



Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ"

Ежемесячный журнал

5 '2012

Содержание

Редакционный совет:

В. М. Кутузов
(председатель)
М. Ю. Шестопалов
(заместитель председателя)
В. А. Мейев
(ответственный секретарь)
В. Н. Мальшиев
("Радиоэлектроника
и телекоммуникации")
А. В. Соломонов
("Физика твердого тела
и электроника")
М. С. Курпьянов
("Информатика, управление
и компьютерные технологии")
В. В. Путов
("Автоматизация
и управление")
Г. И. Прокофьев
("Электротехника")
Ю. В. Филатов
("Приборостроение
и информационные
технологии")
В. В. Шаповалов
("Биотехнические системы
в медицине и экологии")
С. А. Степанов
("Управление качеством,
инновационный
и антикризисный менеджмент")
О. Ю. Маркова
("Гуманитарные науки")
О. Г. Вендик
("История науки,
образования и техники")
Н. В. Лысенко
("Современные технологии
в образовании")

* * *

197376, Санкт-Петербург,
ул. Проф. Попова, 5
СПбГЭТУ "ЛЭТИ"
Тел.: (812) 234-02-23

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Малахов К. А. Управление выходной скоростью кодирования для систем хранения и монтажа студийных видеоданных 3
Богданович А. А., Красичков А. С., Маругин А. С., Орлов В. К. Методы контроля местоположения персонала при работе в экстремальных условиях 9

ФИЗИКА ТВЕРДОГО ТЕЛА И ЭЛЕКТРОНИКА

Гареев К. Г., Грачева И. Е., Мошников В. А., Кайралиева Т. Г., Ермолаев В. Н., Айдарова С. Б. Фазообразование и процессы, протекающие в системе $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 16
Калинин Б. В., Ламкин И. А., Менькович Е. А., Тарасов С. А. Высокоэффективные приборы на основе барьера Шотки металл-AlGaN 24

ИНФОРМАТИКА, УПРАВЛЕНИЕ И КОМПЬЮТЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Советов Б. Я., Яшин А. И. Однородный математический метод процессов планирования и управления 31
Имаев Д. Х., Шестопалов М. Ю. Топологические и матричные условия локализации неисправностей систем управления 36
Имаев Д. Х., Шестопалов М. Ю. Методы теории чувствительности в технической диагностике процессов управления 44
Хо Нгок Зуй, Молдовян Н. А. Разработка и исследование управляемых подстановочно-перестановочных сетей для синтеза блочных алгоритмов шифрования на основе элементов $F_{4/1}$ 53
Щеголева Н. Л., Кухарев Г. А. Обработка и распознавание изображений лиц с проблемами освещения 59
Мурсаев А. Х. Моделирование дискретных устройств с нарастающей неопределенностью 67

АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ

Кузнецов В. Е., Поляхов Н. Д., Филатов Д. М., Чжан Я. Исследование и улучшение динамических характеристик электрогидростатических рулевых систем с помощью адаптивных регуляторов с эталонной моделью 74
Путов В. В., Шелудько В. Н., Герман-Галкин С. Г., Чьен Н. К. Сравнительное исследование прямой и непрямой адаптивных систем управления асинхронным электроприводом с нелинейными упругими свойствами 82

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Абрахим А. А. Робастное управление сложными динамическими объектами 87
Дзлив С. В., Пицалев К. Е., Жнакин Д. М., Перевалов Ю. Ю. Высокочастотный индукционный нагрев крупногабаритных деталей 92

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Осетров А. В., Нгуен Ван Шо. Особенности задания граничных условий в задаче распространения поверхностных акустических волн при наличии электродов 99

Известия СПбГЭТУ "ЛЭТИ" 5 '2012

Ежемесячный журнал

Авдеев Б. Я. Потенциальные свойства одного класса адаптивной коммутации в информационно-измерительных системах (анализ, предельные оценки) 106

БИОТЕХНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ В МЕДИЦИНЕ И ЭКОЛОГИИ

Соколова А. А. О распределении отношения соседних RR-интервалов в норме и при возникновении аритмии 112

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ОБРАЗОВАНИИ

Новикова Е. С. Проектирование новой дисциплины «Компьютерная вирусология и методы нарушения безопасности» как обновление раздела базового курса 119

УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ, ИННОВАЦИОННЫЙ И АНТИКРИЗИСНЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ

Вишнякова Е. А. Процесс «Прием студентов» в системе менеджмента качества вуза и показатели оценки качества реализации процесса 126

ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

Степанова Н. В. Когнитивно-дискурсивный анализ экономической прессы в период кризиса (на материале англоязычной периодики 2008–2009 гг.) 134

ИСТОРИЯ НАУКИ, ОБРАЗОВАНИЯ И ТЕХНИКИ

Попечителей Е. П., Шаповалов В. В. 50-летие биотехнического образования 141

Сведения об авторах 153

Правила представления рукописей авторами 157

ПОДПИСНОЙ ИНДЕКС 45821 ПО ОБЪЕДИНЕННОМУ КАТАЛОГУ "ПРЕССА РОССИИ". ТОМ 1 "ГАЗЕТЫ И ЖУРНАЛЫ"

Подписка производится в любом почтовом отделении России

Журнал входит в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук (решение Президиума Высшей аттестационной комиссии Минобрнауки России от 19 февраля 2010 года № 6/6)

Учредитель:

Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)»
197376, Санкт-Петербург,
ул. Проф. Попова, 5
Тел.: (812) 346-44-87
Факс: (812) 346-27-58

Свидетельство о регистрации

ПИН № ФС2-8390
от 04.12.2006 г. выдано
Управлением Федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу

* * *

Редакторы:

Э. К. Долгатов, Н. В. Лукина,
Т. А. Лунаева, И. Г. Скачек

Комп. верстка:

Е. Н. Паздниковой, А. И. Рыбца,
М. В. Егоровой, А. А. Веселова

Подписано в печать 17.05.12.

Формат 60 × 84 1/8.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Гарнитура "Times New Roman".

Печ. л. 20,0.

Тираж 300 экз. (1-й завод 1–120 экз.)

Заказ 51.

Издательство СПбГЭТУ "ЛЭТИ"

197376, Санкт-Петербург,

ул. Проф. Попова, 5

Тел.: (812) 346-45-23

Факс: (812) 346-28-56



УДК 621.397.13.037.372

К. А. Малахов

УПРАВЛЕНИЕ ВЫХОДНОЙ СКОРОСТЬЮ КОДИРОВАНИЯ ДЛЯ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ И МОНТАЖА СТУДИЙНЫХ ВИДЕОДАНЫХ

Рассмотрен вопрос создания алгоритма управления выходной скоростью для кодеров систем хранения и монтажа студийных видеоданных. Предложен алгоритм управления выходной скоростью кодера AVC-Intra всех классов.

Управление выходной скоростью, AVC-Intra, сжатие с потерями

При работе с цифровыми видеоданными повсеместно используются алгоритмы сжатия с потерями. Значительное распространение получили стандартные алгоритмы сжатия, использование которых позволяет решить проблему совместимости оборудования и программного обеспечения от различных производителей.

Одной из важнейших областей применения алгоритмов сжатия являются устройства захвата, монтажа и хранения студийных видеоданных. Требования, которые предъявляются к алгоритмам сжатия в данной области, отличаются от аналогичных требований для вещательных систем. Существует несколько стандартизованных решений для подобных устройств. В настоящее время все большее применение находит формат сжатия AVC-Intra.

При реализации стандартных кодеров сжатия с потерями одной из основных задач, решаемой разработчиками, является создание алгоритма управления выходной битовой скоростью, который не регламентируется стандартом сжатия. Данный алгоритм позволяет согласовать выходную скорость кодера с пропускной способностью канала связи путем регулирования параметра квантования кодера [1].

При рассмотрении формата AVC-Intra следует отметить достаточно жесткие требования, накладываемые на стабильность выходной скорости, – размер каждого кадра сжатого потока должен быть равен заранее заданной величине¹. Вследствие вышеизложенного для реализации кодера AVC-Intra необходимо создание собственного алгоритма управления выходной скоростью.

¹ SMPTE RP 2027–2007: AVC Intra-Frame Coding Specification for SSM Card Applications. <http://www.smpite.org/standards>.

В данной статье предлагается относительно простой в реализации алгоритм управления выходной скоростью с равномерным квантованием внутри кадра для формата сжатия AVC-Intra. Данный алгоритм основан на линейной модели зависимости выходной скорости от числа ненулевых отсчетов ДКП после квантования.

Также будет рассмотрен вопрос о работе алгоритма на высоких выходных битовых скоростях, на которых линейная модель оценки выходной битовой скорости начинает давать высокую погрешность. Предложены методы улучшения линейной модели для компенсации этой погрешности.

Студийное видео. AVC-Intra. К алгоритмам сжатия, которые применяются при производстве и хранении студийных видеоданных, предъявляются несколько другие требования, чем к аналогичным алгоритмам в вещательном телевидении.

Во-первых, поскольку студийные видеоданные являются источником для дальнейшего распространения по каналам связи и другим различным носителям, требования, которые предъявляются к качеству декодированных видеоданных, значительно выше, чем для вещательных приложений. Во-вторых, формат хранения студийных видеоданных должен давать возможность редактирования и монтажа.

На сегодняшний день существует несколько стандартных решений для сжатия студийных видеоданных. Одним из наиболее заметных решений является формат AVC-Intra от компании «Panasonic». К достоинствам данного решения можно отнести, во-первых, соответствие закодированного потока вышеописанным требованиям и, во-вторых, совместимость с одним из наиболее распространенных в настоящее время стандартом AVC H.264. В данном контексте совместимость означает возможность использования стандартного декодера H.264 при декодировании потока AVC-Intra. Формат AVC-Intra описывается рекомендацией SMPTE RP 2027–2007 применительно к стандарту H.264 AVC¹. Выходной поток кодера AVC-Intra является H.264 закодированным потоком со следующими ограничениями, накладываемыми спецификацией SMPTE RP 2027–2007:

1. В потоке могут присутствовать только Intra-кадры.
2. Каждый кадр закодированного потока должен иметь фиксированный заранее заданный размер.
3. Параметры кодирования должны соответствовать одному из разрешенных спецификацией классов: класс 50 (выходная битовая скорость 50 Мбит/с), класс 100 (выходная битовая скорость 100 Мбит/с), класс Ultra (до 200 Мбит/с).

Основным недостатком AVC-Intra является относительная сложность реализации кодера, которая обусловлена двумя основными факторами. Во-первых, работа на высоких битовых скоростях требует высокого быстродействия от аппаратного обеспечения кодера. Во-вторых, поскольку от кодера требуется формировать закодированные кадры одинакового размера, резко усложняется алгоритм управления битовой скоростью.

Управление битовой скоростью. Выходная скорость стандартного кодера сжатия при фиксированном параметре квантования в значительной степени зависит от исходного несжатого видеоматериала. При одном и том же параметре квантования выходная скорость кодера может отличаться в несколько раз в зависимости от входных данных [2].

¹ SMPTE RP 2027–2007: AVC Intra-Frame Coding Specification for SSM Card Applications. <http://www.smppte.org/standards>.

Для получения на выходе кодера потока, который соответствует пропускной способности канала передачи данных, применяют алгоритмы управления битовой скоростью. Требуемая выходная скорость достигается путем регулирования параметра квантования.

В зависимости от области применения может использоваться сжатие как с постоянной выходной скоростью (cbr – constant bit rate), так и с переменной (vbr – variable bit rate) [3]. Для сжатия с постоянной скоростью в зависимости от назначения алгоритма может варьироваться размер буфера для кодера и декодера.

При создании алгоритма управления скоростью размер выходного буфера является одним из основных параметров. Для приложений с малым объемом буфера требуется точное поддержание размера закодированных видеоданных в единицу времени. Для приложений, где используется большой объем выходного буфера, текущее отклонение объема закодированных данных от заданного значения может быть скомпенсировано далее по ходу кодирования и сглажено выходным буфером.

Для увеличения точности работы алгоритма контроля выходной скорости кодера используется многопроходное кодирование (multi-pass encoding). Большое распространение получила двухпроходная схема кодирования: первый проход – этап предварительного анализа и установление необходимых параметров кодирования; второй проход – кодирование с ранее установленными параметрами.

Современный стандарт кодирования H.264 позволяет задавать значения параметра квантования для каждого макроблока (участка изображения размером 16×16 пикселей). Однако не всегда назначение различных значений для каждого макроблока является целесообразным. Для некоторых приложений может быть использован алгоритм управления выходной скоростью с назначением одного одинакового параметра квантования на весь кадр. Данный подход имеет два основных преимущества: во-первых, упрощается весь алгоритм кодирования, во-вторых, при одинаковых значениях параметра квантования для соседних макроблоков не нужно передавать разницу этих значений, а сэкономленные за счет этого биты могут быть использованы для менее грубого квантования входных данных. Главным недостатком подобного подхода является то, что, поскольку параметр квантования в стандарте H.264 может принимать одно из 52 дискретных значений [1], выходной размер кадра может отличаться от заданного величиной данной ошибки дискретности.

Функциональная схема кодера с контролем выходной скорости, который работает по указанному алгоритму, представлен на рис. 1.

