффициент полезного действия существующего оборудования может достигать до 85% на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 - Рекуператор роторный

К существующим типам представленных устройств представлены рекуператоры вентиляционного тепла воздуха. Центральный рекуператор, существует в ограниченных количествах, использовались еще с советские времена и на сегодняшний день малоизвестны, то рекуператоры децентрализованного типа еще совсем недавно промышленностью не изготавливались, так как объективна причина была не востребоване таких устройств, и в связи с этим были не известны не только потребителям, но и профессиональным работникам которые работают в таких областях техники. Но со временем ситуация категорически изменилась с выпуском современных, высококачественных окон с высокоплотными притворами и стеклопакетами, а в последнее время, на наш взгляд, резко обостряется и вопрос использования децентрализованных рекуператоров, который может выйти на уровень вопросов, требующих первоочередного решения.

Ужесточению обстоятельству в части потребности внедрения рекуператоров на территории СНГ способствует как очень быстро дорожающие энергоносители (фактически объективно обращает обитателей выкапывать пути снижения расхода энергии на поддержание комфортной температуры в зданиях), так и призывы разного значения, от самого высокого по низового, в массовом распроядке привлечь раньше поставленные окошка на инновационные.

Данные рекуператоры, будучи установлены в любом из здании, позволяют, во-первых, проветривать только те строения, которые в предоставленном беспристрастно имеют надобность, т.е., к образцу, те, в каких находится люди (будто теснее считается сохраняющим энергию событием), во-вторых, проветривать контролирован-однако, т.к. стиль идет все ведь о

вынужденной вентиляции, и, особенно стоит направить интерес на то, будто при данном вентилировании выходит сохранить фактически в наполненном объеме энергосбережение передовых окон.

Истина, все-таки «практически в полном», так как какая та часть тепловой энергии неизбежно будет ретироваться с вытяжным воздухом поэтому, фактически на сей день никак не находится (правда и никак не имеет возможность быть в принципе) устройство, обеспечивающее 100% рекуперацию.

Использование децентрализованного рекуператора, в отличие от центрального, доступно любому в отдельности взятому собственнику здания.

Не считая такого его внедрение никак не соединено ни с какими наиболее-наименее необходимыми строй либо ремонтными работами. Аппарат рекуператора на месте объединяется к воспитанию в наружных стенках 2-ух отверстий (обмолвимся сходу – малеханького размера), закреплению рекуператора в выбранном месте и подключению его к роднику электропитания (совсем и совсем маломощному).

Внедрение децентрализованного рекуператора преднамеренно фактически непрерывно, нежели сооружение оборудовано передовыми энергосохраняющими окошками и никак не владеет центральной понудительной вентиляции. Сообразно иному возникает задачка: фактически основнее - настроение и сохранность здания либо энергосбережение. И только внедрение децентрализованного рекуператора удовлетворенно постановляет эту данному делу.

Все ведь создателю теснее приключалось сталкиваться и с отрицательным взаимосвязью к лично мысли внедрения рекуператоров, в особенности децентрализованных. Во всех данных эпизодах, при немении каких-нибудь

подкрепляющих это мировоззрение тем, говорило беспочвенное предложение о том, будто экономически никак не рентабельно, т.к. и само производство никак не из дешевых, правда и, не считая такого, для работы будет нужно электричество. Эти заявления воспрещается элементарно пренебрегать. Напротив, раз есть данные сомнения то они должны существовать либо признаны, либо обоснованно опровергнуты. Ничего никак не имеет возможность делать наилучшим опровержением, нежели четкие количества, при данном количестве, позволяющие хоть какому хотящему без помощи других исполнить их тест и изготовить личные выводы. Свергаемые в настоящей статье смысла и суждения должны стать такой убедительной основой.

Действенность рекуператоров тепла вентиляционного воздуха исходя из убеждений энергосбережения разбирается 2-мя параметрами (а точнее, их соответствием) - степенью энергосбережения рекуператора и его удельным энергопотреблением. Далее станет дана количественная критика ступени рекуперации (энергосбережения) созданных нами рекуператоров, а еще приведены абсолютные смысла, описывающие численность сбереженной энергии на нескольких режимах.

Нужно обратить интерес на то, будто 1-ая из данных величин (степень энергосбережения) разносторонне установлена терминологически, а две они никак не имеют фиксированного смысла для предоставленного рекуператора и меняются в совсем широких мерах в зависимости от пропорции температур наружного и внутреннего воздуха.

УДК 658.562

АРХИТЕКТУРА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ КАЧЕСТВА АНОДНО-ОКИСНЫХ ПОКРЫТИЙ НА АЛЮМИНИИ И ЕГО СПЛАВАХ

Ефремов А.Н.

DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.103.1730

АННОТАЦИЯ

В работе описана методология модельно-ориентированного системного инжиниринга и ее приложение для проектирования моделей сложных искусственных технических систем. Применение методов продемонстрировано на примере создания архитектуры математической модели прогнозирования качества анодно-окисного покрытия на алюминии и его сплавах, полученного гальваническим способом в серноокислом электролите. Показано, что за счет универсализма и простоты алгоритмизации и цифровизации методы модельно-ориентированного системного инжиниринга позволяют переходить к созданию цифровых двойников разрабатываемых технических систем.

Ключевые слова: прогнозирование качества, системный инжиниринг, архитектурные модели, математическая модель, гальваническое производство, цифровой двойник

При запуске нового оборудования и модернизации действующего производства для повышения качества выпускаемой продукции встает вопрос об адаптации существующих технологий нанесения покрытий к новым условиям производства. В производственных условиях подобрать рациональные и экономичные режимы нанесения покрытий достаточно сложно и экономически неоправданно, поэтому разработка адекватной математической модели

Литературы

1. Федеральный закон от 23.11.2009 № 261-ФЗ «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».
2. Passive House: The Standard and Technical Overview [Electronic resource]// CIAT. – Mode of access: <http://www.ciat.org.uk/>
3. Jounal R., Eriksen K. E. Active House Alliance [Electronic resource] // Activehouse.info. – Mode of access: <http://www.activehouse.info/>
4. Elgan M. A smart home that's really smart [Electronic resource] // Computerworld.com. – Mode of access: <http://www.computerworld.com/>
5. Агитаев Е. Эффект глобального потепления *Электронный ресурс+ // Центральная профсоюзная еженедельная газета «Солидарность». – Режим доступа: <http://www.solidarnost.org/>
6. Булгаков С.Н. Энергоэффективные строительные системы и технологии *Электронный ресурс+ // Электронный журнал АВОК. – Режим доступа: <https://www.abok.ru/>
7. Система рекуперации тепла *Электронный ресурс+ // Null-dom.ru. – Режим доступа: <http://null-dom.ru/>
8. Дискин М.Е. Эффективность рекуперации теплоты в системах вентиляции при температурах наружного воздуха ниже температуры опасности обмерзания *Электронный ресурс+ // I-Mikro.ru. – Режим доступа <http://i-mikro.ru/>

прогнозирования качества покрытий для различных условий производства, а в дальнейшем и «цифрового двойника» (далее – ЦД) производственной линии, является целесообразным при выборе технологических режимов. Создание такой модели позволит снизить затраты на этапах подготовки производства и эксплуатации, а также свести к минимуму риски, связанные с появлением бракованной продукции.

Одним из важнейших технологических процессов в ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург» является процесс нанесения защитных антикоррозионных покрытий гальваническим способом, в том числе и анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах. Он является критическим процессом в контексте удовлетворенности потребителей. Кроме того, в настоящее время не удается снизить количество несоответствий по данному параметру, что приводит к излишним затратам. Это дает основание утверждать, что разработка адекватной модели операции и применение статистических методов в управлении качеством продукции позволят существенно снизить внутренние потери, оптимизировать производственные процессы.

Одной из современных методологий системной инженерии, которая позволит создать

успешную математическую модель, комплексно учитывающую все основные показатели качества покрытий, регламентированных стандартами качества в конкретных технологических условиях, является модельно-ориентированный системный инжиниринг MBSE (Model-based Systems Engineering) [1-4].

Для моделирования сложных систем могут последовательно применяться несколько нотаций моделирования, рассматриваемых как страты моделирования. Взаимосвязь моделей различных нотаций обеспечивается посредством использования единой политики стратификации и представления моделей. Удобным является применение опорной стратификации моделей по «принципу матрешки» – от более общих представлений к более детальным (рис. 1) [5].

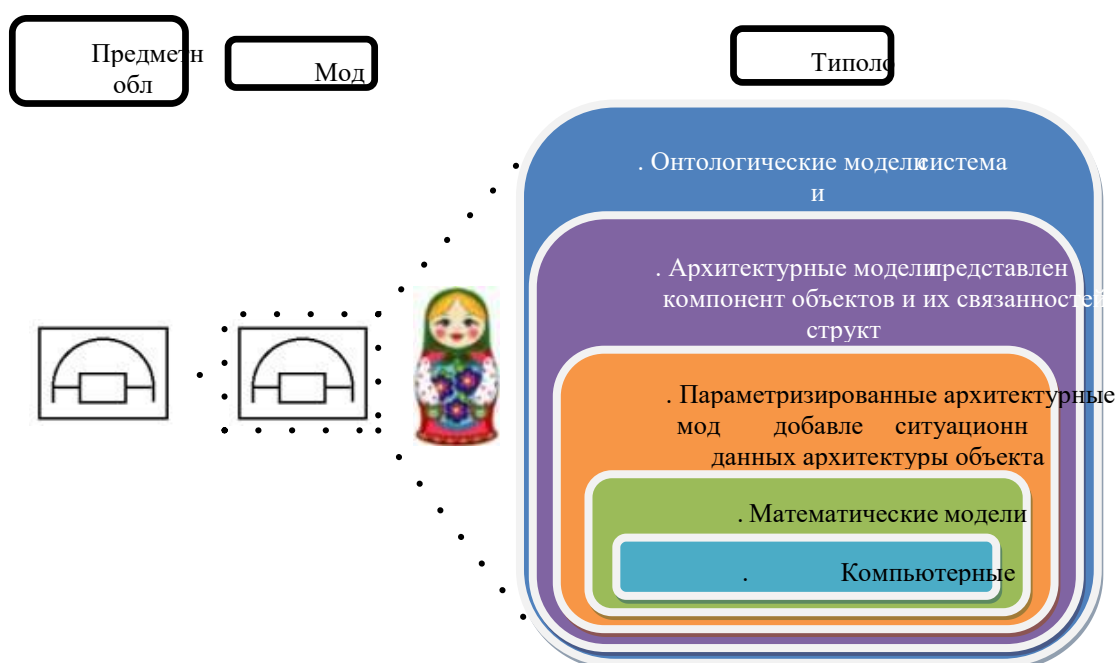


Рисунок 1 – Опорные нотации моделирования систем [5]

Традиционно системное моделирование начинается с построения онтологии – задания терминов и понятий предметной области и целевой системы [5]. На данном этапе проводится выделение предметной области и способ ее представления, описание моделируемой системы, дифференциация разрабатываемого продукта и системы деятельности по его созданию.

Следующим шагом является построение архитектурных моделей, которые задают структурные описания. Архитектурная модель отображает структурное устройство системы, выделяя и описывая сущности и компоненты системы в их связанности.

В дальнейшем дополнение архитектурных моделей существенными для рассмотрения качественными и количественными параметрами приводит к формированию параметризованных архитектурных моделей.

Рассмотрим использование данной методологии на примере создания математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах.

1. ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Из известных способов защиты алюминия и его сплавов от коррозии наиболее распространено оксидирование. Оксидированные детали не только обладают повышенной коррозионной стойкостью, но и приобретают ряд ценных физико-химических свойств – износостойкость, твердость, удельного сопротивления и др. [6-10].

Формирование оксидного слоя на поверхности алюминия и его сплавов осуществляют химическим или электрохимическим (анодным) оксидированием. В зависимости от метода и условий обработки можно получать покрытия различной толщины и структуры, акцентируясь на том свойстве оксида, которое необходимо в

процессе эксплуатации изделия. Химическое оксидирование дает покрытия небольшой толщины (порядка 3-5 мкм), которые предназначены для защиты от коррозии в легких условиях или как промежуточный подслои для адгезии лакокрасочного покрытия. Анодным оксидированием можно получать покрытия большей толщины, способные противостоять как коррозии в более жестких условиях, так и износу и прожодению электрического тока [6, 11-14].

Наиболее распространенным способом обработки алюминия и его сплавов является анодное оксидирование. Это общедоступный и сравнительно дешевый вид обработки деталей из алюминия и его сплавов, позволяющий в большинстве случаев эффективно решать задачи модификации поверхности с целью придания ей требуемых декоративности, коррозионных и физико-механических характеристик [6].

Технологический процесс оксидирования алюминия и его сплавов может включать в себя: подготовительные операции, собственно

оксидирование и заключительную обработку полученной оксидной пленки. После каждого вида обработки предусмотрена межоперационная промывка [6, 7, 15, 16].

В настоящей работе объектом исследования является технология нанесения анодноокисных покрытий на алюминии и его сплавах в ПАО «Машиностроительный завод имени М.И. Калинина, г. Екатеринбург». Поэтому в качестве системы систем выступает математическая модель гальванической линии анодирования, которая имитирует полный пооперационный цикл процесса нанесения анодно-окисного покрытия на детали из алюминия и его сплавов.

В качестве «продукта» исследования рассматривается математическая модель прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах, являющаяся составной частью математической модели гальванической линии анодирования – подсистемой системы систем (рис. 2).

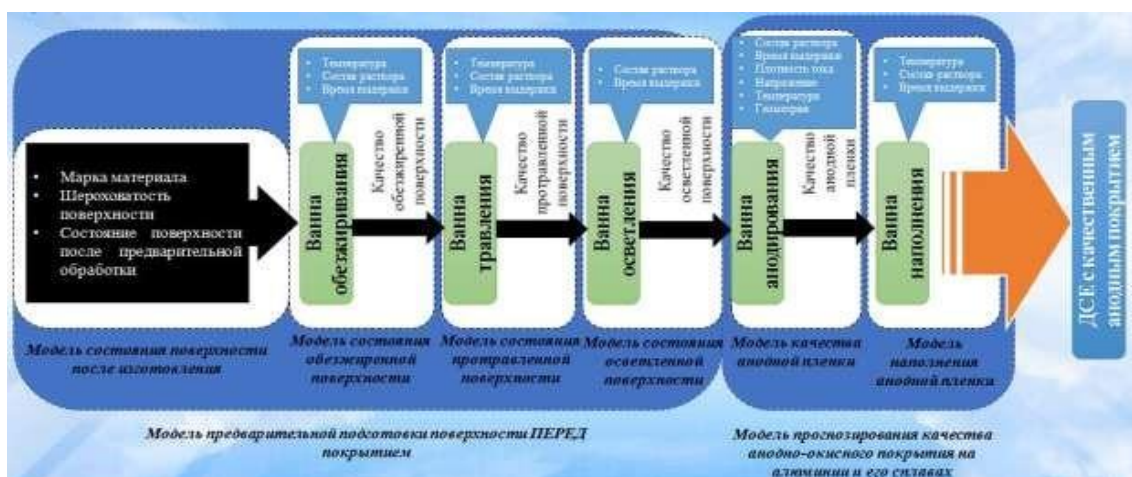


Рисунок 2 – Облик математической модели гальванической линии анодирования алюминия и его сплавов

Выделив в системе систем исследуемую онтологической модели рассмотрим особенности подсистему – обобщенный продукт, для полноты обобщенного продукта (таблица 1).

Таблица 1

Основные особенности обобщенного продукта

НАЗВАНИЕ ПРОДУКТА	Математическая модель прогнозирования качества анодно-окисного покрытия на алюминии и его сплавах (далее – ММПК АОП).
ПРЕДНАЗНАЧЕНИЕ ПРОДУКТА	<ol style="list-style-type: none"> 1. Предсказывать возможные несоответствия анодно-окисных покрытий во время течения технологического процесса. 2. Подсказывать, когда необходима корректировка электролита по основным компонентам без проведения химического анализа. 3. Прогнозировать основные показатели качества покрытия. 4. Прогнозировать оптимальные технологические параметры ведения технологического процесса.
ЦЕННОСТЬ ПРОДУКТА	Возможность контролировать и управлять основными показателями качества покрытия во время технологического процесса, сводя к минимуму или исключая полностью появление несоответствий (брака).

<p style="text-align: center;">КЛЮЧЕВЫЕ КОМПОНЕНТЫ ПРОДУКТА</p>	<p>Модель прогнозирования структурных свойств (внешний вид, толщина, прочность сцепления, пористость, качество наполнения).</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Модель прогнозирования защитных свойств (коррозионная устойчивость). 2. Модель прогнозирования функциональных свойств (удельное сопротивление, пробивное напряжение, качество адгезии). 3. Модель прогнозирования механических свойств (твердость, износостойкость) 4.
<p style="text-align: center;">МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ</p>	<p>Семь инструментов качества (контрольные карты, диаграмма Парето, а) диаграмма рассеивания, причинно-следственная диаграмма Исикавы и б) др.).</p> <p>Методы статистического анализа</p> <p>с) Методы контроля качества покрытий (согласно ГОСТ 9.302)</p> <p>д) Методы математического моделирования</p>

Для полноты опорной архитектурной модели необходимо произвести учет факторов внешней среды. Основными воздействующими факторами на нашу систему будут являться:

- Климатические условия окружающей среды, которые влияют на материальный и тепловой балансы гальванической линии анодирования (температура, влажность и давление внутри цеха);
- Человеческий фактор (ошибки оператора при выполнении операций в процессе анодирования, зависящие от квалификации оператора (гальваника), его ответственности при выполнении требований технологического процесса и его морально-физического состояния);
- Техническое состояние вспомогательного оборудования линии анодирования - исправность и точность задаваемых параметров вспомогательного оборудования, а именно: паропровод (для обогрева технологических ванн); сжатый воздух (для сушки деталей); водопровод (для контроля уровня технологических растворов в ваннах); электрическое оборудование (выпрямитель для задания и управления необходимой токовой нагрузкой и напряжением на ванне анодирования).

В результате описания предметной области и объекта исследования, а также учета факторов внешней среды проведено расширенное моделирование системы систем.

2. АРХИТЕКТУРНАЯ МОДЕЛЬ

На следующем этапе моделирования полученное простейшее описание архитектуры системы расширяется за счет включения дополнительных сущностей ее представления: требования к системе, функции системы, компоненты системы, работы по созданию компонентов системы и, при необходимости, учитываются другие сущности [5].

Методом декомпозиции получены иерархические модели таксономий функций продукта FBS (Functions Breakdown Structure), требований к продукту RBS (Requirements Breakdown Structure), компонент продукта PBS (Product Breakdown Structure) и работ по созданию продукта WBS (Work Breakdown Structure). На рис. 3 в качестве примера показана иерархическая модель таксономии (архитектурная модель) компонент математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах.

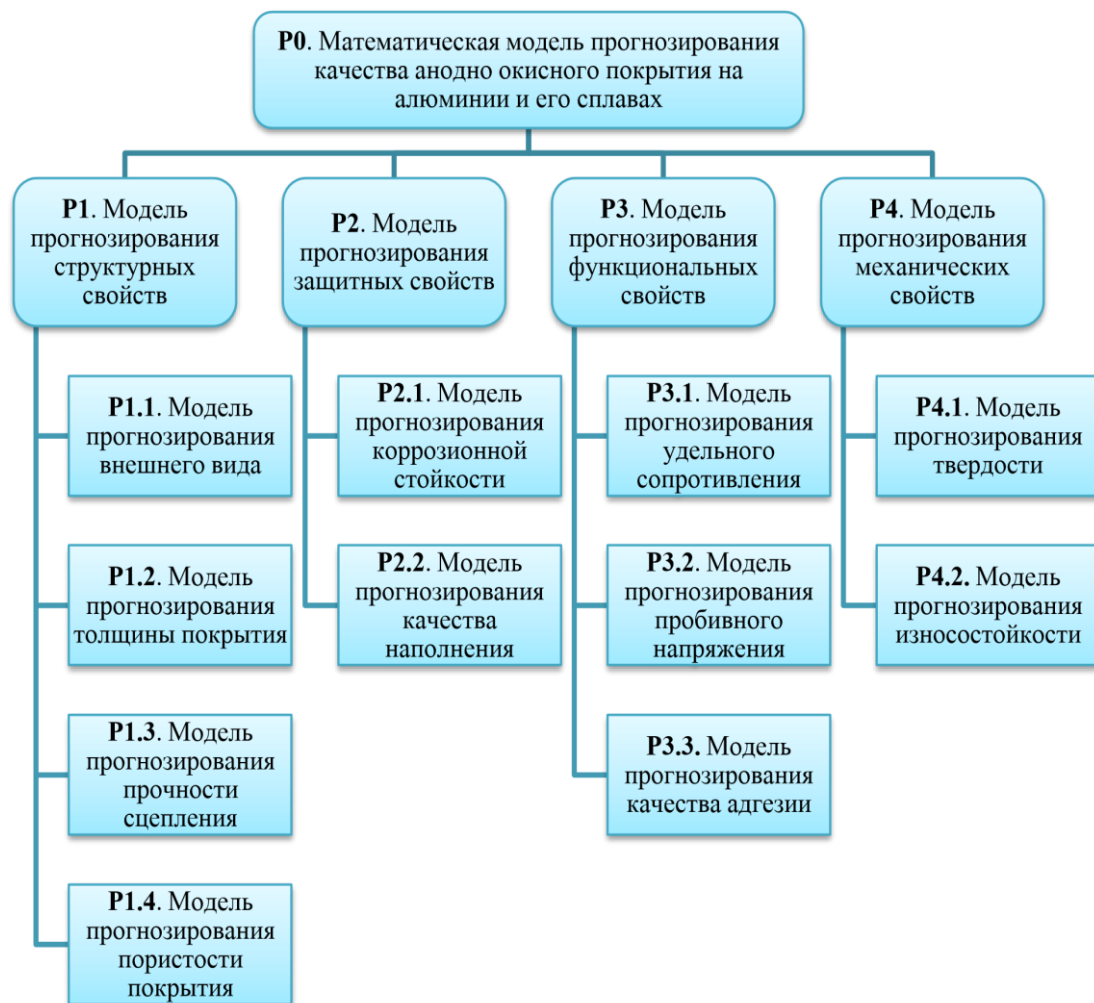


Рисунок 3 – Модель PBS. Иерархическая таксономия компонент математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах

Заметим, что на каждом этапе моделирования важно индексировать все компоненты, что делает описания «машиночитаемыми» и адресными, и это позволит избежать ошибок на более поздних стадиях моделирования, в частности, на стадии цифровизации математических моделей.

Смоделировав состав и содержание сущностей продукта, дополним архитектурную модель представлением связанностей введенных сущностей, т.е. увяжем между собой компоненты, функции и требования. В методологии MBSE для этого применяются модели связанностей сущностей DSM (Design Structure Models). Для наглядности их представляют в табличном виде – таблиц отношений.

Для представления связанностей в данной работе построены следующие модели:

□ Таблица отношений (DSM) требований и функций RBS-FBS;

□ Таблица отношений (DSM) функций и компонент FBS-PBS;

□ Таблица отношений (DSM) компонент между собой PBS-PBS.

В таблице 2 показана модель DSM связанностей компонент математической модели прогнозирования между собой.

Из табл. 2 видно, что основными компонентами модели, имеющих наибольшее количество связанностей с другими компонентами, являются компоненты P1.2 и P1.4 (модели прогнозирования толщины и пористости анодно-окисного покрытия), поэтому моделирование целесообразно начинать именно с этих составляющих.

Кроме того, поскольку компонента P1.3 (модель прогнозирования прочности сцепления) не связана с другими компонентами, то ее следует исключить из данной модели. Действительно, прочность сцепления покрытия и основного металла будет зависеть от предварительной обработки деталей (обезжиривание, травление, осветление, промывка), поэтому данную модель целесообразно включить в Модель предварительной подготовки поверхности перед покрытием (см. рис. 2).

3. ПАРАМЕТРИЗИРОВАННАЯ АРХИТЕКТУРНАЯ МОДЕЛЬ

Дальнейшее расширение архитектурной модели проводили путем привязки к компонентам иерархической таксономии качественных и количественно измеряемых характеристик продукта – метрик или атрибутов. В таблице 3 представлены иерархии компонент с атрибутами

(P,a)BS в форме таблицы с индексируемыми записями элементов сущностей P и их атрибутов a т.е. присвоены количественные и качественные характеристики.

Таким образом, произведена параметризация ключевых сущностей рассматриваемого продукта,

Таблица 2

Модель DSM (PBS,PBS) связанностей компонент математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах

КОМПОНЕНТЫ ПРОДУКТА P	КОМПОНЕНТЫ ПРОДУКТА P											
	P1.1	P1.2	P1.3	P1.4	P2.1	P2.2	P3.1	P3.2	P3.3	P4.1	P4.2	
P1.1 Модель прогнозирования внешнего вида				■		■						
P1.2 Модель прогнозирования толщины покрытия	■			■	■		■	■	■	■	■	
P1.3 Модель прогнозирования прочности сцепления												
P1.4 Модель прогнозирования пористости покрытия	■	■			■	■	■	■	■	■	■	
P2.1 Модель прогнозирования коррозионной стойкости		■		■		■						
P2.2 Модель прогнозирования качества наполнения	■	■		■	■							
P3.1 Модель прогнозирования удельного сопротивления		■										
P3.2 Модель прогнозирования пробивного напряжения		■										
P3.3 Модель прогнозирования качества адгезии				■		■						
P4.1 Модель прогнозирования твердости		■		■								
P4.2 Модель прогнозирования износостойкости		■		■								
■ взаимосвязь компонентов друг с другом												

Таблица 3

Параметризация компонент математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах

№ и атрибуты требований	
Иерархически упорядоченные индексы и имена компонент модели продукта	Метрики и численные атрибуты
P1.1	<p>a1. Прогнозируемый цвет покрытия в зависимости от технологических параметров анодирования, состава электролита</p> <p>a2. Прогнозирование наличия или отсутствия браковочных признаков (вздутий, отслоений и т.д.) в зависимости от чистоты металла, поверхности и толщины АОП</p>
P1.2	<p>a1. Прогнозируемая толщина АОП в зависимости от марки материала, технологических параметров анодирования, состава электролита</p> <p>a2. Прогнозируемое распределение толщины покрытия по поверхности детали в зависимости от температуры электролита и скорости перемешивания</p>

P1.3	a1. Прогнозируемая прочность сцепления в зависимости от предварительной подготовки перед покрытием (обезжиривание, травление, осветление)
P1.4	a1. Прогнозируемое число пор на единицу поверхности детали в зависимости от марки материала, толщины АОП, технологических параметров анодирования, состава электролита a2. Прогнозируемая плотность АОП в зависимости от толщины АОП, технологических параметров анодирования, состава электролита
P2.1	a1. Прогнозируемое время выдержки испытательного раствора на поверхности детали до полного растворения АОП (зависит от толщины АОП)
P2.2	a1. Прогнозируемая масса АОП после операции наполнения в зависимости от толщины и пористости покрытия a2. Прогнозируемая прочность сцепления обеспечивает факт, что покрытие не окрашивается после испытаний
P3.1	a1. Прогнозируемое численное значение удельного сопротивления АОП находится в пределах $10^{10} - 10^{16}$ Ом×мм, в зависимости от толщины, пористости и структуры АОП
P3.2	a1. Прогнозируемое численное значение пробивного напряжения (не менее 250В при толщине 5-8 мкм) в зависимости от марки материала (количество легирующих элементов), чистоты поверхности (шероховатость и пористость поверхности подложки)
P3.3	a1. Величина адгезии по шкале не превышает 1 в зависимости от температуры электролита, времени анодирования
P4.1	a1. Прогнозируемое значение микротвердости, зависящее от марки материала, пористости и толщины АОП
P4.2	a1. Прогнозируемое значение удельного сопротивления к истиранию, напрямую зависящее от микротвердости и толщины АОП, технологических параметров анодирования, температуры электролита и скорости перемешивания

Дальнейшее направление исследований в области создания математической модели прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах подразумевает выполнение следующих этапов:

1. Создание математической модели путем расширения параметризованной архитектурной модели учитываемыми и математически выраженными характеристиками продукта, их взаимозависимостей и математически представленными алгоритмами.

2. Цифровизация математической модели – создание компьютерной модели. Унифицированное расширение состава моделей позволяет выйти на системное формирование платформ моделей целевой системы и более широко на формирование платформ моделей предметной области. Платформы могут иметь в своем составе модели разного вида – онтологические, архитектурные, когнитивные, математические и др. [17-19].

Созданная на финальном этапе исследования компьютерная модель прогнозирования качества анодно-окисных покрытий на алюминии и его сплавах совместно с моделью предварительной подготовки поверхности (рис. 2), включающие

ситуационные данные реального производственного объекта, представляют собой составную часть виртуального элемента ЦД.

Виртуальный элемент ЦД – это цифровая модель объекта, способная воспроизводить геометрию, физико-химические свойства, поведение и правила, позволяющие оптимизировать поведение системы. В данном элементы ЦД сгенерированы такие технологии, как CAD-модели (3D твердотельное моделирование), моделирование физикохимических процессов, моделирование поведения объекта (создаваемая компьютерная модель), моделирование, основанное на правилах, анализ согласованности моделей, а также интеграция моделей.

Таким образом, для того чтобы в полной мере раскрыть возможности методологии MBSE, следует рассматривать данную технологию как метод решения проблемы увеличения сложности многокомпонентных технических систем. Вновь создаваемые и модернизируемые технические системы становятся все более аффилированными, что приводит к потенциальному росту сложности прогнозирования и планирования поведения систем.