Как отмечалось ранее, для кодера AVC-Intra размер каждого кадра выходного потока должен принимать заранее заданное значение (далее T), т. е. размер буфера равен одному кадру. Таким образом, на этапе предварительного

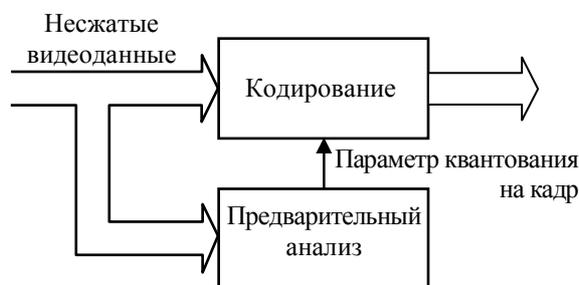


Рис. 1

анализа для конкретного кадра должен быть выбран такой параметр квантования, при котором размер закодированного кадра был максимально близок к значению T, но при этом не превосходил его. Разница заполняется незначительными битами, определенными стандартом H.264.

Далее будет описан механизм выбора значения параметра квантования на кадр, а также будут рассмотрены возможности адаптации алгоритма для различных целей.

Управление битовой скоростью на основе линейной модели. При управлении выходной скоростью кодера AVC-Intra путем назначения постоянного параметра квантования (qp) на кадр возникает необходимость в получении априорной информации о выходном размере кадра при различных значениях qp .

В многопроходных алгоритмах получение априорной информации происходит до начала кодирования. По поступающим несжатым данным на этапе предварительной обработки необходимо произвести оценку размера закодированного кадра для различных значений qp .

При оценке размера закодированного кадра могут быть использованы различные модели предсказания – функциональные зависимости, связывающие предсказанную оценку с параметром квантования:

$$R = F(qp, s_1, s_2, \dots),$$

где R – оценка размера закодированного кадра; F – функция оценки; qp – параметр квантования; s_1, s_2, \dots – собранная статистика.

Оценка выходной скорости кодера может быть рассчитана по формуле

$$B_{\text{set}} = R \cdot n_{fr},$$

где n_{fr} – число кадров в секунду.

Одной из наиболее простых в отношении необходимой вычислительной сложности алгоритма и в то же время достаточно точных моделей предсказания является линейная модель зависимости размера закодированных видеоданных от числа ненулевых отсчетов исходного изображения после применения ДКП и квантования. Данная модель была предложена в работе [2].

Подробно рассмотрим данный вид предсказания на примере процесса кодирования одного блока изображения кодером блочного кодирования на основе ДКП. После предсказания блок исходного изображения (для стандарта H.264 это может быть блок размером 16×16 , 8×8 или 4×4) подвергается ДКП, а далее полученный результат квантуется и подвергается энтропийному кодированию (кодами переменной длины либо арифметическому кодированию). При помощи линейной модели оценка происходит с использованием следующей формулы:

$$R(p) = \theta(1 - p) = \theta n_{nz}, \quad (1)$$

где p – процент обнулившихся после квантования отсчетов ДКП; θ – коэффициент линейной модели; n_{nz} – процент необнулившихся после квантования отсчетов ДКП.

Поскольку процент обнулившихся отсчетов для данного исходного несжатого материала определяется значением параметра квантования, то, следовательно, скорость выходного потока кодера также является функцией параметра квантования:

$$R(qp) = \theta n_{nz}(qp).$$

Алгоритм управления выходной скоростью для кодера AVC-Intra с фиксированным параметром квантования внутри кадра должен задавать значение qp на кадр таким образом, чтобы размер закодированного кадра был максимально близок целевому размеру, но при этом меньше его.

Для определения требуемого значения qp предлагается использовать следующий алгоритм. По кадру, который предстоит закодировать, предварительно вычисляется статистика. Статистика собирается следующим образом. Для каждого макроблока по формуле (1) вычисляется оценка ожидаемого размера для всех значений параметра квантования. Таким образом, для каждого макроблока можно построить гистограмму из 52 столбцов (число значений параметра квантования). Суммируя столбцы по всем макроблокам, можно получить подобную гистограмму на весь кадр. Искомое значение параметра квантования вычисляется по номеру того столбца гистограммы, оценка размера которого наиболее близка к целевой точке, но не превосходит ее.

Для оценки эффективности работы предложенного алгоритма было проведено следующее исследование. На вход кодера AVC-Intra с предложенным алгоритмом управления выходной скоростью подавался тестовый кадр, который сжимался с различной выходной скоростью. На рис. 2 представлен график зависимости выходной скорости кодера V_{out} по оси ординат от установленного битрейта B_{set} (который передавался кодеру в качестве настроек). Штриховой линией показана зависимость $y = x$ – кривая работы идеального алгоритма. В данном случае рассматривается алгоритм управления выходной скоростью на основе линейной модели.

Из графика на рис. 2 следует, что предложенный алгоритм эффективно справляется со своими задачами при выходной скорости кодера до 70 Мбит/с и может быть использован для кодера AVC-Intra, работающего с исходными данными и настройками класса 50. Однако использование данного алгоритма для высоких битовых скоростей (для класса 100 AVC-Intra выходная скорость 100 Мбит/с) приводит к значительному недобору битрейта и, следовательно, к потерям в качестве декодированных видеоданных.

Улучшение линейной оценки. Как показали описанные исследования, алгоритм управления выходной скоростью кодера, который основан на линейной модели, работает с достаточной точностью с выходными битовыми скоростями до 70 Мбит/с, т. е. для кодера AVC-Intra данный алгоритм подходит для класса 50. С увеличением выходной скорости кодера наблюдается рост ошибки предсказания.

Для улучшения оценки предлагается в соотношении (1) использовать не линейную, а кусочно-линейную зависимость. Для кусочно-линейной зависимости формула (1) принимает вид

$$R = \begin{cases} \theta_1 n_{nz}, & n_{nz} \leq n_0; \\ \theta_2 n_{nz}, & n_{nz} > n_0, \end{cases}$$

где θ_1, θ_2 – коэффициенты; n_0 – точка перегиба кусочно-линейной модели.

Коэффициент θ_1 принимается равным коэффициенту θ линейной модели (1). Значение θ_2 рассчитывается по статистике кодирования множества тестовых клипов методом оценки по методу наименьших квадратов.

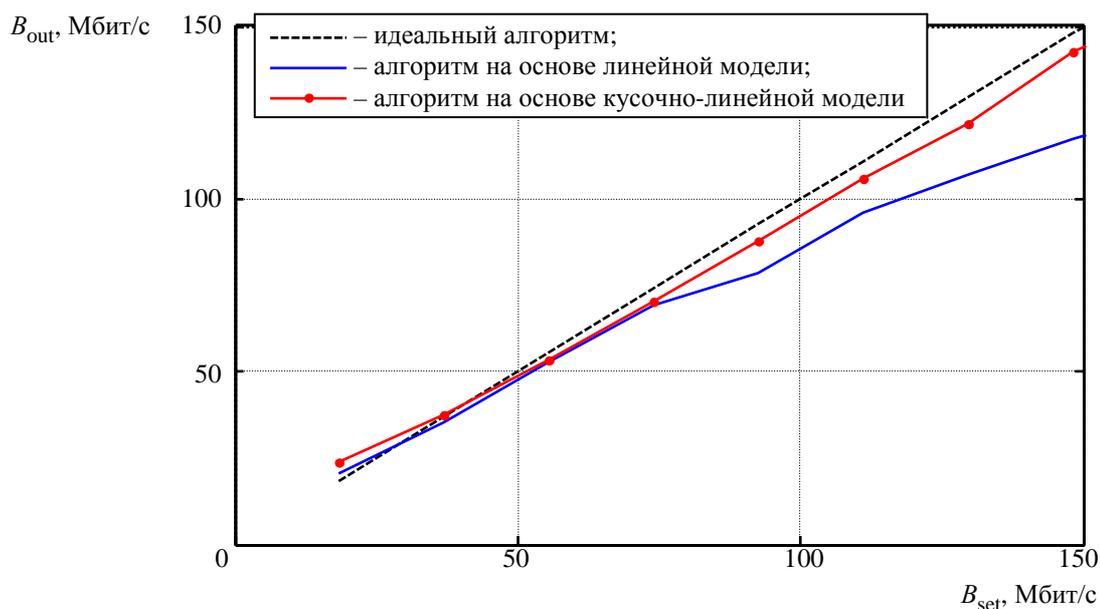


Рис. 2

На рис. 2 изображен график работы алгоритма управления выходной скоростью для линейной и кусочно-линейной оценок.

Как следует из графика, использование кусочно-линейной модели оценки позволяет достичь высокой точности работы алгоритма управления битовой скоростью в широчайшем диапазоне выходных битовых скоростей. Алгоритм на основе данной модели оценки может быть эффективно применен при реализации кодера формата сжатия AVC-Intra во всех классах его использования.

В данной статье был подробно рассмотрен вопрос о построении алгоритма управления выходной скоростью кодера формата сжатия AVC-Intra. Главной сложностью при построении подобного алгоритма является необходимость удержания выходной скорости на заданном значении в пределах одного кадра.

Был предложен относительно простой алгоритм на основе линейной модели оценки выходной скорости кодера. Были проведены исследования работы алгоритма для различных выходных скоростей. Предложенный алгоритм оказался эффективным для работы с форматом AVC-Intra класса 50. Однако для более высоких выходных скоростей (более 50 Мбит/с) оценка на основе линейной модели предсказания начинает в значительной степени терять свою точность, что приводит к неудовлетворительным результатам работы. Поэтому данный алгоритм не подходит для работы кодера AVC-Intra для класса 100 (100 Мбит/с).

Для увеличения точности оценки выходной скорости кодера на высоких битрейтах было предложено использовать кусочно-линейную модель оценки. Алгоритм управления выходной скоростью кодера на основе предложенной кусочно-линейной модели предсказания демонстрирует высокую точность работы в широчайшем диапазоне. Данный алгоритм может быть эффективно применен при реализации кодера формата сжатия AVC-Intra во всех классах его использования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ричардсон Я. Видеокодирование. H.264 и MPEG-4 – стандарты нового поколения. М.: Техносфера, 2005.
2. Zhihae He, Mitra S. K. A Linear Source Model and a Unified Rate Control Algorithm for DCT Video Coding // IEEE Trans. Circuits Syst. Video Technol. Nov. 2002. Vol. 12, № 11. P. 970 – 982.
3. Ortega A., Khansari M. Rate Control For Video Coding Over Variable Bit Rate Channels With Application To Wireless Transmission // ICIP'95. Washington, DC, Oct. 1995.

K. A. Malakhov

RATE CONTROL FOR VIDEO STORAGE AND EDITING SYSTEMS

This article is devoted rate control algorithm development for video storage and editing systems. It was proposed solution for AVC-Intra encoder working in all classes of usage.

Rate control, AVC-Intra, lossy compression

УДК 621.396.96

*А. А. Богданович, А. С. Красичков,
А. С. Маругин, В. К. Орлов*

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ МЕСТОПОЛОЖЕНИЯ ПЕРСОНАЛА ПРИ РАБОТЕ В ЭКСТРЕМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

Целью настоящего обзора является обобщение сведений о существующих методах контроля и исследование характеристик качества методов контроля местоположения и физиологического состояния, а также обеспечения координации действий персонала при работе в условиях повышенного риска пребывания, в пределах ограниченного пространства, в отсутствие визуального контакта и визуальных ориентиров для определения местоположения. Осуществлен сравнительный анализ систем и методов контроля местоположения физиологического состояния персонала при работе в экстремальных условиях.

Определение местоположения, ограниченное пространство, физиологическое состояние персонала, псевдолит

В настоящее время глобальные спутниковые навигационные системы (ГНСС) ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США) служат надежными источниками навигационной информации. Основными достоинствами данных систем являются точность местоопределения, дешевизна аппаратуры потребителей, легкость в обращении и нечувствительность к погодным условиям. Однако полноценная работа ГНСС невозможна, если потребитель находится в сложной окружающей обстановке, например, в условиях плотной городской застройки, внутри зданий или в подземных выработках естественного или искусственного происхождения (туннели, горные шахты и т. п.).

Данные обстоятельства либо предопределяют невозможность использования ГНСС, либо предполагают необходимость создания специальных дополнений глобальных навигационных систем, что предлагается во многих патентных решениях. Одним из возможных вариантов подобного дополнения могут служить расположенные на поверхности земли псевдолиты, излучающие сигналы, аналогичные используемым в ГНСС. Данный вариант предполагает вполне естественную унификацию обработки спутниковых сигналов ГНСС и сигналов псевдолитов. Преимущества от использования псевдолитов заключаются в следующем [1]:

- псевдолиты могут быть расположены в произвольном месте на поверхности земли;
- низкая стоимость допускает использование нескольких псевдолитов в общей структуре системы;

- мощность сигнала может варьироваться.

Используя перечисленные достоинства, можно значительно повысить точность навигационного обеспечения потребителей, находящихся в сложной окружающей обстановке. Однако, несмотря на указанные преимущества, имеется и ряд недостатков [1]:

- геометрия окружающей местности может наложить определенные ограничения на расположение псевдолитов;

- в зависимости от природы окружающей обстановки существуют ограничения на частоту излучения сигналов;

- число используемых псевдолитов непосредственно влияет на стоимость всей системы;
- потенциальная близость между приемником и псевдолитом может потребовать использования приемников со значительным динамическим диапазоном.