Концепция MBSE является ответом на такие вызовы и направлена на синтез моделей знаний; на улучшение коммуникаций, обеспечиваемых моделями; на более качественную оценку согласованности, полноты и корректности моделей; на развитие преодоления сложностей и повышения качества создаваемых систем; на совершенствование экстракции знаний и повторного их применения (что ведет к уменьшению времени производственного цикла и снижению затрат на обслуживание [3]).

В то же время ЦД базируется на согласованном и непротиворечивом наборе мультидисциплинарных и мультимасштабных моделей системы на всех этапах жизненного цикла, следовательно, применение и внедрение MBSE-подхода – это один из существенных этапов ЦД-решения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Кондратьев В.В. Управление архитектурой предприятия (Конструктор регулярного менеджмента). Изд. 2-е дораб. и дополн. М.: Инфра-М, 2019. 358 с.

Романов А.А. Прикладной системный инжиниринг. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2015. 555 с.

Kasser, J.E. (2019). *Systems Engineering: A Systemic and Systematic Methodology for Solving Complex Problems* (1st ed.). 472 p. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780429425936>

Интервью с А.И. Боровковым [Электронный ресурс] / Центр компьютерного инжиниринга СПбПУ, 2021. – Режим доступа: <https://fea.ru/news/7687>.

Кондратьев В.В. Модельно-ориентированный системный инжиниринг 2.0: учеб. пособие. М.: МФТИ, 2021. – 102 с.

Скопинцев В.Д. Оксидирование алюминия и его сплавов. – М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. – 120 с.

Аверьянов Е.Е. Справочник по анодированию. – М.: Машиностроение, 1988. – 224 с.

Гальванотехника. Справочник / Под ред. Гинберга А.М. – М.: Металлургия, 1987. – 736 с.

Артур В. Браке. Технологии анодирования алюминия. – М.: Interall, 2000.

Скопинцев В.Д. Разработка технологии нанесения на алюминий анодно-окисных покрытий с повышенной защитной способностью в хлоридсодержащих средах.//

Дисс. Канд. Техн. Наук. 1987.

Hunter M., Fowle P. Factors affecting the formation of anodic oxide coatings // *Journal of the electrochemical society*. – 1954, v. 101, №10. – p. 514-519.

Томашов Н.Д., Тюкина М.Н., Заливалов Ф.П. Толстослойное анодирование алюминия и его сплавов. – М.: Машиностроение, 1968. – 156 с.

Голубев А.И. Анодное окисление алюминиевых сплавов. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 200 с.

Zahavi J., Kerbel H., Kord R. AC anodizing processes of aluminum alloys // *Journal of the electrochemical society*. – 1982, v. 127, №7. – p. 1572-1579.

ГОСТ 9.305-84. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий.

Производственная инструкция ПИ 1.2.616-2003. Сернокислотное анодное окисление алюминиевых сплавов.

Алещенко А.С., Клишев О.П., Кондратьев В.В., Рассказов А.А. Совмещение архитектурных и математических моделей в системном инжиниринге технических систем // *Космонавтика и ракетостроение*, 2021, №5 (122).

Гаричев С.Н., Горбачев Р.А., Давыденко Е.В., Джапаров Б.А., Кондратьев В.В. Модельно-ориентированный инжиниринг физико-технических, информационных и интеллектуальных систем // *Труды МФТИ. Серия информатика и управление*, 2022, том 14, №2. – с. 149-161.

Прохоров А., Лысачев М. Цифровой двойник. Анализ, тренды, мировой опыт. Издание первое исправленное и дополненное / научный редактор профессор Боровков А. – М.: ООО «АльянсПринт», 2020. – 401 с.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ БЛОК И ЕГО ВАРИАНТЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАГНИТОМЕТРОВ НА БАЗЕ КВАРЦЕВЫХ ДАТЧИКОВ С ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

*Любимов Владимир Валерьевич**старший научный сотрудник**Федеральное государственное бюджетное учреждение науки**Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова**Российской академии наук, г. Троицк,**ORCID: 0000-0002-3316-4656**DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.103.1731***АННОТАЦИЯ**

Работа посвящена описанию конструкции универсального электронного блока являющегося основным элементом для современных кварцевых магнитовариационных станций. Созданные на его основе магнито-измерительные преобразователи имеют возможность применения различных конструкций аналоговых фотоэлектрических преобразователей, - в том числе созданных ранее. Варианты построения схемы электронного блока используют современные технические и технологические решения, связанные преобразованием аналогового сигнала от датчиков в цифру, с регистрацией и передачей измеренных накопленных данных различными способами. Построенные на основе блоков электроники современные кварцевые станции предназначены для проведения геомагнитных работ в различных условиях, - как в обсерваториях и стационарных пунктах наблюдений, так и для работы в полевой экспедиции.

ABSTRACT

The work is devoted to the description of the universal electronic unit design that is the main element for modern quartz magnetovariation stations. Magnetic measuring converters created on its basis have the possibility of using various designs of analog photovoltaic converters, including those created earlier. Variants of building the electronic unit circuit use modern technical and technological solutions related to the conversion of the analog signal from the sensors into digital, with the registration and transmission of the measured accumulated data in various ways. Built on the basis of electronics blocks, modern quartz stations are designed to carry out geomagnetic work in various

преобразователь.

Keywords: Magnetic field, magnetic measurements, component measurements, quartz sensor, magnetovariation station, photoelectric converter. conditions - both in observatories and stationary observation points, and for work in a field expedition.

Ключевые слова: Магнитное поле, магнитные измерения, компонентные измерения, кварцевый датчик, магнитовариационная станция, фотоэлектрический

ВВЕДЕНИЕ

В результате проведённых научно-исследовательских и опытных работ создана новая конструкция универсального электронного блока (блока электроники – БЭ), которая стала основой разработанных современных цифровых магнитовариационных станций (ЦМВС) на основе кварцевых магнитных датчиков (КМД) [1-32].

Построенный на основе КМД и БЭ трехканальный магнито-измерительный преобразователь (МИП) имеет возможность одновременной реализации двух вариантов преобразования, а именно, - «поле/напряжение» и «поле/цифровой код». При этом обеспечивается достаточно простое получение информации при помощи подключаемого персонального компьютера (ПК). Этот МИП имеет следующие отличительные особенности от всех ранее созданных аналогичных конструкций:

- высокая стабильность работы во времени, - что важно для длительных исследований в условиях магнитных обсерваторий (МО);

- хорошая стабильность, работы при изменении температуры окружающей среды в широких пределах, - что важно при проведении полевых и экспедиционных работ;

- низкий уровень собственных шумов измерительного канала (ИК), амплитуда которых не более 3...5 пТл;

- малое потребление энергии, - что позволяет эффективно использовать МИП в конструкциях автономных станций с питанием от аккумуляторных (АБ) или солнечных (СБ) батарей;

- возможность работы с КМД различных конструкций (в том числе ранее созданных), которые имеют различные схемы построения фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) аналогового типа;

- хранение, накопление и передачу измеренных данных в цифровой и аналоговой форме в регистрирующее устройство различными способами, реализующими новые современные технологии передачи данных.

О различных вариантах универсальных БЭ, созданных в условиях ИЗМИРАН, их технических характеристиках и разработанных на их основе магнитометрических приборах речь пойдет ниже. В обзоре также прилагается перечень литературы [1-32] (по времени публикации) по всем созданным на основе БЭ приборам.

МИП НА ОСНОВЕ ФЭП РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Современные КМД мало чем изменились и отличаются от традиционных [27, 28] в плане конструктивных размеров КМД и элементов его «обрамления» (корпусов и кварцевых рамок с кварцевыми нитями, на которых крепятся чувствительные элементы, - магниты). Основные изменения КМД вносились в направлении изменения конструкции ФЭП. Различные варианты ФЭП, созданные и применяемые как в отечественных, так и в выпущенных сериях зарубежных кварцевых ЦМВС [28], представлены на *рис.1*.

На *рис.1а* показана схема ФЭП, применяемая в классических разработках В.Н. Боброва для КМД с электрическим выходом. Примером построения МИП на основе такой конструкции ФЭП является кварцевая цифровая МВС (ЦМВС) типа ЦМВСБ, характеристики которой указаны в работе [8], а также цифровые МВС разработанные в ИЗМИРАН [11, 28] и Институтом геофизики Польской Академии наук ЦМВС под коммерческим названием PSM [28] (см. *рис.1б* и *рис.1г*). На *рис.1в* показана схема ФЭП, использованная в разработках серии ЦМВС-2 (СКБ ФП РАН) [3, 6, 28].

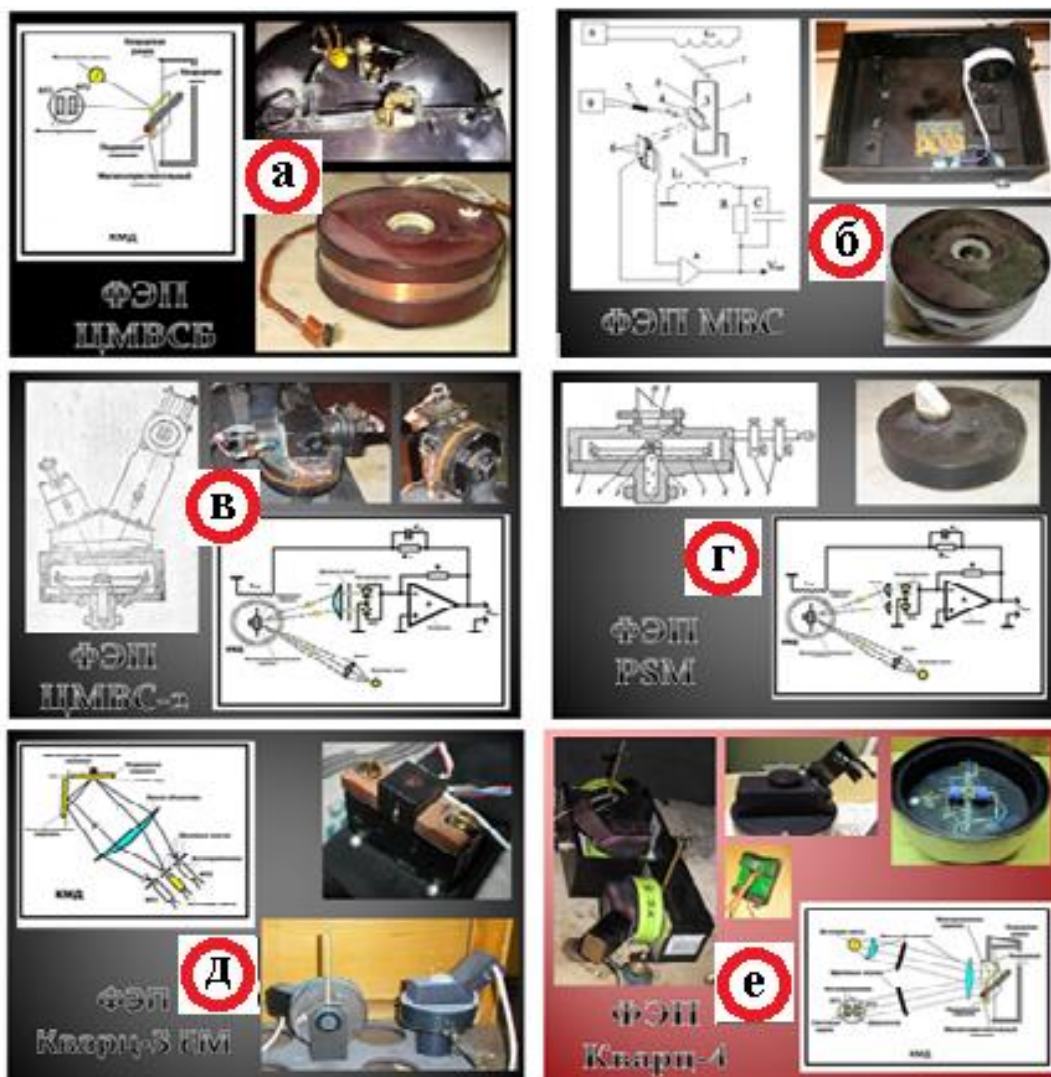


Рис.1. Различные варианты ФЭП, созданные и применяемые для кварцевых ЦМВС.

На *рис.1д* показана схема ФЭП, на основе которой построены ЦМВС серии «Кварц-3»: «Кварц-3Е», «Кварц-3ЕМ» и «Кварц-3Д» [5, 9, 28]. Разработка и применение специальной оптической системы ФЭП угловых смещений в конструкции ЦМВС «Кварц-3ЕМ» позволили максимально реализовать все достоинства кварцевого магниточувствительного элемента (МЧЭ): существенно увеличить её измерительный диапазон, улучшить разрешающую способность, а

также расширить частотные характеристики. Принцип работы ФЭП подробно рассмотрен в работе [9].

На *рис.1е* показана схема, которая используется во всех современных конструкциях ФЭП созданных в последние годы ЦМВС серии «Кварц-4»: «Кварц-4М», «Кварц-4МО» и «Кварц-4АС» [10, 13, 14, 28]. Эта схема ФЭП является аналогичным, но модернизированным вариантом схемы угловых смещений, которая применяется в

ЦМВС серии «Кварц-3». Основной отличительной особенностью схемы ФЭП, используемой в разработках ЦМВС серии «Кварц-4», является возможность применения различного типа светоизлучающих диодов (от обычных «разноцветных», - до инфракрасных) без изменения конструкции и перенастройки параметров ИК, которая осуществляется в этом случае при помощи программного обеспечения (ПО). При этом обеспечивается реальная простота в процессе настройки каждого из ИК прибора.

ЦМВС «Кварц-4», - это высокостабильный, интеллектуальный и компьютеризованный прибор нового поколения с широкими возможностями программной установки и изменения различных параметров схемы. Этот прибор имеет возможность накопления цифровых данных, проведение их

обработки и фильтрации процессе проведения измерений.

СОВРЕМЕННОЕ ПОСТРОЕНИЕ МИП ЦМВС

Классические структурно-функциональные схемы МИП применяемые для построения ЦМВС [16-20, 22, 24] на основе КМД показаны на *рис.2а* и *рис.2б*. Эти схемы включают в себя следующие функциональные узлы: КМД, ФЭП, усилитель постоянного тока (УПТ) и цепь отрицательной обратной связи (ООС) с катушкой, которая намотана на корпус КМД. Величиной («глубиной») этой ООС определяется ширина динамического диапазона работы МИП и его стабильность. В настоящее время в конструкциях ЦМВС существует четыре основных варианта исполнения МИП:

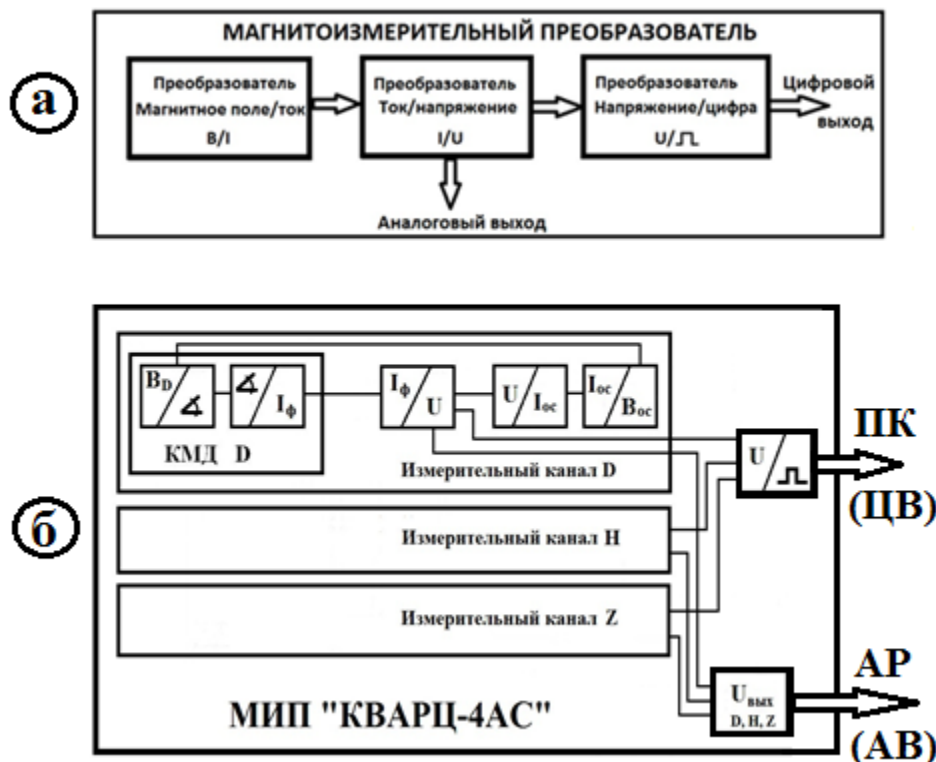


Рис.2. Структурно-функциональные схемы МИП: а-общая схема ИК, б-схема МИП ЦМВС с тремя ИК.

- КМД и схема ФЭП находятся в корпусе КМД, а УПТ соединён с элементами схемы ФЭП кабелем и находится в БЭ на небольшом (1...1,5 м) расстоянии (см. *рис.1а*). При этом питание МИП осуществляется от отдельного источника питания (ИП) с помощью другого кабеля (вариант ЦМВСБ);

- КМД и схема ФЭП находятся в корпусе КМД и всё это вместе с УПТ размещено в отдельном закрытом корпусе (или в контейнере), который оснащён элементами его нивелировки и ориентации в пространстве (см. *рис.1б* и *рис.1з*), а схема ИП подключается извне, при помощи кабеля (варианты МВС и PSM);

- КМД и отдельные элементы схемы ФЭП находятся в корпусе КМД, а некоторые элементы вынесены за его пределы, где размещён также

предварительный усилитель схемы УПТ (см. *рис.1в*). Вся эта конструкция соединена длинным кабелем с УПТ, который располагается в БЭ (на удалении), где также расположен ИП (вариант ЦМВС-2);

- КМД и отдельные элементы схемы ФЭП находятся в корпусе КМД, а некоторые основные элементы ФЭП вынесены за его пределы и соединены кабелем (длиной 1...3 м) с УПТ (см. *рис.1д* и *рис.1е*), который расположен вместе с ИП в БЭ.

В практике магнитометрического кварцевого приборостроения встречаются также схемы построения преобразователей «поле/напряжение», которые включают в себя сочетание нескольких из

перечисленных выше вариантов исполнения МИП [28].

В ранее созданных вариантах МИП ЦМВС, как правило, КМД отстояли на значительном расстоянии от БЭ в силу того, что элементы схемы ФЭП были габаритными [1-4], а также имело место довольно значительное потребление энергии для их электропитания.

Современная микроминиатюризация и новые технологии в создании материалов и радиоэлементов позволили максимальным образом использовать их в построении новой, современной схемы МИП и тем самым значительно уменьшить энергопотребление БЭ, а также его влияние на КМД. Появилась возможность сделать схему МИП (в основном это относится к БЭ) более компактной и экономичной [8], встроить в неё новые (ранее не используемые) элементы, например, схему управления (ранее это называлось – «пульт управления» [5] и было сделано как отдельный

блок) и схему аналого-цифрового преобразователя (АЦП) [10]. В результате у новой конструкции БЭ (и МИП) наряду с выполняемой функцией преобразователя «поле/напряжение» и выводом получаемых ИК аналоговых данных (АВ) на аналоговый регистратор (АР), появилась новая функциональная возможность. Это – осуществление преобразования изменений магнитного поля (МП) в цифровой код («поле/цифра»), которая позволила напрямую подключать БЭ через стандартный последовательный интерфейс (например, RS232) к ПК.

ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ СТРУКТУРНОЙ СХЕМЫ МИП И БЭ

Упрощенная структурная схема МИП и конструкция одного из вариантов БЭ (конструкция входящих в него электронных узлов), который используется во всех разработках ЦМВС «Кварц-4» [10, 15, 28], показаны на *рис. 4*.

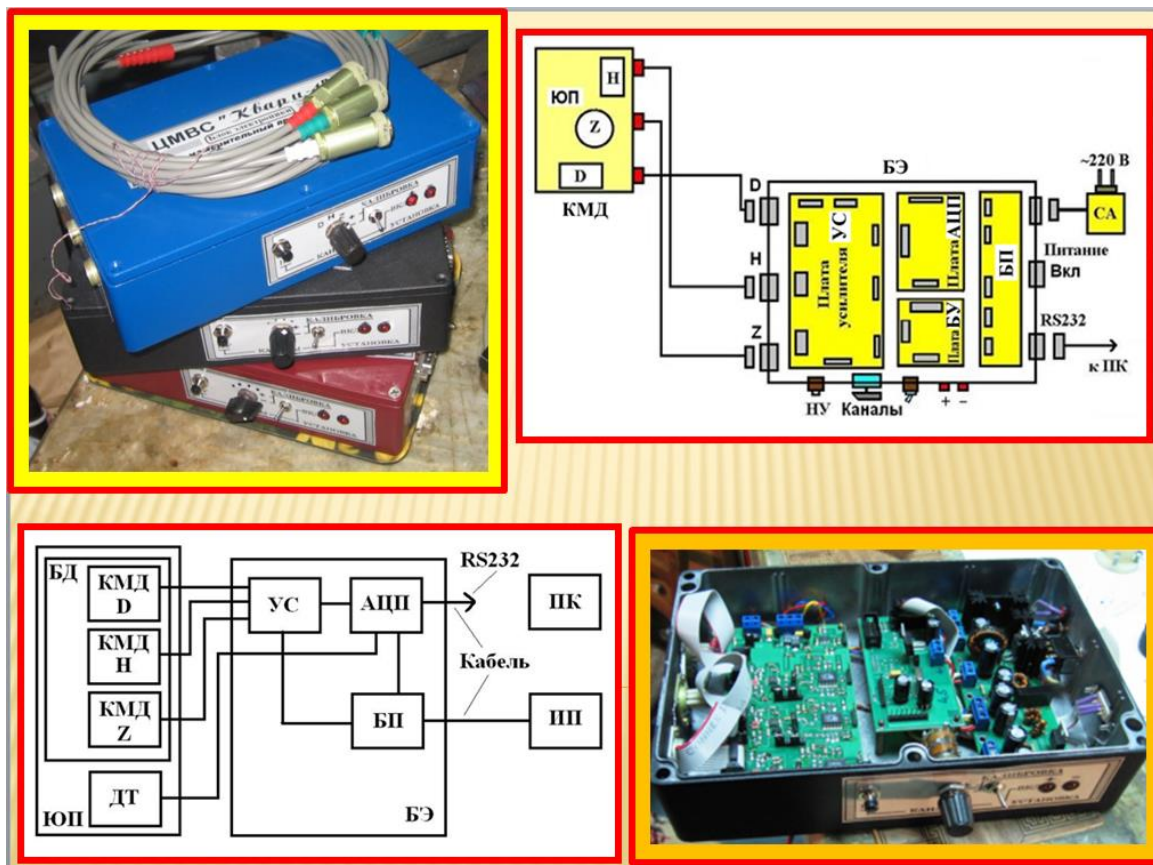


Рис. 4. Структурная схема МИП, схема расположения входящих в БЭ плат и электронных узлов, а также общий вид БЭ.

Структурная схема МИП состоит из следующих основных узлов: блока датчиков (БД), который расположен на юстировочной платформе (ЮП), БЭ, и источника питания (ИП). БД включает в себя три вариометра, состоящих из КМД D, H, Z с градуировочными кольцами, катушками обратной связи (ООС), ФЭП и элементами точной настройки на МП в точке измерений.

ЮП содержит элементы крепления КМД, жидкостные уровни и элементы юстировки платформы. Конструкция ЮП обеспечивает

взаимную ортогональность базисных векторов КМД с точностью до 1 угл. мин. и жесткую фиксацию относительно друг друга.

БЭ (см. *рис. 4*) включает в себя плату усилителей (УС) (трёхканальный УПТ), плату цифровую АЦП (контроллер, АЦП, последовательный порт RS232), плату блока управления (БУ) и блок питания (БП), построенный с использованием DC-DC преобразователей. БЭ обеспечивает передачу данных, обмен информацией и управляющими

командами через последовательный порт RS232 со скоростью не менее 9600 бод с ПК на расстоянии от 3 до 25 м.

В современных разработках БЭ используется датчик температуры (ДТ), который (в зависимости от варианта исполнения ЦМВС) устанавливается внутри корпуса БЭ или на ЮП и имеет немагнитное исполнение и тепловой контакт с корпусом КМД Z-вариометра.

Элементы БУ (элементы управления режимом работы и установки ИК) расположены на одной из боковых панелей корпуса БЭ. На торцевых панелях БЭ расположены разъемы для подключения КМД, ПК и источника питания – сетевого адаптера (СА). Сам корпус БЭ имеет немагнитное влагозащитное исполнение и располагается в непосредственной близости от КМД. В последних вариантах исполнения ЦМВС удалось добиться увеличения длины кабелей соединяющих БД и БЭ до 3...5 м.

Программное обеспечение (ПО) для МИП обеспечивает организацию базы данных ЦМВС, возможность обработки данных для использования их в формате, пригодном для участия, например, в международных программах сбора данных.

Схема МИП для всех вариантов исполнения ЦМВС «Кварц-4» является одинаковым функционально законченным узлом [10, 15, 17-22]. Благодаря оригинальному ПО все ИК МИП являются взаимозаменяемыми относительно подключаемых КМД и ФЭП.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ БЛОК ДЛЯ ЦМВС: ОСНОВНОЙ ВАРИАНТ

На *рис.5* представлены функциональная схема универсального БЭ и фото отдельных блоков, входящих в состав комплекта ЦМВС серии «Кварц-4» [16-18]: КМД, БЭ и СА.

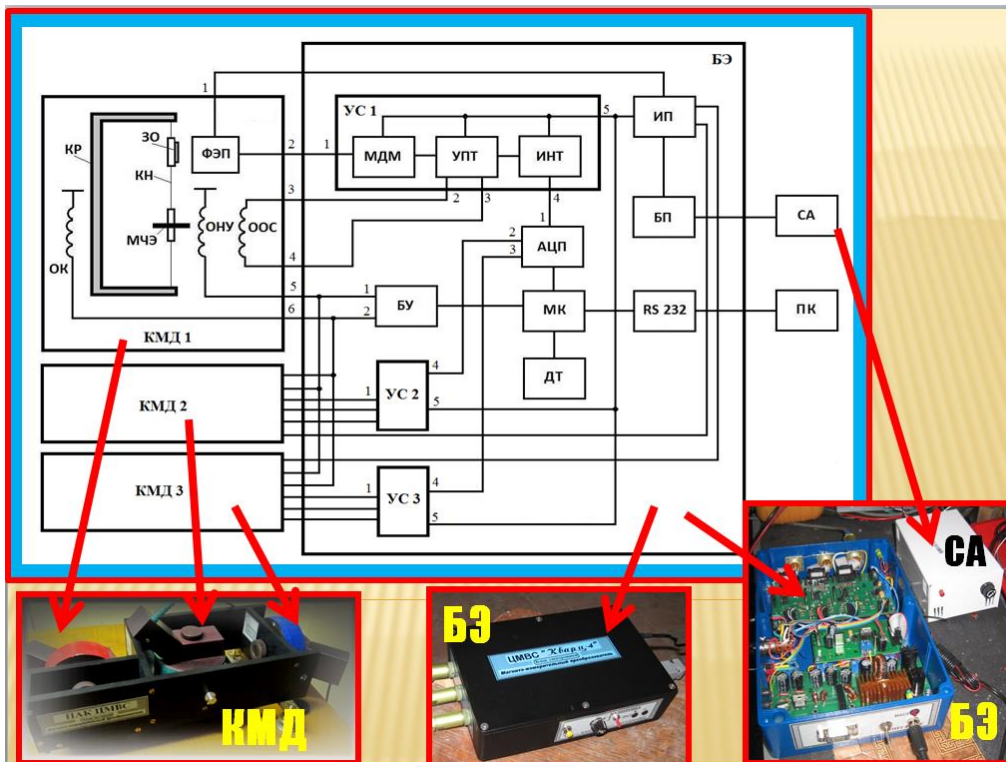


Рис.5. Функциональная схема основного варианта универсального БЭ для ЦМВС.

БЭ предназначен для управления работой всего прибора и включает в свой состав (см. *рис. 5*) следующие функциональные узлы и блоки:

- усилитель (УС) аналогового сигнала (три одинаковых ИК, - УС1...УС3), включающий в свой состав отдельные функциональные узлы и блоки: МДМ-усилителя (МДМ), усилителя постоянного тока (УПТ) и интегратора (ИНТ);
- трехканальный аналого-цифровой преобразователь (АЦП);
- микроконтроллер (МК) с отдельным подключенным каналом для измерения температуры окружающей среды - датчиком температуры (ДТ) типа LM35D, который может

быть выносным за пределы БЭ для контроля температуры КМД;

- блок управления (БУ);
- последовательный интерфейс RS232 для передачи данных и управления от ПК;
- блок питания (БП) с источником питания (ИП) для схемы ФЭП и электронных схем БЭ.

Конструктивно БЭ (см. *рис.4*), в отличие от всех ранее созданных ЦМВС, включает в себя (в одном корпусе) трехканальный усилитель (плата), схему управления режимами и калибровкой ИК (пульт управления), схемы АЦП и МК с ДТ (плата) и БП (плата).

Усилитель БЭ совместно с КМД представляет собой МИП, осуществляющий преобразование

МП, зафиксированное ИК (см. *рис.2*) в аналоговое напряжение (АВ) измерительного канала или (при помощи АЦП), - в цифровой код (ЦВ). Напряжение постоянного тока на АВ лежит в пределах $0... \pm 5$ В (как правило и практически во всех моделях БЭ используется для АЦП линейная часть преобразования в пределах $0... \pm 3$ В). С помощью ПО и схемы МК осуществляется автоматическая регулировка крутизны преобразования ИК «поле/напряжение» и устанавливается ширина динамического диапазона каждого ИК при помощи корректирующих коэффициентов преобразования (устанавливаемых на ПК). Поэтому, как было показано выше, - все каналы БЭ являются взаимозаменяемыми. При этом максимальная разрешающая способность каждого ИК (с учетом возможностей применяемого АЦП, созданного на основе микросхемы AD7734) выше, чем у всех известных конструкций ЦМВС [28] и достигает значения 0,001 нТл.