Наиболее характерным примером использования псевдолитов в качестве дополнения ГНСС или полностью автономной системы служат системы позиционирования в закрытых помещениях. Данные системы предназначаются для решения задач транспортной логистики, позиционирования и отслеживания спасателей внутри зданий в чрезвычайных условиях и др. В зависимости от решаемых задач к системам позиционирования в закрытых помещениях предъявляются различные требования. В качестве примера рассмотрим систему, ориентированную на обслуживание пожарного персонала, действующего в горящем здании.

В данном сценарии может отсутствовать план здания, ограничена из-за задымленности видимость, а местоположение людей и оборудования может изменяться. В дополнение к этому ограниченные запасы воздуха у пожарных и потенциально заблокированные пути эвакуации переводят ситуацию в чрезвычайно опасную. В подобных условиях система позиционирования с точки зрения безопасности пожарных должна обладать следующими характеристиками [2]:

- компактность: любое снаряжение, носимое пожарным, должно быть достаточно малогабаритным, чтобы не служить помехой в реализации основной деятельности. Более того, оно должно быть достаточно надежным в экстремальных условиях;

- гибкость: система должна быть функциональной в ситуациях, когда отсутствует план здания;

- связь: информация о местоположении, состоянии здоровья и о сложившейся ситуации может передаваться как к пожарному, так и от него;

- точность системы должна быть такова, чтобы индивидуальный пользователь мог быть локализован в условиях нулевой видимости;

- надежность: система должна быть достаточно надежной, чтобы пожарные были готовы доверить ей свою безопасность;

- простота: система должна быть проста в использовании в сложных условиях.

Перечисленные характеристики образуют минимальное число требований к системе, предназначенной для функционирования в экстремальных условиях горящего здания. В подобных условиях накладываются жесткие ограничения на время нахождения пожарного

внутри здания, обусловленные запасами воздуха и возрастающей интенсивностью огня и задымленности. Дополнительные требования к системе обусловлены возможным полным или частичным разрушением здания, что может привести к блокированию путей эвакуации.

С точки зрения безопасности пожарных носимое снаряжение, пригодное в подобных условиях, должно в дополнение к изложенному [2]:

- гарантировать находящемуся вне здания командному посту возможность при любых обстоятельствах устанавливать текущее местоположение (в трех координатах) спасателей;
- обеспечивать командный пост информацией о статусе (самочувствии и движении) каждого члена спасательной команды и о состоянии путей эвакуации;
- обеспечивать любому члену команды спасателей в критической ситуации руководство выходом посредством синтезированных голосовых команд;
- обеспечивать спасателей специальными сигналами для направления в место нахождения пожарного в беде.

Однако радионепрозрачность оболочек замкнутых помещений может привести к полной невозможности использования псевдолитов или необходимости размещения их непосредственно внутри замкнутого пространства, что собственно означает факт необходимости создания независимо существующей навигационной системы.

Для решения задачи контроля местоположения персонала внутри замкнутых помещений в настоящее время существует большое количество систем, основанных на различных принципах [3]. В качестве примера рассмотрим системы, используемые для контроля местоположения пожарных при их тренировке в учебной дымокамере, где имитируются условия, характерные для реального сложного пожара.

Различные системы, реагирующие на нахождение объекта в контрольных точках. Известна система с концевыми выключателями, установленными на дверях перегородок и на стационарных имитаторах мест работы [4]. Этот вариант принципиально не позволяет определить местонахождение и число пожарных по помещениям, а лишь помогает контролировать выполнение отдельных видов работ.

Тензометрическая система. Пол дымокамеры разбит на квадраты со стороной 0.75...1.0 м, под каждым из которых размещены датчики давления (тензометры). Информация о нагрузке на датчик по проводам поступает на концентратор и отображается на дисплее. Информационным параметром является масса человека. К достоинствам рассматриваемой системы следует отнести:

- возможность определения параметров движения по нагрузке на датчики;
 - отсутствие каких-либо носимых или размещаемых на боевой одежде устройств.
- Недостатки заключены в следующем:
- невозможность идентификации пожарных;
 - необходимость специального исполнения конструкции пола;
 - невозможность слежения на лестничных пролетах, около некоторых видов тренажеров со сложной конструкцией пола;
 - сложность кабельной сети, обслуживающей большое количество датчиков.

Индукционно-координатная система [5]. Принцип действия – пеленгация малогабаритных низкочастотных генераторов, размещаемых на боевой одежде пожарных, набором приемных индукционных петель, вмонтированных в бетонный пол. Сигналы от петель поступают на концентратор. Система обеспечивает двухкоординатное определение местоположения конкретного пожарного.

Достоинства системы:

- малогабаритный носимый ответчик;
- возможность идентификации тренирующихся.

К недостаткам системы следует отнести:

- высокую стоимость из-за больших затрат цветных металлов и сложности монтажа;
- сложность оборудования лестничных пролётов, а также сложность и высокую трудоемкость ремонта из-за необходимости вскрытия бетонного пола на большой площади.

Телевизионные системы. Контроль за местонахождением пожарных может быть осуществлён с помощью систем видео- и инфракрасного теленаблюдения, получивших в последнее время широкое распространение в охранной деятельности.

Достоинство таких систем – возможность наблюдения не только за местоположением пожарных, но и за их действиями.

Недостатки:

- недостаточная эффективность в условиях затемненных и задымленных помещений;
- большое количество мониторов (или окон на едином мониторе) для отображения обстановки в нескольких помещениях, что значительно рассеивает внимание оператора;
- наличие в помещении непросматриваемых зон;
- сложность идентификации участников тренировки.

Кроме того, существует ряд систем для других приложений. Несмотря на то, что они используют различные физические принципы (оптические, акустические, индукционные, микроволновые), большинство из них основаны на фиксации прохода контрольных точек и имеют недостатки, присущие системам, реагирующим на нахождение объекта в реперных точках.

Известны попытки создания специализированных систем, отвечающих всем перечисленным требованиям. Так, в [6] рассматривается система, основанная на принципах активного радиодальномера в диапазоне 2.4...5.8 ГГц. Однако в широкой печати нет сведений о практическом применении этой системы, что, по-видимому, объясняется её сложностью и дороговизной.

Одним из наиболее совершенных комплексов контроля местоположения персонала внутри замкнутых помещений является система, описанная в [3], [7]. Для определения местоположения абонентов в ней используются ультразвуковые колебания, излучаемые передатчиками, размещенными у каждого из абонентов системы. Синхронный вариант работы системы реализуется путём передачи синхросигнала с помощью электромагнитных волн. Ввиду несравнимости времени распространения электромагнитного и акустического сигналов время приёма абонентами синхросигнала можно считать равным времени его передачи.

Аппаратура контролируемого объекта представляет собой ответчик, а аппаратура измерителя дальности – акустический приёмник, соединённый проводной линией с концентратором, содержащим генератор опорного времени и передатчик запроса. Концентратор подсоединён к компьютеру, осуществляющему обработку данных и отображение информации.

Ответчик содержит приемную магнитную антенну, приемник синхросигнала, формирователь ответного интервала и передатчик ответного сигнала с излучателем. Каждый ответчик имеет индивидуальный номер.

Существенную роль в работе системы играет программное обеспечение компьютера. В его задачу входит приём данных от акустических приёмников через концентратор, обработка этих данных с целью определения координат каждого объекта и на основании полученных координат отображение обстановки внутри здания.

В соответствии с принципом временного разделения приём данных осуществляется последовательно для каждого объекта. На этом этапе формируется массив дальностей от приёмников до объектов. На втором этапе производится пересчёт полученных дальностей в координаты объектов, привязанные к единой координатной сетке здания, и вторичная обработка данных для повышения помехоустойчивости системы.

Обработанные данные поступают в блок отображения информации, на экране которого изображается план помещения и положение контролируемых объектов, снабженных отметками об идентификационных номерах соответствующих ответчиков. Кроме основных задач программное обеспечение должно выполнять ряд сервисных функций, таких как ведение протокола пребывания объектов в зоне действия системы, выдача сигналов в ситуациях, требующих вмешательства оператора (руководителя работы), и т. п.

К числу наиболее существенных недостатков описанной системы контроля местоположения персонала следует отнести:

- достаточно низкие темпы обновления информации, определяемые временным методом уплотнения-разделения сигналов абонентов;
- отсутствие канала связи, предназначенного для передачи информации о физиологическом состоянии абонентов системы.

Проведенный анализ научно-технической литературы, патентов и других материалов свидетельствует о том, что система контроля местоположения и физиологического состояния, а также обеспечения координации действий персонала при работе в условиях повышенного риска пребывания должна строиться как автономный информационно-навигационный комплекс, функционирующий на основе непрерывного навигационного поля. Использование методов, реагирующих на нахождение объекта в контрольных точках (в частности, тензометрические, индукционные системы) оказываются непригодными ввиду сложности технической реализации и невозможности осуществления идентификации абонентов и передачи информации об их состоянии.

Построение большинства существующих навигационных систем основано на использовании радиосигналов для дальномерных и угломерных измерений. Однако использование радиосигналов для данной системы сопряжено с рядом технических трудностей. Высокая требуемая точность измерения местоположения абонента системы постулирует необходимость определения запаздывания с погрешностями порядка единиц наносекунд. В случае реализации угломерного способа определения координат требуется создание антенной системы, позволяющей измерять угловое положение объекта с точностью выше 0.5° . Кроме того, многолучевое распространение радиосигналов в здании, содержащем массу металлических предметов, таких как водопроводные и вентиляционные трубы, арматура железобетонных блоков и т. д., создаёт дополнительные проблемы при обработке сигналов.

Развитие современной элементной базы, а также достижения в области теории обработки сигналов позволяют построить оборудование на основе радиосигналов, отвечающее указанным требованиям. Однако достаточно высокая сложность и, соответственно, высокая стоимость означают необходимость рассмотрения иных физических способов создания навигационного поля.

Альтернативой радиосигналам являются акустические сигналы на основе ультразвуковых колебаний. При переходе к навигационным измерениям задержек ультразвукового носителя при тех же точностях определения координат в дальномерной системе временное положение акустического сигнала должно измеряться с точностью до единиц миллисекунд, что может быть сделано без существенных затруднений. Однако, как и ранее, реализация угломерной ультразвуковой системы наталкивается на трудности, связанные с созданием узконаправленных сканирующих диаграмм направленности ультразвуковых преобразователей. Дальномерная система не предъявляет особых требований к форме диаграмм направленности преобразователей и поэтому более проста в реализации. В этой связи представляется целесообразным использование дальномерного способа определения координат объекта.

Отличием ультразвукового поля от электромагнитного является ограниченность области его распространения пределами помещения. При наличии нескольких изолированных объемов, в которых должно осуществляться сопровождение абонентов системы, необходимым окажется установка своего набора навигационного оборудования в каждом из них, с последующей отдельной обработкой и выводом информации на единый командный пункт.

Недостатком акустического поля в замкнутом объёме является наличие большого количества переотражений и шумовых помех. В связи с этим, а также учитывая малую и непредсказуемую отражающую способность объекта и сложность идентификации объекта, использование локации на основе отраженного от объекта сигнала не представляется возможным. Поэтому наиболее приемлемым является активный дальномерный метод, при котором объект снабжается устройством, излучающим ультразвуковой сигнал в определённые моменты времени, а измерители дальности определяют дальность до объекта по задержке принимаемого сигнала относительно момента его передачи.

Другой не менее существенный недостаток порожден относительно малыми скоростями распространения ультразвука. Эта причина, которая, с одной стороны, позволяет повысить точность изменения временных задержек (а следовательно, и точность координатной привязки), оказывается негативным фактором с точки зрения темпов обновления навигационной информации, возможно, делая недопустимо большим длительность кадра навигационного сигнала при значительном количестве абонентов.

Указанные причины означают необходимость проведения детального анализа, направленного на осуществление обоснованного выбора в пользу одного из перечисленных способов создания навигационного поля системы.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» поисковые и научно-исследовательские работы (Государственный контракт № 14.740.11.1092 от 24 мая 2011 г.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

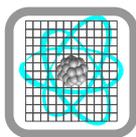
1. Michalson W. R., Proгри I. F. Assessing the accuracy of underground positioning using pseudolites // Proceedings of US Institute of Navigation GPS-2000. Salt Lake City, Utah, 19-22 Sep. 2000. P. 1007-1015.
2. A system for tracking and locating emergency personnel inside buildings / I. F. Proгри, W. R. Michalson, J. Orr, D. Cyganski // Proceedings of US Institute of Navigation GPS-2000. Salt Lake City, Utah, 19-20 Sept. 2000. P. 560-568.
3. Принципы построения системы контроля местоположения подвижных объектов в пределах ограниченного пространства / К. П. Кузнецов, В. К. Орлов, А. Г. Чернявский, Е. А. Шелудько // Датчики и системы. 2002. № 9. С. 29-32.
4. Организация и проведение занятий с личным составом газодымозащитной службы МВД России: прил. к приказу министра МВД России от 25 мая 1996 г. № 285 / МВД России. М., 1996.
5. Организация и проведение занятий с личным составом газодымозащитной службы пожарной охраны МВД СССР: методические указания / МВД СССР. М., 1990.
6. Werb J., Lanzl C. Designing a positioning system for finding things and people indoors // IEEE Spectrum. Sept. 1998. P. 71-78.
7. Свидетельство на полезную модель № 8467. Дальномерная акустическая навигационная система / С. И. Боуш, В. С. Звонов, К. П. Кузнецов и др; заявка № 97119592; зарегистрировано в Гос. реестре полезных моделей 16.11.1998.

A. A. Bogdanovich, A. S. Krasichkov, A. S. Marugin, V. K. Orlov

METHODS OF CONTROL LOCATION STAFF AT WORK IN EXTREME CONDITIONS

The purpose of this review are the development and study of the characteristics of quality control methods and the location of the physiological state, as well as ensuring co-ordination of staff at work in high-risk conditions stay within a limited space, in the absence of visual contact, and visual cues to locate. The comparative analysis of systems and methods for monitoring the physiological condition of the location of personnel when working in extreme conditions.

Determination of location, limited space, physiological state personnel, psevdolit



УДК 621.315.592

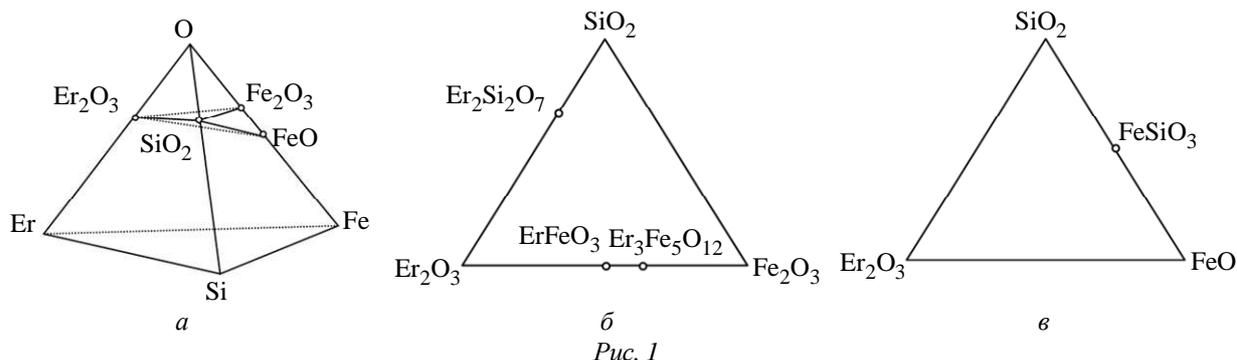
К. Г. Гареев, И. Е. Грачева, В. А. Мошников,
Т. Г. Кайралиева, В. Н. Ермолаев, С. Б. Айдарова

ФАЗООБРАЗОВАНИЕ И ПРОЦЕССЫ, ПРОТЕКАЮЩИЕ В СИСТЕМЕ $\text{Er}_2\text{O}_3\text{--Fe}_2\text{O}_3\text{--SiO}_2$

Композиты на основе оксидов железа, эрбия и диоксида кремния получали золь-гель-методом на кремниевых подложках. Изучались изменения в морфологии поверхности и фазовом составе пленок, происходящие при варьировании условий синтеза. В качестве аналитических методик применялись сканирующая зондовая микроскопия и рентгеновский фазовый анализ. Определены условия, необходимые для повышения содержания железо-эрбиевого граната в составе композита.

Феррит эрбия, оксид железа, оксид эрбия, диоксид кремния, нанокompозит, золь-гель-технология, атомно-силовая микроскопия, рентгеновский фазовый анализ

Получение наноматериала, основанного на сложной гетерофазной оксидной системе, сопряжено с решением ряда вопросов, связанных с подавлением образования побочных соединений. Их появление обусловлено существованием целого ряда устойчивых фаз при данных термодинамических условиях. На рис. 1, а изображен тетраэдр составов четырехкомпонентной системы, в которой выделены квазитройные разрезы, подробные изображения которых даны на рис. 1, б, в. Видно, что в результате высокотемпературного отжига возможно образование фаз простых оксидов, силикатов эрбия и железа, а также феррата и феррита эрбия.



Материалы на основе кристаллических фаз со структурой граната могут использоваться в самых различных областях науки и техники. Благодаря возможности достижения сверхмалой ширины линии поглощения ферромагнитного резонанса и несмотря на существенно меньшие (по сравнению с ферритами-шпинелями) намагниченности насыщения, пленки на основе железо-иттриевого граната находят все более широкое применение в технике сверхвысоких частот [1]. Увеличение числа каналов широкополосных линий связи, мощные импульсные микроволновые устройства и криогенные приборы с низким уровнем потерь, повышенная термостабильность намагниченности насыщения – вот далеко не полный перечень особенностей, благодаря которым интерес к данному классу соединений не ослабевает уже более полувека [2]. Кроме применения в электронной промышленности, ферриты-гранаты, содержащие редкоземельные металлы, обладают рядом преимуществ, позволяющих использовать их в оптоэлектронике для усиления сигнала в оптоволоконных линиях связи. В частности, к подобным составам относится и исследуемый в работе, результаты которой представлены настоящей статьей, феррит эрбия, обладающий особенностями энергетического спектра электронов, обусловленными наличием глубоких внутренних незаполненных уровней. Одним из путей решения задачи по получению тугоплавких оксидных материалов может быть золь-гель-метод синтеза, позволяющий существенно понизить температуру образования требуемых фаз [3]–[5].

Достижения золь-гель-технологии обусловлены развитием технологий, обеспечивающих создание гибридных наноконкомпозитов. В зависимости от различных экспериментальных факторов (значение температуры, состав прекурсоров, катализаторов, добавок и др.) образование и эволюция структуры в золь-гель-процессах протекают совершенно разными путями. Например, пористые структуры наноконкомпозитов [6]–[8] с размерами пор порядка корреляционного радиуса сетки возникают благодаря спиноподальному распаду в процессе нанесения золя на поверхность подложки и термической обработки структур. В условиях спиноподального распада происходит переход однофазной системы в гетерофазную. В районе купола бинадали все развивается так же, как в обычных (несвязанных) системах, с той разницей, что распад происходит не на две фазы с высокой и малой концентрацией, а на чистый растворитель и концентрированный гель. Выглядит это явление как выжимание из структурной сетки растворителя и именуется синерезисом. Высвобождение растворителя из полимерной сетки геля приводит к образованию системы пор, структура и размер которых будут предопределяться процессами формирования и эволюцией фрактальных агрегатов Виттена–Сэндера [9], происходящих на стадии приготовления золь, а также условиями спиноподального распада. Наличие метастабильной и нестабильной областей на фазовой диаграмме (рис. 2) предопределяет возможность двух механизмов формирования гетерофазных наносистем: нуклеофильного и спиноподального.

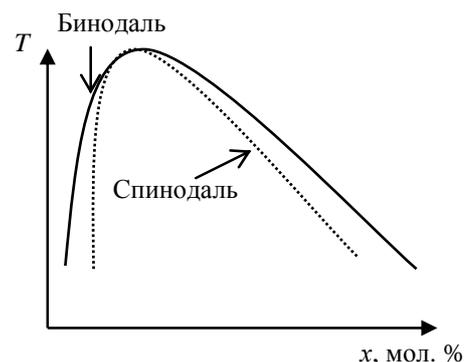


Рис. 2

Целью работы являлось исследование процессов, протекающих при получении наноконпозиционного материала в условиях тонких пленок, анализ возникающих кристаллических фаз, сосуществующих с рентгеноаморфными фазами на основе тугоплавкого оксида эрбия и диоксида кремния, сопоставление результатов фазового анализа с особенно-

стями микро- и наноструктурирования, а также оценка перспектив образования практически интересных фаз эрбиевого феррограната.

Золь-гель-синтез нанокompозитов. Исходные компоненты, использованные для приготовления золь, представляли собой легко гидролизующиеся соединения, которые в результате взаимодействия с водой образовывали полимолекулы или полиольватированные группы. Для получения пленочных наноструктур на основе диоксида кремния был выбран представитель алкоксисоединений этиловый эфир ортокремниевой кислоты (ТЭОС, $\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_4$). Растворы ТЭОС обуславливали пленкообразующие качества и способность к растеканию по поверхности подложек. Возможно проведение реакций гидролиза и поликонденсации ТЭОС в присутствии источников металлооксидов в виде солей, что существенно расширяет возможности метода получения многокомпонентных оксидных материалов на основе диоксида кремния. В работе в качестве источников металлооксидов были выбраны неорганические соли железа ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) и эрбия ($\text{Er}(\text{NO}_3)_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), которые растворяли в этиловом или изопропиловом спирте. Приготовленные золи наносили на поверхности кремниевых подложек, предварительно обработанных в ацетоне, спирте и деионизированной воде под воздействием ультразвука, распределяли с помощью центрифуги (3000 об/мин) и подвергали термической обработке при температурах от 600 до 1100 °С.

Морфология пленочных нанокompозитов исследовалась с применением «полуконтактной» колебательной методики атомно-силовой микроскопии (АСМ) с помощью нанолaborатории «Ntegra Терма». Для диагностики поверхности полученных образцов в

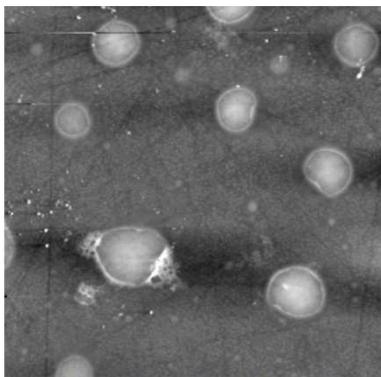


Рис. 3

работе использовались зондовые датчики с кантилевером в виде балки прямоугольного сечения серий NSG 01 компании NT-MDT с резонансной частотой 150 кГц. В работе АСМ-кадры представляли собой квадратные матрицы, имеющие размер 256×256 элементов.

Данные АСМ для образцов, отожженных при температурах 600 и 1000 °С, соответственно, среднего окисляемого состава $50\text{Si}-50(\text{Fe}_{0,68}\text{Er}_{0,32})$, приведены на рис. 3 (размер области сканирования 30×30 мкм) и 4 (размер области сканирования: *a* – 5×5 мкм; *б* – 10×10 мкм; *в* – 30×30 мкм; *г* – 50×50 мкм). По результатам проведенных экспериментов

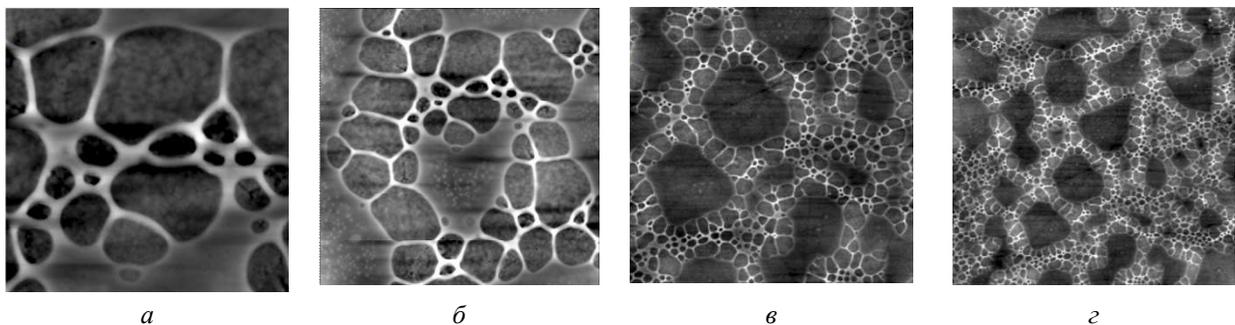


Рис. 4

выявлено, что увеличение температуры отжига наноматериалов от 600 до 1000 °С приводит к изменению механизма образования гетерофазной системы, сферические образования, сформированные при нуклеофильном росте (рис. 3), сменяются перколяционными иерархическими сетчатыми структурами, сформированными в условиях спинодального рас-

пада (рис. 4), что соответствует фазовой диаграмме смеси двух полимеров с нижней критической температурой смешения (рис. 5), предсказанной теорией Флори–Хаггинса [10].

Нужно отметить, что сферические области (рис. 6: *a*, *б* – размер области сканирования 1.5×1.5 мкм; *в* – размер области сканирования 4×4 мкм), сформированные в условиях нуклеофильного роста, состоят из значительно более мелких частиц, что также свидетельствует о иерархической корпускулярно-пористой структуре. В режиме фазового контраста (рис. 6, *б*, *в*) удалось зафиксировать некоторые нюансы строения структур.

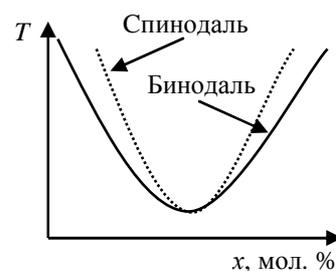


Рис. 5

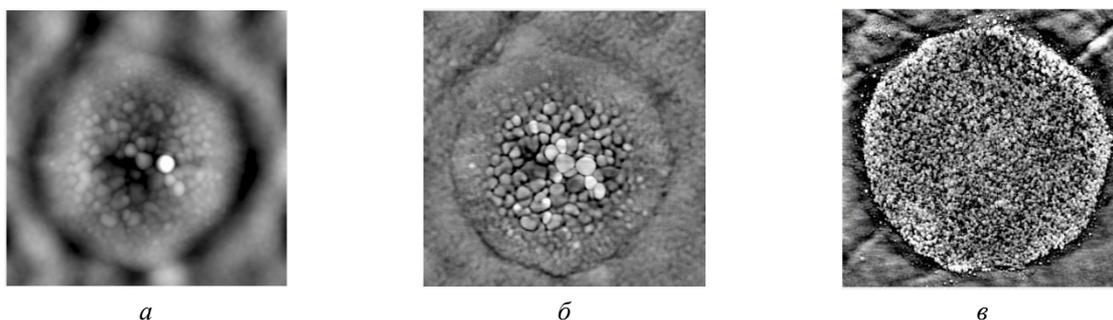


Рис. 6

Авторами настоящей статьи было исследовано влияние времени выдержки золя на морфологию нанокомпозитов. По мере увеличения времени выдержки золя происходит рост фрактальных агрегатов, при этом средняя молекулярная масса полимеризующихся веществ в растворе возрастает.