Линейность характеристики преобразователя «поле/напряжение», параметры АЦП и катушки ООС в КМД обеспечивают возможность устанавливать ширину динамического диапазона ИК БЭ до $5...6$ мкТл с предельной разрешающей способностью ИК, а также позволяют увеличить динамический диапазон каждого из ИК до 10 мкТл с разрешением не хуже 0,1 нТл.

Схема и конструкция трехканального усилительного тракта (УС1...УС3) построены таким образом, чтобы в процессе настройки каждого ИК была возможность изменения направления тока в катушках ООС и при калибровке КМД (ОК) спомощью перекоммутируемых переключателей-джамперов, установленных на плате УС. Это позволяет обеспечить как универсальность и взаимозаменяемость ИК, так и возможность работы БЭ с любым из созданных ранее разработок КМД и ФЭП.

Измеренная информация в цифровой форме из БЭ с помощью схемы МК передается по последовательному каналу связи RS232 в ПК. По этому же каналу осуществляются (при помощи ПК) связь с БУ в процессе проведения подготовительных и установочных работ КМД и их калибровки. ДТ, установленный и используемый в корпусе БЭ или вне его, - позволяет контролировать и регистрировать температуру окружающей среды с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

На боковой панели БЭ (см. *рис.5*) расположены органы управления для осуществления контроля и управлением работой прибора. На торцевых панелях БЭ установлены органы управления (переключатели) и разъемы (см. *рис.4*), предназначенные для подключения БКД и ПК при помощи соединительных кабелей.

Питание БЭ и всего прибора осуществляется от источника постоянного тока напряжением $9...15$ В. Предусмотрена возможность питание БЭ и от

сети переменного тока напряжением 220 В и с частотой 50 Гц при помощи стандартного СА. При этом потребляемая мощность составляет не более 2,7...3 ВА.

Габаритные размеры корпуса (выполненного из немагнитного материала) основного варианта исполнения БЭ, - $240 \times 165 \times 56$ мм а масса не превышает 1,2...1,4 кг. В отдельных разработках ЦМВС используются корпус БЭ размерами: $225(255) \times 145 \times 55$ мм.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ БЛОК ДЛЯ ЦМВС: ВАРИАНТ ДЛЯ РЕДКО ОБСЛУЖИВАЕМЫХ ПУНКТОВ НАБЛЮДЕНИЙ

В 2010 году была разработана новая концепция построения ЭБ для ЦМВС. Это было обусловлено необходимостью использования кварцевых станций не только в условиях МО, но и в условиях необслуживаемых или редко обслуживаемых (РО) пунктов наблюдений. Прибор должен работать в автономном автоматическом режиме в РО пунктах наблюдений в условиях больших изменений температуры окружающей среды, - до $\pm 40^\circ\text{C}$.

Функциональная схема ЦМВС представлена на *рис.6* и состоит из двух основных узлов: БД и БЭ [15]. Основные элементы ИК (схемы КМД, УС и АЦП) в новой разработке остались без изменений. Отличие состоит в том, БЭ имеет возможность питания от трёх альтернативных источников, - СА, АБ и СБ, при этом напряжение источника постоянного тока может находиться в пределах от 7 до 40 В. Максимальный цикл оцифровки АЦП аналоговых данных по всем ИК увеличен и составляет 100 изм/с, при этом усреднённые значения регистрируются и накапливаются во встроенную внутреннюю (ВН) память (до 8 Мб) или внешнюю (ФН) память ($2...4$ Гб) с циклом 1 изм/с. Штатный режим работы ЦМВС предусматривает регистрацию вариаций составляющих ВМИ поля Земли с точностью 0,1 нТл в измерительном диапазоне $0... \pm 6$ мкТл, при этом 24-разрядный АЦП позволяет реализовать разрешающую способность станции до $1...10$ пТл в условиях с малым уровнем техногенных шумов и помех. Контроль температуры внутри БЭ (или вблизи КМД) реализован при помощи схемы МК и интегрального ДТ, который имеет точность измерения $\pm 0,1^\circ\text{C}$.

Управление всеми режимами работы и калибровкой КМД станции, а также передача данных, - осуществляется дистанционно автоматически при помощи МК, а также и каналов GPRS или BT, расположенных на плате накопителя данных (НД). Для синхронизации ЦМВС с мировым временем и для её позиционирования в пространстве используется встроенный приёмник GPS, основная схема которого расположена на плате НД (см. фото на *рис.6*). Для этого БЭ оборудован специальными выносными антеннами А1...А3.

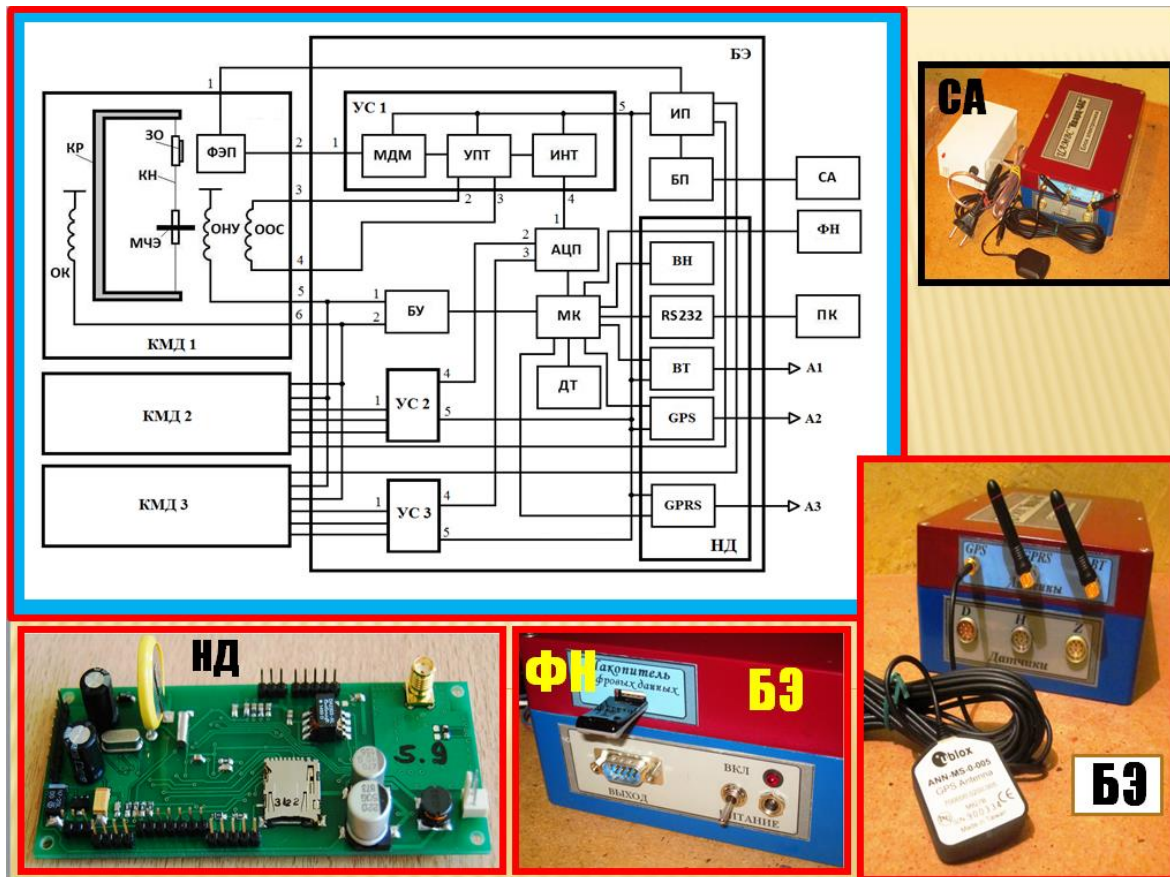


Рис.6. Функциональная схема БЭ (и фото) в составе ЦМВС для РО пунктов наблюдений, а также фото платы НД.

Блок НД представляет собой одноплатное устройство (4-я плата в составе БЭ) и предназначен для сбора, хранения и передачи данных в автоматическом режиме с возможностью дистанционного управления и включает в себя следующие функциональные узлы:

- два трёхпроводных последовательных порта с уровнями сигналов, соответствующими RS232;
- модуль *bluetooth* ВТ (опции дальности передачи данных: модуль 2 класса – до 30 м, модуль 1 класса – до 100...200 м, модуль 1 класса с выносной антенной – до 300...400 м);
- модуль GSM со встроенным слотом для установки сменной *sim*-карты;
- модуль GPS, оснащённый по выходу временным стробом;
- модуль накопителя на «флэшке» (ФН) объёмом до 4 Гб;
- часы реального времени с энергонезависимым питанием;
- буферная энергонезависимая память (ВН) объёмом 8 Мб.

Все схемы платы НД разработаны с предельными требованиями по энергосбережению с применением 3-вольтовой элементной базы. Максимальное потребление платы НД (в режиме передачи данных) составляет не более 150 мА, а потребление платы в режиме сбора и хранения данных составляет не более 20 мА. Общее (максимальное) потребление БЭ при использовании пассивных датчиков в режиме

дистанционного управления работой и передачи данных составляет не более 200...230 мА.

Схема и конструкция БЭ разработана с учётом предельных требований по минимизации энергопотребления, при этом максимально возможное её потребление от постоянного источника напряжением 12 В составляет не более 2,5...3 Вт. БЭ выполнен в герметичном немагнитном влагозащитном корпусе (класс защиты IP65) размером 240 x 165 x 86 мм.

В работе с созданным БЭ могут использоваться различные геофизические и физические датчики, как с аналоговым выходом, так и цифровые, - работающие по протоколу последовательного порта (RS232). Такими датчиками могут быть, например, интегральные или аналоговые ДТ, МИП созданные на базе феррозондовых датчиков (ФД), датчики для измерения вертикальной и горизонтальных компонент электрического поля (ДЭП), индукционные магнитные датчики (ИД), а также различные аналоговые или цифровые датчики индикации прогноза погоды (давление, влажность и проч.).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Конструкции созданных универсальных ЭБ являются в настоящее время основным элементом для разработки и построения современных кварцевых ЦМВС. Созданные на его основе МИП имеют возможность применения различных

конструкций аналоговых фотоэлектрических преобразователей, - в том числе созданных ранее.

В процессе проведенных работ в институте на базе разработанных различных вариантов БЭ созданы различные варианты ЦМВС на основе КМД и других приборов [13-32].

Варианты построения схемы ЭБ используют современные технические и технологические решения, связанные преобразованием аналогового сигнала от датчиков в цифру, с регистрацией и передачей измеренных накопленных данных различными способами.

Построенные на основе блоков электроники современные кварцевые станции предназначены для проведения геомагнитных работ в различных условиях, - как в обсерваториях и стационарных пунктах наблюдений, так и для работы на РО пунктах наблюдений и в полевых исследованиях.

Литература

1. Бурцев Ю.А., Мансуров С.М., Тимофеев Г.А. Автономная вариационная станция для геомагнитных исследований в Антарктиде // Геомагнитное приборостроение. М.: Наука, 1977. С.60-64.

2. Бобров В.Н., Гайдаш С.П., Куликов Н.Д. Двухкомпонентная морская магнитная вариационная станция // Фундаментальные проблемы электромагнитных исследований в океанах. М.: ИЗМИРАН, 1979. С.45-50.

3. Цифровая магнитовариационная станция ЦМВС-2. Проспект СКБ ФП. М.: НТО АН СССР, 1982. – 2 с.

4. Цифровая магнитовариационная станция ЦМВС-6. Проспект СКБ ФП Института общей физики АН СССР, 1987. – 2 с.

5. Бурцев Ю.А. Магнитовариационная станция Кварц-3Е в международных исследованиях // Сборник «Материалы международной школы-семинара по компьютерной автоматизации и информатизации». М.: МГУ, 2000. С.89-91.

6. Амиантов А.С., Зайцев А.Н., Одинцов В.И., Петров В.Г. Вариации магнитного поля Земли: База цифровых данных магнитных обсерваторий России за период 1984-2000 гг. (брошюра и оптический диск CD-ROM). М.: СтройАрт, 2001. – 52 с.

7. Трёхкомпонентная цифровая магнитовариационная станция МВС. Руководство по эксплуатации. Троицк: ИЗМИРАН, 2006. – 14 с.

8. Бобров В.Н., Любимов В.В. Цифровая магнитовариационная станция // Датчики и Системы / Новые приборы. М.: «ООО СенСиДат», 2005. №.2. С.40-42.

9. Белов Б.А., Бурцев Ю.А., Кириаков В.Х., Любимов В.В. Цифровые кварцевые магнитовариационные станции // Экономика и производство. / Технологии, оборудование, материалы / Журнал организаторов производства.

М., 2005. №.4. С.73-77. DOI: 10.5281/zenodo.6787250

10. Бурцев Ю.А., Кириаков В.Х., Любимов В.В. Цифровая магнитовариационная станция «КВАРЦ-4» // Датчики и Системы / Новые приборы. М.: «ООО СенСиДат», 2006. №.1. С.45-48.

11. Трёхкомпонентная цифровая магнитовариационная станция МВС. Руководство по эксплуатации. Троицк: ИЗМИРАН, 2006. – 14 с.

12. Белов Б. А., Бурцев Ю. А., Кириаков В. Х., Любимов В. В. Цифровые кварцевые магнитные вариационные станции // Датчики и Системы / Новые приборы. М.: «ООО СенСиДат», 2006. №.5 С.37-40.

13. Кириаков В.Х., Любимов В.В. Цифровая магнитная обсерватория // Приборы. М., 2009. №12. С.10-13.

14. Кириаков В.Х., Любимов В.В. Цифровая магнитная обсерватория: опыт построения и варианты // Найновите постижения на Европейската наука-2011 / Материали за VII Международна научна практична конференция 17-25 юни 2011/ Физика. Том 36. София «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2011. С.37-46. DOI: 10.5281/zenodo.3724599

15. Кириаков В.Х., Любимов В.В. Цифровая магнитовариационная автоматическая станция // Dynamika naukowych badan – 2012 / Materialy VIII Miedzynarodowej naukowo-praktycznej konferencji 07 – 15 lipca 2012/ Fizyka. Vol.22, Przemysl. 2012. S.31-35. DOI: 10.5281/zenodo.4776973

16. Любимов В.В. Универсальная цифровая магнитовариационная станция на базе кварцевых магнитных датчиков для работы в широком диапазоне полей // Бъдещето въпроси от света на науката – 2015/Материали за XI Международна научна практична конференция 17-22 декември 2015/ Физика. Том 18. София «Бял ГРАД-БГ» ООД, 2015. С.27-36. DOI: 10.5281/zenodo.3605411

17 Любимов В.В. Станция трёхкомпонентная магнитовариационная // Приборы. М., 2016. №12. С.1-4.