Авторами выявлено, что молекулярно-массовое распределение неорганических полимерных цепей в золе оказывает значительное влияние на надмолекулярную структуру нанокомпозитов. Показано, что чем длиннее полимерные цепи в золе, тем наблюдается более сильная тенденция к спинодальному распаду. Установлено, что при температуре отжига нанокомпозитов $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличение времени выдержки золь на 96 ч приводит к эволюционированию сферических образований (рис. 3) в корпускулярно-пористую систему (рис. 7, размер области сканирования 30×30 мкм), в которой порами являются также промежутки между сферическими структурами. При температуре отжига нанокомпозитов $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличение времени выдержки золь на 96 ч приводит к смене иерархических пористых структур (рис. 4) макропористыми объектами, которые представляют собой сферические образования, соединенные через сетку (рис. 8, размер области сканирования: *a* – 10×10 мкм; *б* – 50×50 мкм).

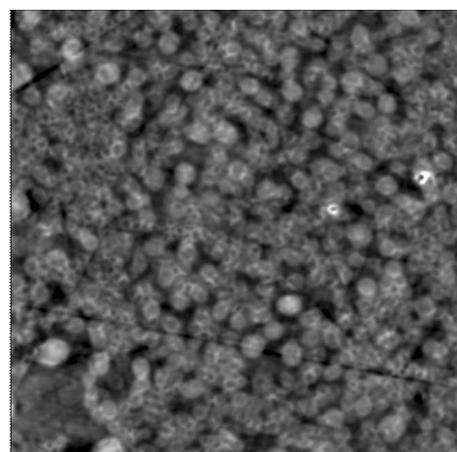


Рис. 7

Предположительно в фазовом составе сферических образований содержатся катионы эрбия, так как результаты исследований нанокомпозитов на основе оксида эрбия с помощью АСМ свидетельствуют о наличии сферических кластеров (рис. 9, размер области сканирования 10×10 мкм).

Вероятно, причина ориентации отдельных кластеров в образцах на основе системы $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-Er}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ (рис. 8) может заключаться в специфических свойствах катионов Er^{3+} , который, будучи ферромагнетиком, обладает собственным магнитным моментом, в результате чего отдельные образования стремятся расположиться друг относительно друга так, чтобы суммарная магнитная энергия была минимальна.

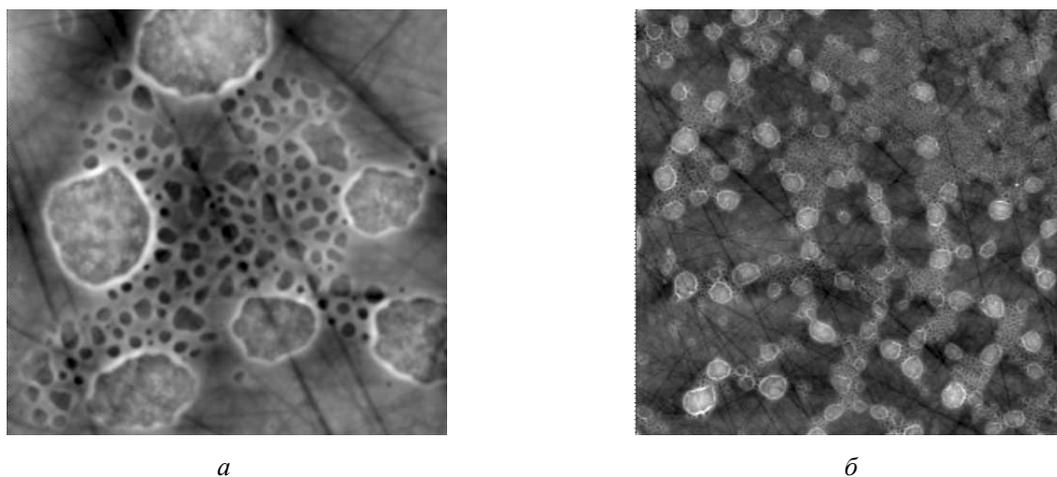


Рис. 8

Рентгеновский фазовый анализ. Пленочные иерархические нанокомпозиты исследовались методом рентгеновского фазового анализа (РФА). В качестве аналитического оборудования применялся рентгеновский дифрактометр «X.Pert MPD Pro» («PANalytical»).

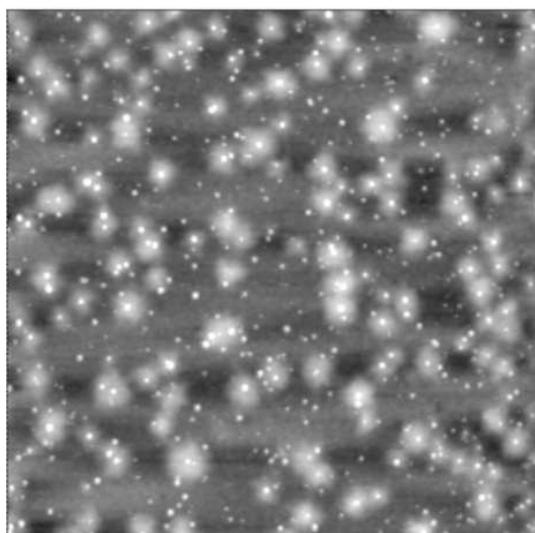


Рис. 9

Для нанокомпозита среднего окисляемого состава $50\text{Si-}50(\text{Fe}_{0.62}\text{Er}_{0.38})$, отожженного при температуре $1000\text{ }^\circ\text{C}$, обнаружено присутствие рефлексов, не относящихся к ферриту эрбия со структурой граната. Кроме феррита эрбия ($\text{Er}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$), массовая доля которого составляет по расчету около 43 %, были зафиксированы феррат эрбия ($\text{Er}(\text{FeO}_3)$ – 24 %), силицид-карбид эрбия ($\text{Er}_{28}\text{Si}_{16}\text{C}_4$ – 11 %) и стишовит (SiO_2 – 21 %). Полученные данные сведены в табл. 1. Несмотря на задание состава золя, исходя из стехиометрического соотношения эрбия и железа в феррите-гранате, массовая доля $\text{Er}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$ в композите составляет менее половины, до чет-

верти составляет феррат эрбия. Образование кристаллической фазы диоксида кремнезема происходит в силу как высокой температуры синтеза, так и значительной молярной доли его в общем составе композита (50 %).

Таблица 1

№	Название	Химическая формула	Рассчитанное содержание, %
1	Stishovite	SiO ₂	21
2	Erbium silicide carbide	Er ₂₈ Si ₁₆ C ₄	11
3	Erbium ferrate(III)	Er(FeO ₃)	24
4	Erbium Iron Oxide	Er ₃ Fe ₅ O ₁₂	43

Авторами выявлено, что повышение температуры отжига приводит к увеличению интенсивности рефлексов относительно фона, обусловленного высокой долей рентгеноаморфных фаз, преимущественно диоксида кремния. Однако помимо упорядочения, происходящего в поликристаллических зернах феррата и феррита эрбия, взаимодействие зародышей кварца (требующего большей температуры получения по сравнению со стишовитом) также усиливается, диоксид кремния вступает во взаимодействие с оксидами железа и эрбия. По этим причинам возможность повысить общее содержание феррита эрбия в композите существенно ограничивается неизбежным в условиях используемого технологического процесса усилением кристаллизации посторонних силикатных и силицидных фаз. Результаты оценки состава композита среднего окисляемого состава 50Si–50(Fe_{0.62}Er_{0.38}), отожженного при температуре 1100 °С, приведены в табл. 2.

Таблица 2

№	Название	Химическая формула	Рассчитанное содержание, %
1	Erbium disilicate	Er ₂ (Si ₂ O ₇)	14
2	α-SiO ₂ , quartz HP	SiO ₂	12
3	Silicon dioxide, Zeolite	SiO ₂	16
5	Erbium ferrate(III)	Er(FeO ₃)	7
6	Erbium iron silicide	Er ₂ Fe ₃ Si ₅	5
7	Erbium iron(III) oxide	ErFeO ₃	6
8	Erbium Iron Oxide	Er ₃ Fe ₅ O ₁₂	8
9	Erbium diiron(III) tris(ferrate(III))	Er ₃ Fe ₂ (FeO ₄) ₃	31

Вполне очевидно, что сильная зависимость морфологии поверхности пленок от условий их получения и состава композита, обнаруженная с помощью АСМ, должна коррелировать с изменениями фазового состава. Поэтому также методом рентгеновского фазового анализа были изучены образцы различного состава при вариации среднего соотношения между атомными долями окисляемых элементов (металлов) в системе Fe₂O₃–Er₂O₃–SiO₂.

В табл. 3 приведены обнаруженные кристаллические фазы и их процентное содержание в композитах различного среднего окисляемого состава, отожженных при температуре 1000 °С. В образце состава 90Si–10(Fe_{0.62}Er_{0.38}) помимо феррита и феррата эрбия разных модификаций присутствуют кристаллические силикаты железа и эрбия, а также коэсит, которые из-за большой доли диоксида кремния преобладают.

Показано, что высокое содержание металлооксидных компонентов в композите позволяет повысить долю ферритовой составляющей (образец состава 10Si–90(Fe_{0.62}Er_{0.38}) в табл. 3). При этом кристаллические модификации кремнезема не были обнаружены, в то время как значительная часть эрбия входит в силикат и простой оксид.

Таблица 3

№	Название	Химическая формула	Рассчитанное содержание для образцов среднего окисляемого состава, %			
			90Si–10(Fe _{0.62} Er _{0.38})	10Si–90(Fe _{0.62} Er _{0.38})	20Si–80(Fe _{0.1} Er _{0.9})	20Si–80(Fe _{0.7} Er _{0.3})
1	Erbium Oxide	Er ₂ O ₃	1	6	5	–
2	Erbium disilicate	Er ₂ (Si ₂ O ₇)	4	–	–	–
3	Erbium Oxide Hydroxide	ErO(OH)	2	–	–	–
4	Erbium ferrate(III)	Er(FeO ₃)	1	–	–	–
5	Erbium disilicate	Er ₂ Si ₂ O ₇	3	35	12	–
6	Erbium diiron(III) tris(ferrate(III))	Er ₃ Fe ₂ (FeO ₄) ₃	8	45	26	1
7	Erbium Iron Oxide	Er ₃ Fe ₅ O ₁₂	5	14	10	7
8	Coesite, syn	SiO ₂	42	–	48	–
9	Clinoferrosilite, iron catena-silicate	FeSiO ₃	15	–	–	–
10	Coesite HP, silicon dioxide	SiO ₂	18	–	–	–
11	Erbium iron silicide	Er ₂ Fe ₃ Si ₅	–	–	–	1
12	Quartz HP, syn	SiO ₂	–	–	–	91

Установив процентное молярное содержание диоксида кремния постоянным, авторы исследовали образцы с разными долями эрбия и железа. В табл. 3 приведены результаты фазового анализа пленки среднего окисляемого состава 20Si–80(Fe_{0.1}Er_{0.9}). Массовая доля феррита эрбия разной модификации превышает треть, тем не менее, высокое содержание эрбия приводит к образованию его оксида и силиката.

Повышение доли железа (образец состава 20Si–80(Fe_{0.7}Er_{0.3}) в табл. 3) исключает появление существенного количества прочих фаз, содержащих эрбий, а преобладание кварца можно объяснить сильным окислением подложки, так как молярная доля кремния непосредственно в золе составляет только 20 %.

Таким образом, авторами показана возможность формирования иерархических пористых наноконпозиционных материалов на основе диэлектрической матрицы диоксида кремния с включением фазы феррита-граната эрбия. Наибольшая доля фазы Er₃Fe₅O₁₂ соответствует образцам, в составе которых молярная доля диоксида кремния не превышает 50 %, дальнейшее же увеличение молярной доли SiO₂ приводит к преобладанию кристаллических модификаций кремнезема и силикатов эрбия и железа. Целью дальнейших исследований может быть стимулирование образования фазы эрбиевого феррограната с сопутствующим подавлением кристаллизации побочных продуктов отжига.

Показано также, что увеличение температуры отжига наноматериалов от 600 до 1000 °С приводит к изменению механизма образования гетерофазной системы. При этом сферические образования, сформированные при нуклеофильном росте, сменяются перколяционными иерархическими сетчатыми структурами, сформированными в условиях спинодального распада. Наблюдаемые закономерности находят объяснение в рамках теоретической модели о фазовой диаграмме смеси двух неорганических полимеров с нижней критической температурой смешения. Выявлено, что молекулярно-массовое распределение неорганических полимерных цепей в золе оказывает значительное влияние на надмолекулярную структуру нанокомпозитов.