18. Любимов В.В. Магнитовариационная станция для геофизических исследований // Геофизический вестник / Евро-Азиатское геофизическое общество, М.: «ПОЛИПРЕСС», 2016, №6. С.9-12. DOI: 10.5281/zenodo.2567489

19. Любимов В.В. Новые приборы для геомагнитных исследований: магнитовариационная станция // Уральский научный вестник. Уралск: ТОО Уралнаучкнига, 2016. Т. 10. С. 28-32. DOI: 10.5281/zenodo.3588550

20. Любимов В.В. Универсальная цифровая магнитовариационная станция на базе кварцевых магнитных датчиков для работы в широком диапазоне полей // Приднепровский научный вестник. Днепропетровск: «Наука и образование», 2016. Т. 9. С.95-105. DOI: 10.5281/zenodo.5593499

21. Любимов В.В. Новые приборы для геомагнитных исследований: магнитовариационная станция // Nauka I studia

/Fizyka. Przemysl. 2016. NR 24-6 (160). S.28-33. DOI: 10.5281/zenodo.3724923

22. Любимов В.В. Высокостабильный магнитный измерительный преобразователь на основе кварцевых датчиков для цифровых геомагнитных обсерваторий различных широт // Nauka I studia. Przemysl. 2016. Vol.10. S.400-413. DOI: 10.5281/zenodo.5593592

23. Любимов В.В. Цифровой магнитоизмерительный преобразователь на основе кварцевого магнитного датчика и миниатюрного фотоэлектрического преобразователя линейных и угловых перемещений // Nauka I studia. Przemysl. 2016. Vol.11. S.82-94 DOI: 10.5281/zenodo.5171931

24. Любимов В.В. Магнитоизмерительный преобразователь на основе кварцевых датчиков // INTERNATIONAL SCIENCE PROJECT, Turku, Finland, 2018. 1 часть №21. С.13-20. DOI: 10.5281/zenodo.2566013

25. Любимов В.В. Магнитоизмерительный преобразователь для цифровых вариационных станций // Приборы, М., 2019. №8. С.11-16.

26. Любимов В.В. Двухкомпонентный кварцевый вариометр // Евразийское научное объединение. М., 2019. №12 (58). С.50-53. DOI: 10.5281/zenodo.3603859

27. Любимов В.В. К 80-летию ИЗМИРАН: цифровые кварцевые магнитовариационные

станции (история их создания и применения) // Евразийское научное объединение. М., 2020 №4 (62). С.480-493. DOI: 10.5281/zenodo.3818532

28. Любимов В.В. Кварцевые датчики магнитного поля, магнитовариационные станции и приборы на их основе (Библиография) // Евразийское научное объединение. М., 2020 №5 (63). С.130-144. DOI: 10.5281/zenodo.3888083

29. Любимов В.В. Трёхкомпонентный кварцевый магнитометр // Евразийское научное объединение. М., 2020 №12 (70). С.100-104. DOI: 10.5281/zenodo.4430324

30. Любимов В.В. Магнитовариационная станция // Приборы, М., 2021 №12 (258). С.9-13.

31. Lyubimov V.V. Compact digital quartz variometer for observatories and scientific research // Journal of Engineering and Technology Development Research (JETDR). ArtMedia24. Industriestrasse 8,74589 Satteldorf Germany.2022.Vol.1, No.1.Pp.14-16. DOI: 10.5281/zenodo.6077888

32. Lyubimov V.V. Magnetometros basados en sensores de cuarzo (Magnetometers based on quartz sensors) // Materials of the foreign international scientific conference "Trends in the development of science and global challenges" (October 16, 2022, Nicaragua, Managua) / Technical sciences. HNRI "National development", 2022. P.30-41. DOI: 10.37539/MAN4.2022.17.41.003

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК 519.872

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ТЕОРИИ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ.

Амосова Н.Н.

*Доцент, кандидат физико-математических наук,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого (СПбПУ)
Россия, 195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29,*

MATHEMATICAL ASPECTS OF THE THEORY OF QUEUING.

N.N. Amosova

*Docent, Candidat of phys.-mat. sciences,
Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU)
Russia, 195251, St.Petersburg, Polytechnicheskaya, 29
DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.103.1732*

АННОТАЦИЯ

В работе излагаются основные понятия и приводится история возникновения и развития теории массового обслуживания. Рассмотрены постановка задач теории массового обслуживания, основные элементы, характеризующие структуру системы массового обслуживания. Приведены основные типы систем массового обслуживания: системы массового обслуживания с отказами и с ожиданием, системы с неограниченным числом обслуживающих аппаратов, многофазные системы массового обслуживания и системы с приоритетами. Рассмотрены различные характеристики рассматриваемых систем, являющиеся показателями качества функционирования системы. Это показатели эффективности (вероятностные оценки) и экономические оценки работы системы.

ANNOTATION

The paper outlines the basic concepts and gives the history of the emergence and development of the theory of queuing. The formulation of problems in the theory of queuing, the main elements that characterize the structure of the queuing system are considered. The main types of queuing systems are given: queuing systems with failures and waiting, systems with an unlimited number of servers, multi-phase queuing systems and systems with priorities. Various characteristics of the systems under consideration, which are indicators of the quality of the system's functioning, are considered. These are performance indicators (probabilistic estimates) and economic estimates of the system operation.

Ключевые слова: системы массового обслуживания, системы с отказами и с ожиданием, процесс размножения и гибели, показатели эффективности, экономическая оценка.

Keywords: queuing systems, systems with failures and with waiting, the process of reproduction and death, performance indicators, economic evaluation.

Введение

Теория массового обслуживания – один из прикладных разделов теории вероятностей, который входит в учебные планы различных направлений и специальностей.

На практике и в быту мы в той или иной форме встречаемся с обслуживанием и с системами массового обслуживания. Примерами таких систем могут служить телефонные станции, ремонтные мастерские, магазины, кассы, парикмахерские, поликлиники, заводские цеха, аэропорты и т.д. Рассмотрение и описание подобных систем с помощью детерминистических моделей приводит к значительным ошибкам в выводах и фактических рекомендациях. Вероятностное описание приводит к моделям, анализируемым методами теории вероятностей, теории массового обслуживания и статистического моделирования.

Теория систем массового обслуживания как раздел теории вероятностей возникла сравнительно недавно.

Первые важные результаты в области теории массового обслуживания были получены датским математиком А.К. Эрлангом (1878-1920), сотрудником Копенгагенской телефонной компании. Так как объектом исследования были телефонные системы, то и сейчас в работах по теории массового обслуживания используется терминология, заимствованная из телефонии: требования, вызовы, заявки, каналы связи, длительность разговора.

В середине 30-ых годов 20-го столетия У. Феллер (1906-1971), американский математик, ввел понятие процесса размножения и гибели, что привлекло внимание математиков к теории массового обслуживания.

Дело в том, что большое место в теории массового обслуживания при описании многих простейших систем занимает процесс, называемый процессом рождения и смерти (или процессом размножения и гибели), имеющий многочисленное применение в биологии.

Далее, российский математик А.А. Марков (1856-1922) впервые исследовал частный случай процесса без последствия, в котором прошлое процесса при известном настоящем не оказывает влияния на будущее процесса. Это свойство присуще потокам требований, поступающим в систему массового обслуживания. Такие процессы – цепи Маркова с непрерывным временем и целочисленным множеством значений – лежат в основе теории массового обслуживания.

Вслед за А.А. Марковым общую теорию марковских процессов, в том числе и цепей развивали российский математик А.А. Колмогоров (1903-1988) и его ученики.

Следует отметить, что в экономике и сфере управления производством применение теории массового обслуживания касается организации работы участка, цеха, завода, отрасли, магазина, транспортных средств и т.д.

Методы теории массового обслуживания используются и в других науках, например, в теории надежности, в разработке автоматизированных систем управления различных видов.

Методология

Основная цель теории массового обслуживания – дать рекомендации по рациональному построению системы массового обслуживания.

Предмет теории массового обслуживания – установление зависимости между характером потока поступающих требований, производительностью отдельного обслуживающего аппарата, числом обслуживающих аппаратов и эффективностью обслуживания.

Основные элементы, характеризующие структуру системы массового обслуживания, следующие:

a – входящий поток требований на обслуживание;

b – очередь требований, ожидающих начала обслуживания;

c – выходящий поток требований, получивших отказ;

d – обслуживающие аппараты;

e – выходящий поток обслуженных требований.

Следует заметить, что возможны системы, в которых отсутствуют элементы, описанные в пунктах b и c.

Процесс функционирования систем массового обслуживания носит случайный характер и поэтому методы исследования систем массового обслуживания сводятся к построению некоторых случайных процессов, которые затем исследуются.

Действительно, заявки на обслуживание в общем случае поступают в случайные моменты времени и время, затрачиваемое на обслуживание каждой заявки, также случайное. По сути дела, теория массового обслуживания — это специфический раздел теории случайных процессов.

Так как практику интересует в основном стационарный режим работы систем массового обслуживания, когда вероятности состояний систем не зависят от времени, то математическими моделями являются системы алгебраических, а не дифференциальных уравнений. Их построить легче на основе графов состояний с указанием интенсивностей переходов и принципа равновесия в стационарном режиме: сколько в среднем пришло требований в узел системы – столько в среднем и ушло.

Как было указано ранее, цель теории массового обслуживания – определение различных характеристик рассматриваемой системы, являющихся показателями эффективности функционирования системы. Для различных типов систем такие показатели различны.

Заметим, что виды систем массового обслуживания неограниченно разнообразны и, более того, всякая система массового обслуживания, рассматриваемая в теории, есть абстрактная математическая модель некоторой реальной системы.

Поэтому рассмотрим лишь основные типы систем массового обслуживания.

Системы массового обслуживания с отказами и с ожиданием.

В системах массового обслуживания с отказами требование, поступившее в систему в тот момент, когда все обслуживающие аппараты заняты, получает отказ и покидает систему необслуженным. Поэтому часто такие системы называют еще системами с потерями. Системы с отказами характерны для телефонии, откуда и произошло их название. В системах с ожиданием требование, поступившее в систему в тот момент, когда все n обслуживающих аппаратов заняты, становится в очередь и ждет начала обслуживания в порядке очереди. При этом очередь может быть неограниченно длинной и требование может покинуть систему только тогда, когда оно будет полностью обслужено. Примером такой системы является система ремонта неисправной техники. Следует выделить два типа смешанных систем массового обслуживания:

a) системы с ограничением по длине очереди. В них требование становится в очередь в том случае, если длина очереди не превышает некоторого числа m . В противном случае требование получает отказ в обслуживании. Например, заявка на доставку груза может быть принята, а может быть и отклонена, если уже очень большая очередь.

b) системы с ограничением по времени ожидания. В них время ожидания ограничено некоторым случайным числом T . Если время ожидания в очереди меньше T , то требование обслуживается, в противном случае получает отказ.

Очередь в такой системе можно интерпретировать как очередь с нетерпеливыми клиентами. Реальные очереди чаще всего такими и бывают, так как у каждого человека свой предел ожидания.

Можно привести еще такой пример: самолеты, идущие на посадку образуют входящий поток требований, но время ожидания у них ограничено из-за ограниченности запаса горючего. При невозможности принять самолет в течение определенного промежутка времени, он должен быть переориентирован на другие аэродромы.

Обслуживающие системы с ограниченным и неограниченным числом обслуживающих аппаратов. К системам с неограниченным числом обслуживающих аппаратов следует отнести те системы, в которых поступившее требование немедленно начинает обслуживаться. В таких системах нет очередей и получившее требование не может получить отказ. Примером может служить система доставки срочной почты, в которой нет ни отказов, ни очередей.

Однофазные и многофазные системы массового обслуживания. В многофазных системах выходящий поток заявок, обслуженных в первой фазе, является входящим для второй фазы и т.д. Такими являются производственные структуры при массовом производстве.

Приоритетные системы (системы с приоритетами). В этих системах на обслуживание поступает не один, а несколько потоков входящих требований P_1, P_2, \dots, P_k . При этом в первую очередь обслуживаются требования потока P_1 , требования P_2 обслуживаются в порядке своей очереди после требований P_1 и т.д. По такому принципу строится работа системы скорой помощи; в поликлинике больных с острой болью принимают вне очереди. Примером такой системы также является приоритетное обслуживание отдельных категорий пассажиров в аэропорту.

Приведем теперь показатели эффективности для некоторых типов систем.

Например, если рассматривать систему с отказами (потерями), то показателями эффективности здесь являются вероятность отказа, среднее число занятых аппаратов, вероятность простоя.

Для системы с ожиданием, при условии, что длина очереди, а также время ожидания не ограничены, показатели эффективности – это вероятность того, что требование, поступившее в систему, будет ожидать начала обслуживания, среднее время ожидания начала обслуживания, средняя длина очереди и т.д.

Зная среднее число λ требований, поступающих на обслуживание в единицу времени, и условия работы системы, можно с помощью этих характеристик подобрать рациональное число обслуживающих аппаратов. Иногда это можно сделать введя экономическую оценку работы системы.

Например, одна из простейших экономических оценок вариантов системы с отказами может быть записана в виде

$$J = dc_1n + c_2M_1 + c_3(n - M_1) + c_4T p_n \lambda,$$

где α – коэффициент предельной экономической эффективности капитальных вложений; c_1 – цена аппарата; c_2 и c_3 – годовые текущие затраты на обслуживание работающего и стоящего аппаратов; c_4 – потери производства от невыполнения одной работы (потери одного отказа), T – годовой фонд рабочего времени системы.

Здесь n – число обслуживающих аппаратов, p_n – вероятность отказа, M_1 – среднее число занятых аппаратов.

Подробно общие вопросы построения систем массового обслуживания – входящий поток требований, время и дисциплина обслуживания, а также простейшие и сложные системы массового обслуживания рассмотрены в [1-3].

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что задачи теории массового обслуживания направлены на определение такого варианта системы, при котором будет обеспечен минимум затрат от простоя каналов обслуживания, потерь времени, потерь заявок или в результате отказа, или в результате ухода из очереди.

Список литературы.

Амосова Н.Н., Максимов Ю.Д. Математика. Теория массового обслуживания. Учебное пособие. Изд-во Политехн. ун-та, 2013, 200с.

Амосова Н.Н., Ку克林 Б.А., Макарова С.Б. и др. Вероятностные разделы математики. Учебник для бакалавров технических направлений. Под общей редакцией Ю.Д. Максимова. С.-Петербург «Иван Федоров», 2001, 589 с.

Amossowa N., Gillert H., Kuchler U., Maximow J. D. Bedienungstheorie. Leipzig: Teubner Verlagsgesellschaft, 1986. – 256 s.

СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ С ХАОТИЧЕСКОЙ ДИНАМИКОЙ*Перевозников Е.Н.**Канд. физ.-мат. наук, доцент,
Военно-космическая академия им. А.Ф. Можайского***SPECTRAL ANALYSIS OF NONLINEAR SYSTEMS WITH CHAOTIC DYNAMICS***E.N. Perevoznikov**Cand. phys.-mat. Sci., Associate Professor,
Military Space Academy. A.F. Mozhaisky***АННОТАЦИЯ**

На примере модельных задач Ресслера и Спротта рассматриваются методы спектрального анализа динамики систем с хаотическим поведением. Отмечена недостаточность традиционного подхода к исследованию динамики возмущений основанного на анализе корней классического спектрального уравнения. Предлагается для исследования подобных систем использовать спектральные уравнения с различными собственными значениями, позволяющие учесть хаотичность и множественность состояний.

ANNOTATION

Using the model problems of Ressler and Sprott as examples, methods of spectral analysis of the dynamics of systems with chaotic behavior are considered. The insufficiency of the traditional approach to the study of the dynamics of perturbations based on the analysis of the roots of the classical spectral equation is noted. It is proposed to use spectral equations with different eigenvalues to study such systems, which make it possible to take into account the randomness and multiplicity of states.

Ключевые слова: нелинейные системы, неустойчивости и хаос, спектральные методы анализа.

Key words: nonlinear systems, instabilities and chaos, spectral methods of analysis.

1. Введение

Значительное количество публикаций посвященных нелинейным системам со сложной хаотической динамикой и различным переходным процессам в них говорит о неослабевающем интересе к этим системам и методам описания их [1-8].

К проблемам описания нелинейных систем со сложной динамикой приводят задачи различных областей математики, механики, физики, теории управления и других наук. Например: возникновение хаоса в детерминированной задаче трех тел; неустойчивость фазовых траекторий в задачах статистической физики; проблема перехода к турбулентности в гидродинамике; возникновение хаотических колебаний в нелинейных задачах радиотехники и электроники и др.

У истоков методов описания сложной динамики стояли стояли такие классики, как Пуанкаре, Ферми, Ляпунов, Колмогоров, Андронов. Много сделано в изучении и понимании процессов сложной динамики и возникновения хаоса в работах Синая, Шильникова, Гапонова-Грехова, Ланде, Лоренца, Кузнецова, Рабиновича, Анищенко и др. [1-8].

Одним из основных методов анализа сложной динамики и условий возникновения хаоса является расчет показателей Ляпунова [7,8]. Определение Ляпуновских показателей является непростой задачей в основном реализуемой численными методами. В настоящей работе рассматриваются спектральные методы – классический и предлагаемая его модификация- метод различных собственных значений (РСЗ). Возможности

методов сравниваются на модельных задачах Ресслера и Спротта явно демонстрирующих хаотическое поведение.

2. Классический спектральный метод анализа устойчивости.

Пусть уравнения (1), описывающие исследуемую на устойчивость систему, представляют собой совокупность нелинейных автономных уравнений

$$d_t a_\alpha \equiv \frac{da_\alpha}{dt} = F_\alpha(\{a_\alpha\}) \quad (1)$$

Динамика возмущений системы (1) в этом случае описывается уравнениями

$$d_t \delta a_\alpha = \sum_\beta \frac{\delta F_\alpha}{\delta a_\beta} \cdot \delta a_\beta \equiv E_{\alpha\beta} \delta a_\beta \quad , \quad \alpha, \beta = 1 \dots n \quad (2)$$

где $E_{\alpha\beta}(\{a_\alpha(t)\})$ – элементы эволюционной матрицы, зависящие от динамических переменных $\{a_\alpha\}$ и времени t .

Если все временные производные в (2) отрицательны, то возмущения затухают и система устойчива по Ляпунову. Если существует хотя бы одна положительная производная, то фазовые траектории разбегаются, система неустойчива. Соотношение знаков временных производных позволяет также определить возможность хаотического поведения и образования в фазовом

пространстве сложных локализованных конструкций – аттракторов [1,8] (см. рис.1)

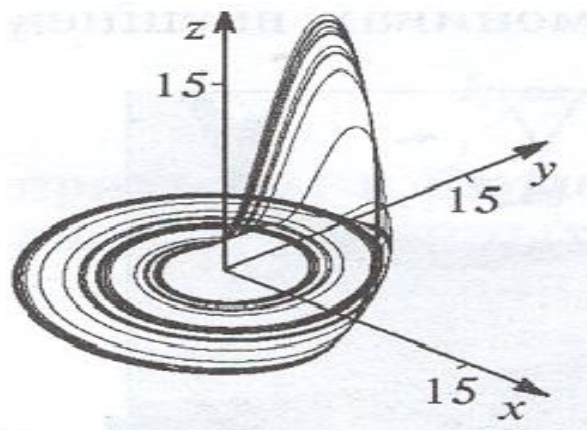


Рис.1 Аттрактор Ресслера при $e = d = 0.2$ $r = 5.7$

А именно : если знаки собственных значений $(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3)$ - временных производных (для трехмерных систем) равны

- a) $Sgn(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \Rightarrow (-, -, -)$
- b) $Sgn(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \Rightarrow (0, -, -)$,(3)
- c) $Sgn(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \Rightarrow (-, 0, +)$

то динамический режим имеет характер соответственно

- a – устойчивой точки;
- b – предельного цикла;
- c – аттрактора (хаотической динамики).

Т.е. хаотическое поведение характеризуется наличием в спектре особой точки седло-фокуса и выражается в нерегулярных неустойчивых колебаниях. Хаос подразделяется на диссипативный и активный. Диссипативный хаос связан с наличием притягивающих центров и уменьшением фазового объема системы (напр. хаос в модели Лоренца), при активном хаосе фазовые траектории разбегаются и фазовый объем увеличивается (см. рис.1).

Условием диссипативности- активности хаоса является дивергенция вектора скоростей -системы $\vec{B}(\partial_t x, \partial_t y, \partial_t z)$ одновременно являющаяся одним из условий устойчивости

$$divB = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} .(4)$$

Если $divB < 0$ фазовый объем уменьшается, траектории сближаются - хаос диссипативный. Если $divB > 0$ то фазовый объем увеличивается, траектории разбегаются – система активна

Согласно классическому спектральному методу знаки временных производных в системе (2) соответствуют знакам корней спектрального уравнения - (CV),

которое представляет собой условие разрешимости системы (2) и имеет вид полинома относительно спектрального параметра λ

$$D = \det[\delta_{\alpha,\beta}\lambda - E_{\alpha,\beta}] = \lambda^n + \sum_{i=1}^n a_i \cdot \lambda^{n-i} = 0 .(5)$$

Поэтому классический спектральный анализ сводится к анализу корней спектрального уравнения. А работах [9,10] сформулированы критерии нейтральности, которые позволяют не решая спектральные уравнения по коэффициентам динамических или спектральных уравнений получать условия возникновения неустойчивости и хаоса линейных систем (нейтральность-промежуточное состояние между устойчивыми и неустойчивыми состояниями, условие нейтральности- $\lambda=0$).

Уравнения для собственных векторов эволюционной матрицы $\{\chi_i(\lambda_k)\}$ и решений системы (2) ,в этом случае, соответственно имеют вид

$$\begin{aligned} (\delta_{im}\lambda_k - e_{im}) \cdot \chi_{im}(\lambda_k) &= 0 \\ a_i &= C_m \cdot \chi_{im}(\lambda_k) \cdot \exp(\lambda_k t) .(6) \end{aligned}$$

Этот подход хорошо применим для линейных систем (их можно свести к одному уравнению высшего порядка с одним спектральным параметром). Однако, применение классического спектрального метода к нелинейным системам, особенно к системам с хаотической динамикой вызывает ряд вопросов:

а) n -мерные системы с хаотической динамикой характеризуются n числом вещественных параметров - показателей Ляпунова, тогда как спектральный метод дает меньшее количество (например для трехсистем с хаосом – три показателя Ляпунова, а по спектральному методу- один вещественный корень и два комплексно сопряженных т.е. два вещественных параметра);

б) из (5) следует, что все компоненты собственного вектора одинаково зависят от времени , тогда как в действительности поведение

компонент различно (см.рис.1). В традиционном анализе это частично снимается линейной комбинацией собственных векторов (5);

в) классический подход указывает лишь границу устойчивости-неустойчивости (в том числе перехода к хаосу) а действительности имеется чередование областей регулярной и хаотической динамик, т.е. несколько различных динамических режимов.

Выше отмеченное указывает на недостаточность в традиционном варианте спектрального метода для описания систем с хаотической динамикой и необходимости его модернизации.

Заметим, что метод L-критерия [9] описывает динамику n – мерных систем n – вещественными параметрами.

Сформулируем для описания систем с хаотической динамикой метод различных собственных значений – РСЗ.

3 Метод РСЗ

Предварительно отметим следующее: известно, что системы третьего порядка отражают основные особенности динамики нелинейных систем, поэтому далее для определенности будем говорить только о них.

Предположим, что в уравнении для возмущений (2) временные производные характеризуются различными спектральными параметрами λ , тогда спектральное уравнение для трех системы принимает вид

$$\det[\delta_{ik}\lambda_i - e_{ik}] = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 - (\lambda_1\lambda_3e_{22} + \lambda_1\lambda_2e_{33} + \lambda_3\lambda_2e_{11}) + \sum_{i=1}^3 \lambda_i A_i + D = 0$$

$$A_1 = e_{22}e_{33} - e_{23}e_{32}, A_2 = e_{11}e_{33} - e_{13}e_{31}, A_3 = e_{11}e_{22} - e_{12}e_{21}, \quad .(7,a)$$

$$D = e_{11}(e_{23}e_{32} - e_{22}e_{33}) + e_{33}e_{12}e_{21} + e_{22}e_{13}e_{31} - e_{12}e_{23}e_{31} - e_{13}e_{32}e_{21}$$

Отметим что, спектральное уравнение в этом случае не имеет вид полинома относительно одного спектрального параметра λ , а представляет собой алгебраическую функцию трех взаимозависимых спектральных параметров $-\lambda_i$.

Полагая, например, $\lambda_1 = Re \lambda_1 = \lambda$, $\lambda_{2,3} = \alpha \pm i\omega$ из СУ (7) после выделения вещественной и мнимой частей уравнения получаем:

$$(\alpha^2 + \omega^2) \cdot (\lambda - e_{11}) - \lambda\alpha(e_{22} + e_{33}) + A_1\lambda + \alpha(A_2 + A_3) + D = 0$$

$$\omega[\lambda(e_{22} - e_{33}) + (A_2 - A_3)] = 0 \quad .(7,b)$$

Из (7,б) для λ_1 , α имеем

$$\lambda_1 = \frac{A_3 - A_2}{e_{22} - e_{33}}, \quad \alpha_{2,3} = \frac{-M \pm \sqrt{M^2 - 4NG}}{2N}$$

$$N = \lambda_1 - e_{11}, M = -\lambda_1(e_{22} + e_{33}) + A_2 + A_3, G = \omega^2(\lambda_1 - e_{11}) + \lambda_1 A_1 + D \quad .(8)$$

Соотношения (8) дают нам три вещественных параметра, два из которых зависят от частоты- ω и ограничение для ω - ($M^2 - 4NG \geq 0$). Также можно получить аналогичные (7,8) уравнения для случаев $\lambda_2 = Re \lambda_2 = \lambda$, $\lambda_3 = Re \lambda_3 = \lambda$. Это дает дополнительно еще два динамических режима.

Таким образом, зависимость спектральных параметров от частоты и дополнительные

динамические режимы образуют области неустойчивости и хаоса.

Продемонстрируем на модельных задачах Ресслера и Спротта эти методы (классический спектральный и РСЗ).

4.Модельная задача Ресслера -нелинейная задача имеющая явно выраженную область хаотического поведения с аттрактором представленным на рис.1. см. [7,8].

Уравнения модели Ресслера имеют вид

$$\begin{aligned} \partial_t x &= -y - z \\ \partial_t y &= x + e \cdot y \\ \partial_t z &= d - r \cdot z + x \cdot z \end{aligned} \quad .(9)$$

x, y, z – динамические переменные; e, d, r – параметры, γ – управляющий параметр. Дивергенция вектора скоростей $\vec{B}(\partial_t x, \partial_t y, \partial_t z)$ характеризующая диссипативность системы равна

$$\text{div} B = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = e - r + x = \begin{matrix} > 0 \\ < 0 \end{matrix} \quad (10)$$

Из (10) следует, что система Ресслера диссипативна только в ограниченной области. Система (9) имеет два стационарных решения – стационарных состояния (x_s, y_s, z_s)

$$\begin{aligned} \partial_t x &= 0 & y_s &= -z_s \\ \partial_t y &= 0 & x_s &= e \cdot z_s \\ \partial_t z &= 0 & z_{s\pm} &= \frac{r}{2e} \pm \sqrt{\left(\frac{r}{2e}\right)^2 - \frac{d}{e}} \end{aligned} \quad (11)$$

которые возможны при условии $r \geq 2e \cdot d$. Для параметров Ресслера $e = d = 0.2, r = 5.7$ стационарные решения имеют вид $st(1)=st(z_{-s}), st(2)=st(z_{+s})$

$$st(1) \quad x_s = 0.01 \quad z_s = -y_s = 0.05 \quad ; \quad st(2) \quad x_s = 5.69 \quad z_s = -y_s = 28.95 \quad (12)$$

Линеаризация уравнений (9) относительно решения $(\tilde{x}, \tilde{y}, \tilde{z})$, в качестве которого может быть выбрано любое решение в том числе и стационарное, дает систему уравнений для возмущений (2), где эволюционная матрица равна

$$\hat{E} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 \\ 1 & e & 0 \\ \tilde{z} & 0 & \tilde{x} - r \end{pmatrix} \quad (13)$$

Классическое спектральное уравнение системы (9) и его коэффициенты соответственно равны

$$\det[\delta_{\alpha,\beta} \lambda - E_{\alpha,\beta}] = \lambda^3 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3 = 0 ;$$

$$a_1 = -(e + x_s - r) \quad , \quad a_2 = [1 + x_s(e^{-1} + e) - re] \quad , \quad a_3 = -(2x_s - r) \quad (14)$$

Критерий НРИ [9] для СУ (14) дает два критических (нейтральных режима), критическая частота в которых и условие нейтральности имеют вид

$$\begin{aligned} 1) \quad \omega_{cr} &= 0 \quad , \quad 2x_s - r = 0 \\ 2) \quad \omega_{cr} &= \sqrt{1 + x_s(e^{-1} + e) - re} \quad , \quad e(x_s - r)(x_s - r + e) = 0 \end{aligned} \quad (15)$$

Анализ условий (15) совместно с условиями стационарности (11) показывают, что при $r = 2e = 0.4$ оба условия (15) совпадают а, корни СУ (14) равны

$$\lambda_1 = 0 \quad ; \quad \lambda_{2,3} = 0 \pm 1.7i \quad (16)$$

Первый критический режим реализуется только для второго стационарного состояния ($r \geq 2e = 0.4$), которое при $r > 0.4$ становится неустойчивым, а корни СУ, например при $\gamma = 0.5$ соответственно равны

$$\lambda_1 = -0.215 \quad ; \quad \lambda_{2,3} = 0.00546 \pm 1.19i \quad (17)$$

Второй критический режим реализуется для первого стационарного состояния, которое также неустойчиво при $r > 0.4$. И при $\gamma = 0.5$ корни СУ становятся равными

$$\lambda_1 = 0.101 \quad ; \quad \lambda_{2,3} = -0.0054 \pm 1.7i \quad .(18)$$

Такими образом оба стационарных состояния по-разному являются неустойчивыми.

Спектральное уравнение по методу РСЗ (7а) для задачи Ресслера с эволюционной матрицей (13) принимает вид $(x_+ \equiv x_s - r)$

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 - (\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot x_+ + \lambda_1 \cdot \lambda_3 \cdot e) + (\lambda_1 \cdot e \cdot x_+ + \lambda_2 \cdot z_s + \lambda_3) - (x_+ + e \cdot z_s) = 0 \quad .(19)$$

а) первый динамический режим ($\lambda_1 = Re \lambda = \lambda$, $\lambda_{2,3} = \alpha \pm i\omega$) из СУ (19) разделяя вещественную и мнимую части получаем

$$\begin{aligned} \lambda(\alpha^2 + \omega^2) - \lambda\alpha(x_+ + e) + \lambda \cdot e \cdot x_+ + \alpha(z_s + 1) - (x_+ + e \cdot z_s) &= 0 \\ \omega\{\lambda(e - x_+) + (z_s - 1)\} &= 0 \end{aligned} \quad .(20)$$

Из (20) находим

$$\begin{aligned} \lambda = \frac{z_s - 1}{x_+ - e} \quad ; \quad \alpha_{1,2} &= \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4\lambda \cdot G}}{2\lambda} \\ B = -\lambda(x_+ + e) + z_s + 1 \quad ; \quad G &= \lambda(\omega^2 + e \cdot x_+) - (x_+ + e \cdot z_s) \end{aligned} \quad (21)$$

спектральные параметры и верхнюю границу частоты в этом режиме

$$B^2 - 4\lambda \cdot G \geq 0 \quad \rightarrow \quad \omega_{\max}^2 \leq \frac{1}{\lambda} \left[\frac{B^2}{4\lambda} - \lambda \cdot e \cdot x_+ + (x_+ + e \cdot z_s) \right] \quad .(22)$$

Из (20,21) следует, что при $z_s = 1$ ($r=2e$) $\lambda = \alpha = 0$, это совпадает с условием нейтральности (15,2;16). Т.е. формулы, полученные по методу РСЗ включают в себя и результаты классического спектрального анализа.

Можно показать, что динамические режимы $\lambda_2 = Re \lambda_2 = \lambda$, $\lambda_3 = Re \lambda_3 = \lambda$ в данной задаче не

реализуются, стационарных состояний в них не существует.

В таблицах 1,2 приведены результаты расчета спектральных параметров и граничной частоты по формулам (21,22) в зависимости от параметров r/e для стационарных состояний $st(1)$, $st(2)$.

Таблица 1.

Зависимость спектральных характеристик модели Ресслера от параметров r,e для $st(1)$

r/e	λ	ω_{\max}^2	ω^2	α_1	α_2
1/0.2	0.681	0.447	0.44	-1.18	-1.35
-	-	-	0.3	-0.881	-1.65
3/0.2	0.297	0.781	0.5	-2.68	-3.75
-	-	-	0.3	-2.52	-3.51
5.7/0.2	0.164	1.312	1.30	-5.91	-5.93
-	-	-	1.0	-5.35	-6.46

Таблица 2.

Зависимость спектральных характеристик модели Ресслера от параметров r,e для $st(2)$

r/e	λ	ω_{\max}^2	ω^2	α_1	α_2
1/0.2	-15.7	0.0194	0.019	0.241	0.266
-	-	-	0.001	0.124	0.404
3/0.2	-65.3	0.0035	0.0034	0.214	0.217
-	-	-	0.001	0.165	0.265
5.7/0.2	-132	0.00161	0.001	0.182	0.232

Из таблиц следует, что оба стационарных состояния неустойчивы. В первом состоянии (Табл.1) неустойчивость связана с одной модой она заметно возрастает, две другие представляют собой затухающие колебания – это соответствует картине на фазовой плоскости (см. рис.1). Во втором состоянии (Табл.2) одна мода возмущений быстро затухает две другие представляют собой низкочастотные усиливающие

колебания. Хаотические колебания (хаос) присутствуют в обоих стационарных состояниях, причем в первом состоянии он диссипативен во втором активен (см.10,12). Из таблиц также видна зависимость скорости изменения колебаний от частоты.

5. Модельная задача Спротта
Уравнения модели Спротта равны

$$\begin{aligned} \partial_t x &= x \cdot y - z \\ \partial_t y &= x - y \\ \partial_t z &= x + a \cdot z \end{aligned} \quad (23)$$

где x, y, z – динамические переменные; a – параметр. Дивергенция вектора скоростей $\vec{B}(\partial_t x, \partial_t y, \partial_t z)$, характеризующая диссипативность системы равна

$$\text{div} B = \frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = y - 1 + a = \begin{matrix} > 0 \\ < 0 \end{matrix} \quad (24)$$

Из (24) следует, что в зависимости от параметра a система может быть активной так и диссипативной.

Система (23) имеет два стационарных решения – стационарных состояния (x_s, y_s, z_s)

$$\begin{aligned} \partial_t x &= 0 \\ \partial_t y &= 0 \\ \partial_t z &= 0 \end{aligned} \quad \rightarrow \quad st(1) = (0, 0, 0) \quad , \quad st(2) = \left(-\frac{1}{a}, -\frac{1}{a}, -\frac{1}{a} \right) \quad (25)$$

Эволюционная матрица для возмущений системы (23) имеет вид

$$\hat{E} = \begin{pmatrix} y & x & -1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & a \end{pmatrix} \quad (26)$$

Классическое спектральное уравнение системы (23) и его коэффициенты соответственно равны

$$\det[\delta_{\alpha,\beta} \lambda - E_{\alpha,\beta}] = \lambda^3 + a_1 \lambda^2 + a_2 \lambda + a_3 = 0 \quad ; (27)$$

$$a_1 = (1 - a - y) \quad , \quad a_2 = -x + (1 - y) \cdot (1 - a) \quad , \quad a_3 = 1 + a(y + x)$$

Для $st(1)$ СУ (27) и его корни соответственно равны

$$(\lambda + 1) \cdot (\lambda^2 - a \cdot \lambda + 1) \quad ; \quad \lambda_1 = -1 \quad , \quad \lambda_{2,3} = \frac{a}{2} \pm \sqrt{\frac{a^2}{4} - 1} \quad (28)$$

Из (28) следует, что при $a \in (0, 2)$ состояние $st(1)$ неустойчиво и испытывает слаборастущие хаотические колебания. При $a > 2$ состояние

неустойчиво, две моды аperiodически растут. При $a < 0$ состояние устойчиво.

Для $st(2)$ СУ (27) приобретает вид

$$\lambda^3 + \left(1 + \frac{1}{a} - a\right)\lambda^2 + \left(\frac{2}{a} - a\right)\lambda - 1 = 0 \quad .(29)$$

Критерий НРИ [9] для этого состояния дает

$$\left(1 - a + \frac{1}{a}\right)\left(\frac{2}{a} - a\right) + 1 = \frac{>0(Y)}{<0(HY)} ; \quad \omega_{cr}^2 = \frac{-1}{(1 - a + a^{-1})} \quad .(30)$$

Из (30) следует, что при $a > 1.7$ система неустойчива, в ней возникают нарастающие колебания частотой ω_{cr} . При $a < 0$ этот режим не реализуется.

Спектральное уравнение по методу РСЗ системы (23) равно (31)

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 + (\lambda_1 \cdot \lambda_3 - y \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_3 - a \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_2) + (-a \cdot \lambda_1 + a \cdot y \cdot \lambda_3 - \lambda_3(x + y) + \lambda_2) + [a \cdot (x + y) + 1] = 0$$

а) первый динамический режим (разделяя на вещественную и мнимую части $\lambda_1 = Re \lambda_1 = \lambda$, $\lambda_{2,3} = \alpha \pm i\omega$) из СУ (31) аналогично (20,21) для λ_1 , $\alpha_{2,3}$ получаем

$$\lambda = a \cdot (y - 1) + (x + y) + 1 ; \quad \alpha_{2,3} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4A \cdot G}}{2A} \quad .(32)$$

$$A = \lambda - y, \quad B = \lambda(1 - a) + ay + 1 - (x + y) ; \quad G = \omega^2 A + a \cdot (x + y) + 1$$

. Для $st(1)$ из (32) получаем

$$\lambda = 1 - a ; \quad \alpha_{2,3} = \frac{-(\lambda^2 + 1) \pm \sqrt{(\lambda^2 + 1)^2 - 4\lambda(\omega^2 \lambda + 1)}}{2\lambda} ; \quad \omega^2 \leq \left[\frac{(\lambda^2 + 1)^2}{4\lambda^2} - \frac{1}{\lambda} \right] \quad .(33)$$

Из (33) следует, что при $a < 1 \rightarrow \lambda > 0$, $\alpha_{2,3} < 0$ система неустойчива, присутствуют затухающие колебания. При $a > 1 \rightarrow \lambda < 0$, $\alpha_+ < 0$, $\alpha_- > 0$ в системе существуют слаборастущие хаотические колебания.

б) второй динамический режим $\lambda_2 = Re \lambda = \lambda$, $\lambda_{1,3} = \alpha \pm i\omega$ устойчив и представляет собой затухающие колебания; третий динамический режим не реализуется.

Для $st(2)$ (25) и первого динамического режима ($\lambda_1 = Re \lambda_1 = \lambda$, $\lambda_{2,3} = \alpha \pm i\omega$) из (32) получаем (34)

$$\lambda = -\left(a + \frac{2}{a}\right), \quad \alpha_{2,3} = \frac{a \pm \sqrt{a^2 - 4(a + a^{-1}) \cdot [\omega^2(a + a^{-1}) + 1]}}{-2(a + a^{-1})}, \quad \omega^2 \leq \left[\frac{a^2}{4(a + a^{-1})^2} - \frac{1}{(a + a^{-1})} \right]$$

Из (34) следует, что при $a > 0 \rightarrow \lambda < 0$, $\alpha_{2,3} < 0$ все возмущения затухают - состояние устойчиво. При

$a < 0$ значения λ , $\alpha_{2,3}$, ω в зависимости от параметра a приведены в таблице 3

Таблица 3.

Зависимость спектральных характеристик модели Спротта от параметра a для первого динамического режима в $st(2)$

a	λ	ω_{max}^2	ω^2	α_1	α_2
-1	3	0.583	0.2	-1.95	0.446
-2	3	0.56	0.5	-1.94	0.314
-3	3.67	0.503	0.5	-1.90	0.105
-5	5.4	0.423	0.2	-2.20	0.277
-7	7.29	0.39	0.2	-2.15	0.186

Из таблицы следует, что в этом состоянии система неустойчива и существуют разной интенсивности хаотические колебания.

Заключение

Таким образом, из выше рассмотренного следует, что

а) Предлагаемый метод РСЗ дает более сложную картину динамики в моделях Ресслера Спротта чем классический спектральный, в частности указывает дополнительные области неустойчивости и хаоса, что не показывает классический (например в модели Спротта неустойчивости при $a < 0$), а также включает в себя часть результатов классического анализа.

б) Хаос в задачах присутствует во всей области изменения параметров и в зависимости от последних в диссипативной или в активной форме.

в) Наличие интервалов возможных частот и параметров а также множественность динамических режимов указывает на существование в нелинейных задачах областей неустойчивости и хаоса, что есть в действительности (см. также [10])

г) В целом предлагаемый метод РСЗ изучении динамики нелинейных систем можно рассматривать как дополнительный к методам основанным на расчетах показателей Ляпунова и классическому спектральному.

Литература

1. Шильников Л.П., Теория бифуркаций и модель Лоренца, сб. Бифуркации рождения цикла, М.Мир,1980,386 с.
- 2.Андронов В.А., Витт В.А., Хайкин С.Б., Теория колебаний, М. Наука, 1981.
- 3.Гапонов-Грехов А.В., Рабинович М.И. Нелинейная физика, стохастичность и структура, сб. физика XX века, М.Наука,1984,с.(219-280).
- 4.Неймарк Ю.И., Ланда П.С., Стохастические и хаотические колебания, М.Наука, 1987,424 с.
5. Мун Ф.,Хаотические колебания, Мир,1990,312 с.
- 6.Анищенко В.С., Сложные колебания в простых системах, М.Наука, 1990, 312 с.
7. Анищенко В.С., Аттракторы динамических систем, Изв. Вузов, прикладная нелинейная динамика,1997,т.5№1,(109-127).
- 8.Кузнецов С.П. Динамический хаос, ФМ. М. Физматгиз,2006.355 с.
- 9.Перевозников Е.Н., Методы анализа устойчивости неравновесных систем, Изв. Вузов, Физика, 2006, №10, с (34-39).
- 10.Перевозников Е.Н.,Особенности спектра систем с хаотической динамикой,Сб.трудов LXXIII научной конференции «Герценовские чтения, Некоторые актуальные проблемы современной математики и математического образования»,Санкт-Петербург 7-10 апреля 2020. Изд РГПУ им.А.И.Герцена,(46-52)с.

Евразийский Союз Ученых. Серия: технические и физико-математические науки

Ежемесячный научный журнал
№ 10 (103)/2022 Том 1

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Макаровский Денис Анатольевич

AuthorID: 559173

Заведующий кафедрой организационного управления Института прикладного анализа поведения и психолого-социальных технологий, практикующий психолог, специалист в сфере управления образованием.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Штерензон Вера Анатольевна

AuthorID: 660374

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт новых материалов и технологий (Екатеринбург), кандидат технических наук

Синьковский Антон Владимирович

AuthorID: 806157

Московский государственный технологический университет "Станкин", кафедра информационной безопасности (Москва), кандидат технических наук

Штерензон Владимир Александрович

AuthorID: 762704

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, Институт фундаментального образования, Кафедра теоретической механики (Екатеринбург), кандидат технических наук

Зыков Сергей Арленович

AuthorID: 9574

Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, Отдел теоретической и математической физики, Лаборатория теории нелинейных явлений (Екатеринбург), кандидат физ-мат. наук

Дронсейко Виталий Витальевич

AuthorID: 1051220

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Кафедра "Организация и безопасность движения" (Москва), кандидат технических наук

Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. За достоверность сведений, изложенных в статьях, ответственность несут авторы. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке ссылка на журнал обязательна. Материалы публикуются в авторской редакции.

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций.

Художник: Валегин Арсений Петрович
Верстка: Курпатова Ирина Александровна

Адрес редакции:
198320, Санкт-Петербург, Город Красное Село, ул. Геологическая, д. 44, к. 1, литера А
E-mail: info@euroasia-science.ru ;
www.euroasia-science.ru

Учредитель и издатель ООО «Логика+»
Тираж 1000 экз.