Работа проводилась в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы при выполнении государственного контракта П1249 от 07.06.2010.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Преображенский А. А., Бишард Е. Г. Магнитные материалы и элементы. М.: Высш. шк., 1986.
2. Белов К. П., Зайцева М. А. Новые магнитные материалы – ферриты-гранаты // Успехи физ. наук. 1958. Т. LXVI, вып. 1. С. 141–144.
3. Brinker C. J., Scherer G. W. Sol-Gel Science. The Physics and Chemistry of Sol-Gel Processing. San Diego: Academic Press, 1990.
4. Основы золь-гель-технологии нанокомпозитов / А. И. Максимов, В. А. Мошников, Ю. М. Таиров, О. А. Шилова. 2-е изд. СПб.: ООО «Техномедиа» / Элмор, 2008.
5. Получение и анализ порошков-ксерогелей с нанофазой гематита / К. Г. Гареев, И. Е. Грачева, В. И. Альмяшев, В. А. Мошников // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 5. С. 26–32.
6. Фазовые и структурные превращения в нанокомпозитах на основе $\text{SnO}_2\text{-SiO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$ / И. Е. Грачева, А. И. Максимов, В. А. Мошников, О. Ф. Луцкая // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2006. № 2. С. 40.
7. Gracheva I. E., Spivak Y. M., Moshnikov V. A. AFM techniques for nanostructured materials used in optoelectronic and gas sensors // IEEE EUROCON–2009. St. Petersburg, 2009. P. 1246–1249.
8. Грачева И. Е., Мошников В. А. Анализ газочувствительных фрактальных структур на основе диоксида олова методом атомно-силовой микроскопии // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2008. № 5. С. 3–10.
9. Мошников В. А., Грачева И. Е., Аньчков М. Г. Исследование наноматериалов с иерархической структурой, полученных золь-гель-методом // Физика и химия стекла. 2011. Т. 37, № 5. С. 672–684.
10. Flory P. J. Principles of Polymer Chemistry. New York, Ithaca: Cornell University Press, 1971.

*K. G. Gareev, I. E. Gracheva, V. A. Moshnikov,
T. G. Kairaliev, V. N. Ermolaev, S. B. Aidarova*

PHASE FORMATION AND PROCESSES OCCURRING IN $\text{ER}_2\text{O}_3\text{-FE}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ SYSTEM

Composite based on iron oxide, erbium oxide and silica was sol-gel derived on silicon substrates. Changes of surface morphology and phase composition occurring at variable synthesis' conditions were studied. Analytical methods including scanning probe microscopy and X-ray phase analysis were used. Conditions needed for increasing of iron-erbium garnet' content in composite were determined.

Erbium ferrite, iron oxide, erbium oxide, silica, nanocomposites, sol-gel technology, atomic force microscopy, X-ray phase analysis

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЕ ПРИБОРЫ НА ОСНОВЕ БАРЬЕРА ШОТКИ МЕТАЛЛ–AlGaN

Рассматривается сверхвысокочастотный усилитель мощности на основе монолитной интегральной схемы. Данный усилитель на основе нитрида галлия имеет рабочий диапазон частот от 0.1 до 4 ГГц, усиление 17...25 дБ и выходную мощность 2.5 Вт. Также рассматривается усилитель для С-диапазона, работающий в полосе частот 4...6 ГГц и обладающий усилением 10 дБ. Описаны «видимослепые» ультрафиолетовые фотоприемники ($\lambda_{\max} < 0.38$ мкм) и «солнечно-слепые» фотоприемники ($\lambda_{\max} < 0.3$ мкм) на основе барьера Шотки металл–AlGaN.

GaN, AlGaN, SiC, усилитель, СВЧ, фотоприемник

В настоящее время в области создания приборов с барьером Шотки большой интерес представляют материалы на основе нитридов металлов третьей группы, такие как GaN и AlN. В этих материалах отсутствует инверсионная симметрия и сильно выражены поляризационные эффекты. Такие эффекты играют важную роль в приборах на основе нитридных гетероструктур. Сильные электрические поля также усиливают концентрацию электронов и дырок между слоями нитридных гетероструктур. Этот эффект используется в полевых транзисторах на основе гетероструктур GaN/AlGaN.

Поляризация (P) в отсутствие внешних электрических полей складывается из спонтанной поляризации в ненапряженной решетке и пьезоэлектрической поляризации, вызванной механическим напряжением. Благодаря эффекту поляризации в слое AlGaN у гетерограницы возникает положительный заряд, который обеспечивает в 2D-канале равный заряд свободных электронов (пьезолегирование). Пьезолегирование позволяет получить на гетерогранице GaN/AlGaN слоевую концентрацию электронов (n_s) около 10^{13} см⁻², что на порядок выше, чем в гетероструктурах на основе GaAs. Скорость насыщения электронов $v_s > 2.5 \cdot 10^7$ см/с в сильных электрических полях в GaN также выше, чем в GaAs. Большие значения n_s в сочетании с высокими пробивными полями обеспечивают увеличение плотности СВЧ-мощности в полевых транзисторах на основе GaN более чем на порядок по сравнению с приборами на базе GaAs.

Как правило, для создания полевых транзисторов используются гетероструктуры с одним гетеропереходом. На гетерогранице AlGaN/GaN за счет пьезолегирования концентрация электронов в двумерном электронном газе (ДЭГ) может достигать порядка 10^{13} см⁻². При этом подвижность электронов в ДЭГ при 300 К может достигать значений около 2500 см²/(В · с). За счет высоких значений концентрации и подвижности в ДЭГ в полевых транзисторах на основе таких гетероструктур наблюдаются плотности тока до 1.2 А/мм (ток в пересчёте на миллиметр ширины затвора транзистора), как видно из рис. 1, отображающего семейство вольт-амперных характеристик при разных напряжениях на стоке. Крутизна может достигать 240 мСм/мм, как видно из рис. 2, отображающего зависимости тока стока (I_c) и крутизны (S) от напряжения на затворе ($U_{зи}$) при напряжении на стоке ($U_{си}$), равном 20 В.

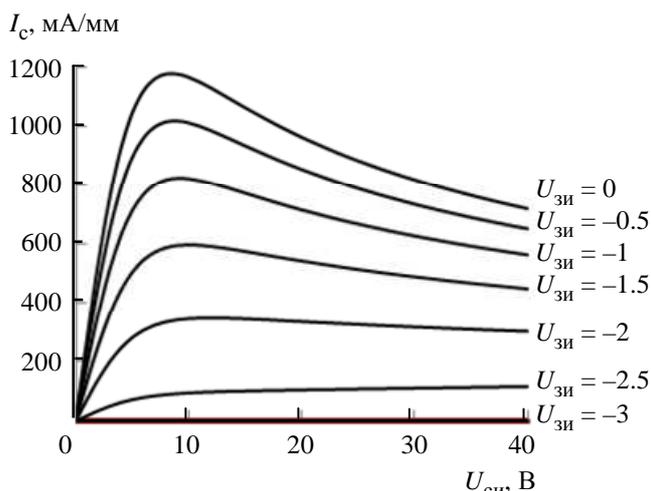


Рис. 1

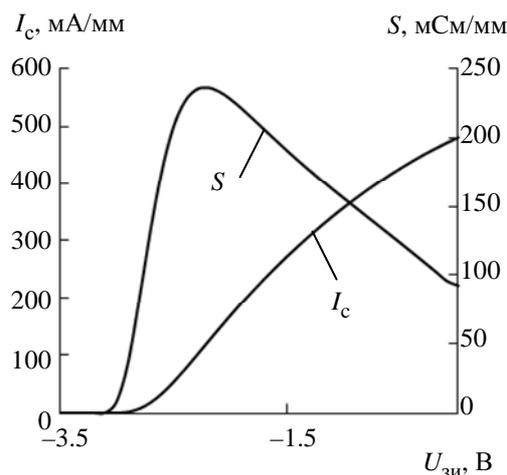


Рис. 2

Такие характеристики в сочетании с высокими пробивными напряжениями позволяют получить значительно более высокие плотности мощности приборов СВЧ, при этом не уступая приборам на GaAs по частотному диапазону. В настоящее время созданные образцы показывают выходную мощность до 15 Вт/мм.

Одной из серьезных проблем является так называемый коллапс тока. Из-за высокой слоевой концентрации при высоком напряжении затвор-сток происходит выброс электронов из канала, что ограничивает максимально достижимые токи и плотности СВЧ-мощности. При этом различают коллапс тока в барьерном и буферном слоях гетероструктуры. Для уменьшения коллапса в барьерном слое полевой транзистор пассивируют слоем Si_3N_4 . Для предотвращения захвата электронов на ловушки в буферном слое GaN необходимо использовать гетероструктуру с двойным электронным ограничением. Схематически двойная гетероструктура AlGaIn/GaN/AlGaIn изображена на рис. 3. Полевые транзисторы на основе таких гетероструктур демонстрируют работоспособность в СВЧ-диапазоне без возникновения коллапса тока.

Специалисты ОАО «ВНИИРА» имеют большой опыт в области разработки и изготовления СВЧ-приборов на GaAs [1], [2]. Сравнительно недавно в ОАО «ВНИИРА» начато изготовление СВЧ-приборов на гетероструктурах GaN. На основе GaN-технологии, в результате совместных усилий специалистов ОАО «ВНИИРА», ОАО «ОКБ Планета» и ЗАО «Светлана-Рост» в рамках ОКР «Излет», была разработана первая отечественная СВЧ монолитная интегральная схема (МИС) усилителя мощности, представляющая собой широкополосный усилитель на основе нитрида галлия, выполненный на подложке карбида кремния с рабочим диапазоном частот от 0.1 до 4 ГГц, усилением 17...25 дБ и выходной мощностью 2.5 Вт. Основные характеристики МИС усилителя мощности представлены на рис. 4, где показана зависимость коэффициента усиления (K_p) и коэффициентов стоячей волны по напряжению (КСВН) входа и выхода от частоты, и на рис. 5, где изображены зависимости выходной мощности ($P_{\text{ВЫХ}}$) и коэффициента усиления (K_p) от входной мощности ($P_{\text{ВХ}}$), измеренных в непрерывном режиме на двух разных частотах.

AlGaN
GaN
Переходные слои AlGaN
Зародышевый слой AlN
Подложка

Рис. 3

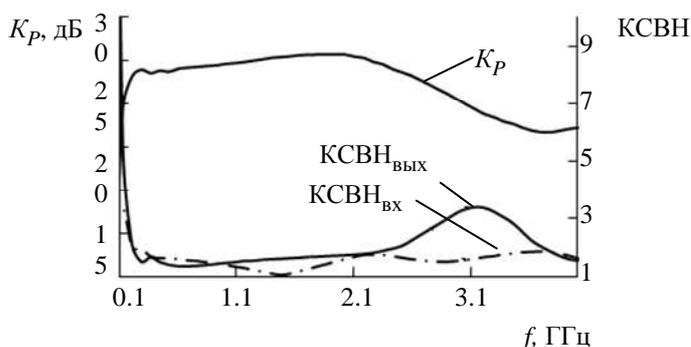


Рис. 4

Усилитель выдержал все необходимые виды испытаний и включен в перечень разрешенных к применению. Его зависимости выходной мощности и коэффициента усиления от входной мощности, измеренных в непрерывном режиме на двух разных частотах, представлены на рис. 5.

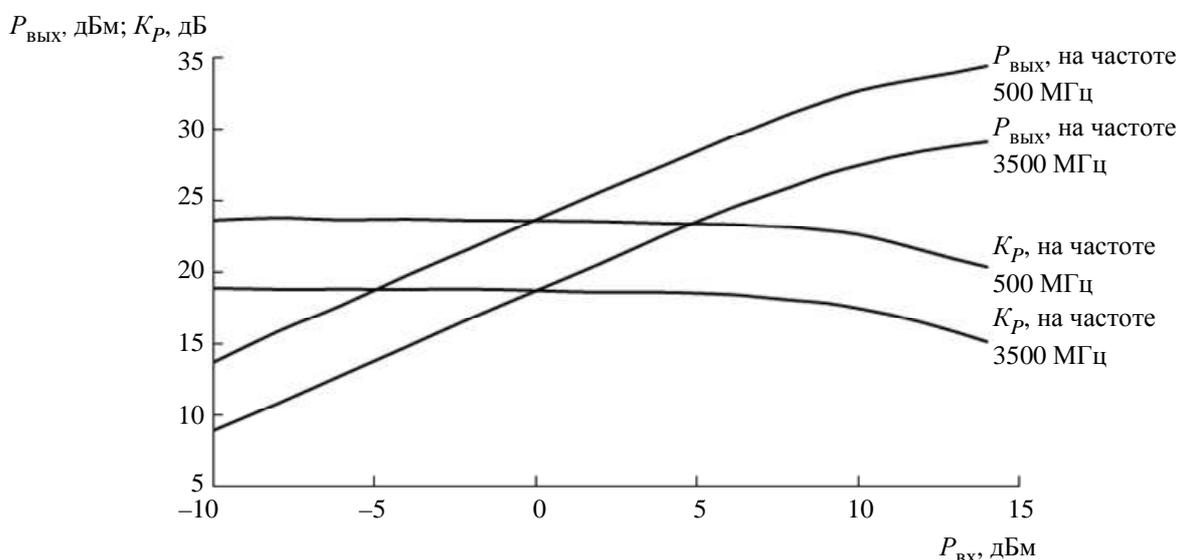


Рис. 5

Также был изготовлен усилитель мощности, работающий в полосе частот 4...6 ГГц и обладающий усилением 10 дБ. В основе усилителя четыре селективно-легированных полупроводниковых (СЛП) транзистора GaN на карбиде кремния с длиной затвора 0.5 мкм и шириной 1200 мкм каждый.

Усилитель построен по балансной схеме с использованием мостов Уилкинсона. Такая схема позволяет получить хорошее согласование по входу и выходу усилителя, при этом обеспечивая хорошую линейность в режимах АВ и В. Выходная мощность такого усилителя составила 7 Вт в непрерывном режиме и 12 Вт в импульсном режиме. На рис. 6 показаны малосигнальные амплитудно-частотные характеристики усилителя, коэффициент усиления (K_p) и коэффициенты стоячей волны по напряжению (КСВН) входа и выхода, а на рис. 7 – зависимости выходной мощности ($P_{\text{ВЫХ}}$) и коэффициента усиления (K_p) от входной мощности $P_{\text{ВХ}}$, измеренных в непрерывном режиме. Такая разница в значениях выходных мощностей может быть объяснена недостаточно хорошим теплоотводом от подложки и разогревом канала транзисторов под действием мощного высокочастотного сигнала.

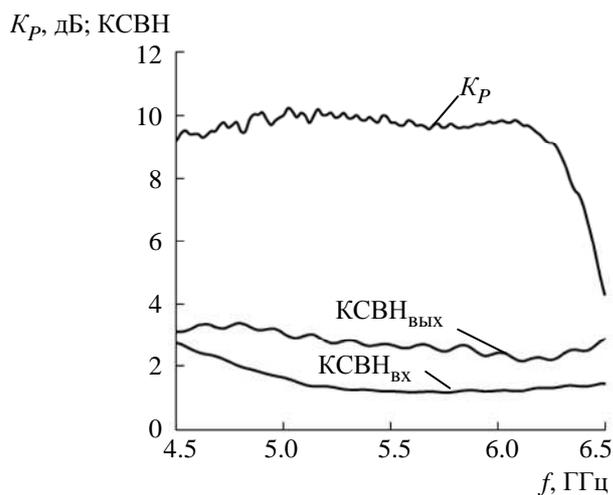


Рис. 6

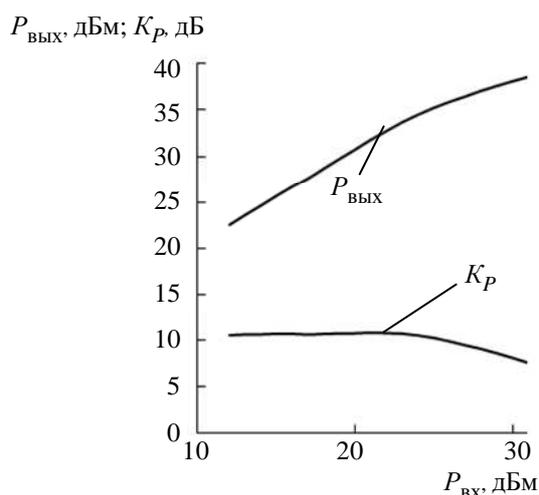


Рис. 7

К перспективным разработкам, открывающим принципиально новые возможности для разработчиков аппаратуры, по мнению авторов статьи, можно отнести изготавливаемый в ОАО «ВНИИРА» СВЧ-коммутатор на гетероструктурах GaAs и GaN, способный эффективно коммутировать СВЧ-сигналы вплоть до W-диапазона длин волн. На данный момент изготовлен и измерен образец, позволяющий коммутировать СВЧ-мощность до 26 ГГц. Топология такого коммутатора может в дальнейшем использоваться как стандартный фрагмент при построении кристаллов цифровых аттенуаторов и фазовращателей. На рис. 8 показаны зависимости коэффициентов передачи S_{21} и K_{Π} от частоты для MESFET-коммутатора на основе арсенида галлия в случаях открытого и закрытого каналов. Применение гетероструктур GaN при изготовлении этого устройства позволит улучшить представленные характеристики, в части уменьшения потерь открытого канала и увеличения максимальной коммутируемой мощности.

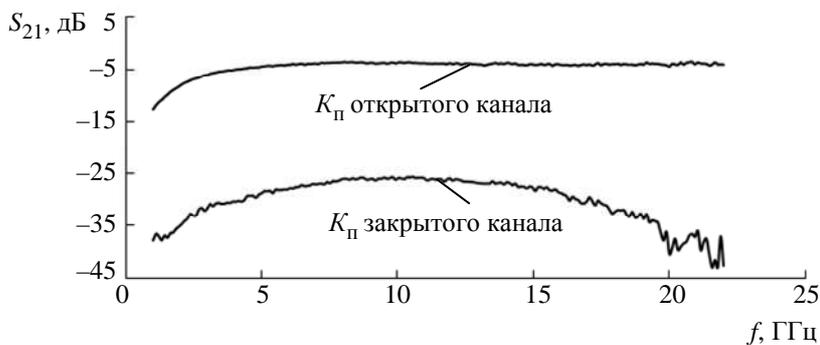


Рис. 8

Разработка основана на новом функциональном элементе – переключаемом конденсаторе, в котором при прохождении СВЧ-сигнала не участвуют сопротивления омических контактов, что, несомненно, увеличивает его добротность [3]. Показатель качества такого коммутатора (отношение начальных потерь к развязке) превосходит все имеющиеся аналоги и не уменьшается с ростом частоты. Изготовлен макет такого коммутатора на GaAs-структурах, результаты измерений СВЧ-характеристик которого подтвердили расчетные данные.

Следует отметить, что переход на гетероэпитаксиальные GaAs-структуры должен существенно улучшить полученные параметры и снизить начальные потери за счет формирования двумерного электронного газа. В свою очередь, использование GaN

гетероэпитаксиальных структур для реализации описанного коммутирующего элемента позволит разработать СВЧ-коммутатор, способный переключать сигналы с мощностью вплоть до 20 Вт.

GaN и AlGaN также весьма перспективны для современной оптической электроники, одной из важных задач которой в настоящее время является разработка ультрафиолетовых фотоприемников. Области применения коротковолновых фотодетекторов весьма широки: они применяются в астрономии при исследовании солнечной радиации; в военных целях (в частности, для астронавигации и ультрафиолетовой локации) использование «солнечно-слепого» фотоэлемента позволяет обнаружить ультрафиолетовую составляющую пламени ракеты на фоне Солнца, в то время как обычные фотоприемники будут засвечены излучением самого Солнца; в экологии – для обнаружения озонных дыр; в медицине – в качестве датчиков вредного воздействия УФ-света, например, как миниатюрные индивидуальные регистраторы UVC-диапазона спектра, при обеззараживании воды и воздуха, синтезе химических соединений; в экологии – для детектирования разрушения озонового слоя, обнаружения озонных дыр; в строительной промышленности – при инспекции целостности тонких прозрачных покрытий, инородных включений; в минералогии, криминалистике – при определении состава по индивидуальному свечению примесей (лабораторное оборудование); как составляющая часть системы безопасности – в качестве сигнализации открытого пламени, включенных источников ультрафиолета, например ламп для кварцевания помещений; также возможно их использование в энергетике, например, для расширения диапазона чувствительности «солнечных батарей» путем создания многослойных полупроводниковых систем, в частности при использовании на космических объектах.

Одним из главных преимуществ использования твердых растворов AlGaN является то, что варьирование содержания Al в твердом растворе позволяет создать фотоприемник с резким длинноволновым краем чувствительности в заданной области. Такая фоточувствительная структура не потребует применения дорогостоящих оптических фильтров, которые также ослабляют полезный сигнал.

В ходе исследований была разработана технология создания фотодиодов на основе барьера Шотки к твердым растворам AlN–GaN. На подложке сапфира методом молекулярно-пучковой эпитаксии с плазменной активацией азота в металлобогатенных условиях наносился слой твердого раствора AlGaN толщиной порядка 1 мкм с требуемой долей Al. Далее методом вакуумного напыления создавались омический и выпрямляющий контакты. Толщина выпрямляющего контакта не превышала 15 нм для соблюдения эффекта полупрозрачности. В учебно-научной лаборатории «Фотоника» СПбГЭТУ «ЛЭТИ» была отработана технология создания омических контактов для *p*- и *n*-типа GaN и AlGaN [4], [5], отличительной особенностью которых является более дешевая двухслойная структура контакта. Важно, что при создании контактов к *n*-AlGaN отжиг проводится в вакууме, а не в инертных газах, что также уменьшает стоимость.

В качестве выпрямляющего контакта исследовались такие металлы, как Te, Sn, Ag, In, Ni, Au (рис. 9). Наилучшие результаты были достигнуты при использовании золотого контакта с последующим отжигом.

Изучение выпрямляющих контактов с различными металлами (рис. 10) показало слабое влияние типа металла на спектральные характеристики фотодетектора. Из рис. 10 видно, что основной особенностью является смещение максимума чувствительности у серебра, что определяется спектром пропускания Ag в этом диапазоне длин волн. Спад характеристики в коротковолновой области обусловлен поверхностными состояниями.

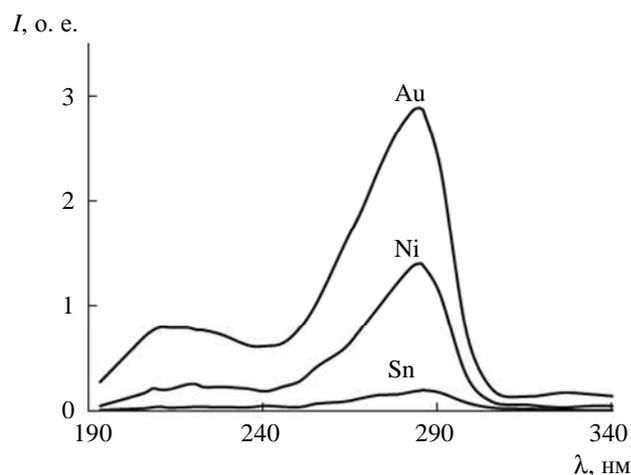


Рис. 9

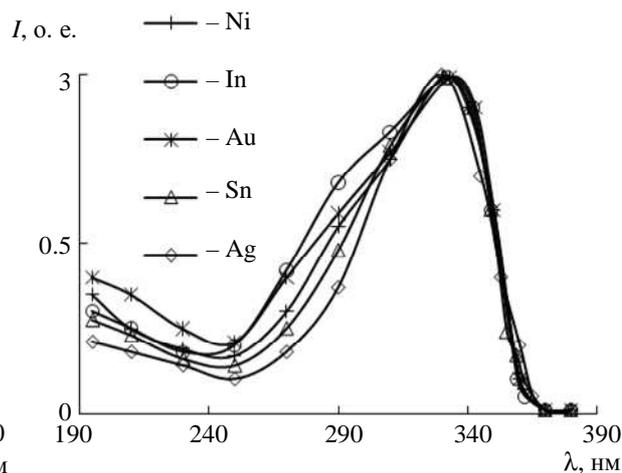


Рис. 10

В результате проведенных исследований были созданы фотодетекторы, не чувствительные к излучению видимого и ИК-диапазонов спектра ($\lambda_{\max} < 0.38$ мкм), так называемые видимослепые фотоприемники, а также «солнечно-слепые» приборы ($\lambda_{\max} < 0.3$ мкм), не реагирующие на ультрафиолетовую часть спектра излучения Солнца. Исследование влияния доли Al в твердом растворе AlGaIn на спектральный диапазон чувствительности показало, что «солнечно-слепой» фотодетектор реализуется на основе барьера Шотки к твердому раствору AlGaIn с долей Al $x = 0.42$ (рис. 9). Уменьшение доли Al до $x = 0.08$ позволяет создать «видимослепой» фотодиод (рис. 10).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шустерман Л. Б., Гук В. Г. Разработка твердотельных СВЧ радиотехнических устройств на арсенид-галлиевых МИС // Электродинамика и техника СВЧ, КВЧ и оптических частот. 2001. Т. 9, вып. 1(29). С. 63–75.
2. Гук В. Г., Филаретов Г. А., Шустерман Л. Б. Разработка базисного набора арсенид-галлиевых СВЧ МИС // Электродинамика и техника СВЧ, КВЧ и оптических частот. 2001. Т. 10, вып. 3(35). С. 148–153.
3. Пат. РФ, МПК H01L45/00. Трехэлектродный высокочастотный полупроводниковый прибор / В. Г. Гук, Б. В. Калинин, Г. А. Филаретов и др.; заявитель и патентообладатель ЗАО «Светлана-Рост» 2007149619/28; заявл. 28.12.2007; выд. 27.04.2009.
4. Ламкин И. А., Тарасов, С. А., Феоктистов А. О. Оптимизация технологии получения омических контактов к эпитаксиальным слоям p-GaN // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 5. С. 14–17.
5. Калинин Б. В., Ламкин И. А., Тарасов С. А. Моделирование вольт-фарадных и вольт-амперных характеристик DHFET на основе гетероструктур AlGaIn/GaN // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. № 2. С. 16–20.

B. V. Kalinin, I. A. Lamkin, E. A. Menkovich, C. A. Tarasov

HIGH-PERFORMANCE DEVICES BASED ON METAL-ALGAN SCHOTTKY BARRIERS

A super high-frequency power amplifier, based on a monolithic integrated circuit (microwave ISI), has been developed. This gallium nitride amplifier has an operating frequency range of 0.1 to 4 GHz, gain of 17...25 dB and an output power of 2.5 Wt. An amplifier for C-band has also been implemented, operating in the frequency range of 4...6 GHz with a 10 dB gain. Several «visible-blind» ultraviolet photodetectors ($\lambda_{\max} < 0.38 \mu\text{m}$) and «solar-blind» photodetectors ($\lambda_{\max} < 0.3 \mu\text{m}$) have been developed on the basis of metal-AlGaN Schottky barriers.

GaN, AlGaN, SiC, amplifier, SHF, photodetector



УДК 66-933.6

Б. Я. Советов, А. И. Яшин

ОДНОРОДНЫЙ МАТЕМАТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОЦЕССОВ ПЛАНИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

Проведен анализ требований к методам математического описания процессов адаптивного автоматизированного управления, дана оценка методов планирования и управления, предложен однородный метод, базирующийся на динамическом линейном программировании. Рассматриваются проблемы и способы его реализации.

Автоматизированное управление, бизнес-процесс, динамическое линейное программирование, интегральный метод, планирование

Для формирования однородного математического метода процессов планирования и управления необходимо решить следующие теоретические задачи:

1. Формирование дополнительных требований к описанию процессов планирования и управления.
2. Построение варианта метода динамического линейного программирования.
3. Формирование метода адаптивного автоматизированного планирования.
4. Построение метода адаптивного автоматизированного управления, отличающегося согласованием экономических интересов и динамических свойств системы, позволяющего оперативно реагировать на изменения параметров внешней рыночной среды.

Технические адаптивные системы получают дополнительную информацию об изменении параметров объекта управления, которое в свою очередь компенсируется изменением параметров управляющей части.

В процессе эксплуатации системы ее цели либо не менялась, либо менялись только значения составляющих вектора цели (количественные изменения цели).

Вместе с тем функциональное наполнение структуры адаптивных систем до настоящего времени связывают с техническими системами.

В то же время в процессе управления организационно-экономическими системами изменяется структура спроса, которая определяет изменения цели работы системы. Компенсировать такие изменения в общем случае можно меняя структуру системы.

Под структурой понимается совокупность элементов и их связей. Для рассматриваемых организационно-экономических систем управления введение (удаление) новых структурных элементов (реконструкция) связано с серьезными затратами. В связи с этим компенсация изменения состава вектора цели осуществляется изменением состава векторов плана и управляющих воздействий, т. е. посредством изменения структурных связей системы (маршрутов – в терминах предметной области) и, возможно, весов отдельных составляющих целевых функций. В связи с этим в данной статье под изменением структуры подразумевается изменение связей при фиксированных структурных элементах.

Иными словами, фактически используется понятие *гибкость* – способность системы изменять цели функционирования за счет изменения структурных связей без существенных затрат (переворужения производства). Гибкость представляет собой, таким образом, частный случай процедуры адаптации.

Особенности среды и автоматизированного управления предъявляют специфические и порой жесткие требования к методам математического описания процессов.

Требования предполагают:

1. Достаточную адекватность описания процессов, протекающих в реальной системе.
2. Соответствие предлагаемой методологии исследования стандарту «Системы менеджмента качества».
3. Системность описания как процесса проектирования, так и процесса эксплуатации.
4. Учет многоуровневого характера структуры систем с изменением масштабов описания по времени и координатам.
5. Системность и наглядность метода математического описания и простоту алгоритма приложения.
6. Интеграцию процессов функционирования и адаптации с элементами интеллекта.
7. Поддержание оптимальных режимов работы с помощью компьютерной техники.
8. Системный метод описания процессов оптимального планирования и управления.
9. Однородность (однотипность) составляющих системного описания процессов оптимального планирования и оптимального управления.
10. Согласование (векторных) экономических интересов и координацию темпов работы целенаправленных элементов.
11. Совместную оценку экономических свойств (через экономический интерес) и управленческих свойств.
12. Учет неопределенности в получении данных при идентификации управляющей части системы.
13. Учет движения финансовых потоков совместно с потоками других ресурсов.
14. Малое время расчетов и возможность работы в реальном масштабе времени.
15. Учет значительной доли неформальных процедур.

Требование 1 предполагает прежде всего наличие нелинейного описания процессов.

Требование 2 означает:

- 1) рассмотрение процессов с учетом модели системы менеджмента качества, которая представляет собой агрегированную схему цикла управления;

2) использование структуры бизнес-процессов.

Требование 4 говорит о многоуровневой структуре. Можно выделить базовую трехуровневую структуру. Тогда любую структуру с числом уровней более трех можно рассматривать последовательно используя «скользящую» базовую структуру. В силу этого будем рассматривать трехуровневую структуру (рис. 1).

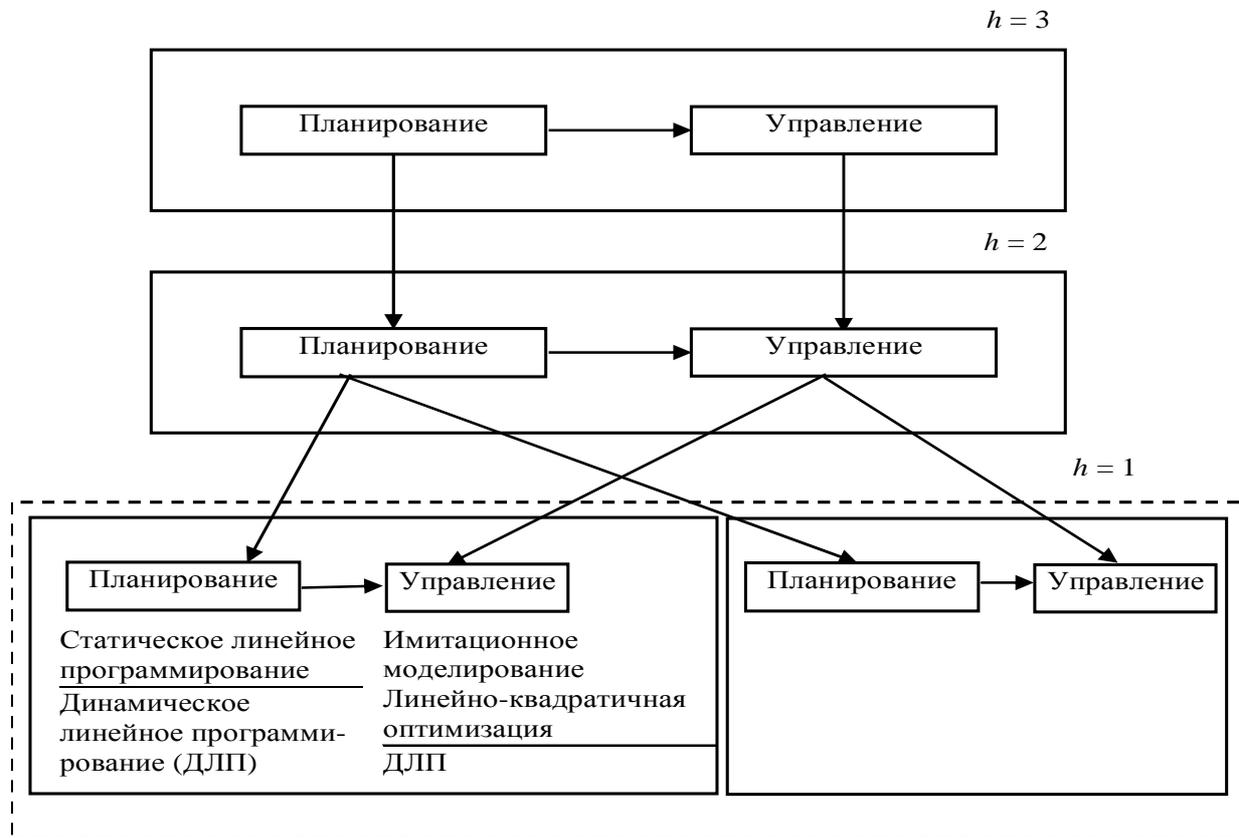


Рис. 1

Требование 5 позволит улучшить понимание полученных результатов, даст возможность оперировать «физической сущностью» процессов и тем самым избежать грубых ошибок в расчетах. В силу сложности организационных систем говорят о системном математическом описании, в котором разные части системы могут описываться различными частными методами (составляющими) с последующей их стыковкой. В то же время, как подчеркнуто в требовании 9, целесообразно добиться использования одинаковых частных методов (однотипных составляющих) в системном описании.

Следствием целенаправленности системы и ее структурных элементов является требование 10, а следствием их динамичности – требование 11.

Анализ методов, проведенный на основе перечисленных требований, показал, что им удовлетворяют 2 метода: интегральный и однородный.

Современные АСУ отличаются сложной блочной структурой. Разные блоки могут описываться разными математическими методами с их стыковкой.

Работа с *интегральным* методом выявила следующие его недостатки:

1. Сложность интеграции локальных методов.

2. Невозможность учета нелинейных характеристик в описании структурных элементов.

3. Трудности интерпретации экономических интересов элементов и их согласования с динамическими свойствами.

4. Сложность координации динамических свойств.

Этих недостатков лишен *однородный* метод, в котором разные блоки описываются одним аппаратом. Таким аппаратом в данном случае является динамическое линейное программирование.

В то же время в нем появляются новые затруднения. Необходимо обеспечить:

1) устойчивость замкнутой системы и оценку динамических свойств, особенно многомерной и многоуровневой системы;

2) нулевую установившуюся ошибку;

3) неколебательный переходный процесс.

Последнее важно не только для критерия, но и для работы лица, принимающего решение (ЛПР), колебательный переходный процесс крайне нежелателен. В связи с этим целесообразно рассмотреть возможности однородного метода подробнее.

В силу иерархической структуры адаптивной автоматизированной системы ее исследование целесообразно проводить в две стадии: описание отдельного структурного целенаправленного элемента; описание взаимодействия элементов.

Имеется 2 варианта решения задачи ДЛП:

1. Прямое решение задачи методом Р. Габасова [1]. Алгоритм решения не ограничен размерностью задачи, однако сложен в понимании и не имеет стандартного программного приложения, требует построения пользовательской программы с тщательной ее проработкой и проверкой достоверности решений. В настоящее время он находится в работе.

2. Сведение задачи ДЛП к известной задаче статического линейного программирования (СЛП). Вариант характеризуется резким повышением размерности задачи, однако прост в понимании, реализации и обладает хорошей наглядностью. К тому же задача СЛП может быть решена с помощью стандартных программных приложений, основанных на симплекс-методе, или с помощью алгоритма Р. Габасова, в настоящее время программно реализованного, отлаженного и проверенного на достоверность результатов.

В силу перечисленных обстоятельств именно второй вариант будет использоваться в дальнейшем изложении. Приведем первоначально схему для одного элемента адаптивной системы.

В системах автоматического управления принято обозначать управляющее устройство и объект управления (ОУ) в виде горизонтального ряда прямоугольников, учитывая только информационную составляющую (рис. 2).

Потоки энергетических ресурсов в силу их большой мощности на схеме, как правило, отсутствуют.

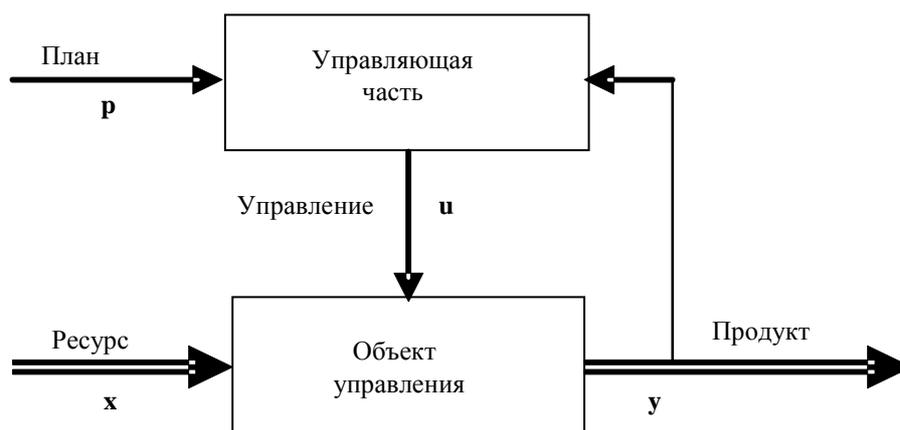


Рис. 2

Для иерархических автоматизированных систем, в которых планирование является относительно самостоятельным процессом и необходимо четко показать потоки используемых ресурсов, более удобен способ, отраженный на рис. 2 (схематика автоматизированной системы).

В окончательно сформированном однородном методе учтены все требования, предъявляемые к методам описания адаптивного автоматизированного управления.

Решение задачи как для разомкнутой, так и для замкнутой систем может осуществляться двумя способами.

Рассчитываются данные сразу для всего интервала времени моделирования путем предварительного вычисления промежуточных данных и решения (статической) задачи линейного программирования высокой размерности. Необходимо ускоренное решение задачи. Этот способ удобен для последующей задачи согласования экономических интересов с применением выкладок, доказанных ранее для (статического) линейного программирования в системном методе.

Задача решается отдельно для каждого интервала управления. Такой способ сложнее и труднее в понимании, однако позволяет решать задачу в реальном масштабе времени. Размерность задачи по сравнению с первым способом уменьшается, алгоритм решения становится сложнее. Решение и в этом случае возможно методом динамического линейного программирования Р. Габасова [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Габасов Р., Кириллова Ф. М. Конструктивные методы оптимизации: В 2 ч. Ч. 2. Минск.: Университетское, 1984.
2. Советов Б. Я., Цехановский В. В., Чертовской В. Д. Теория адаптивного автоматизированного управления. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009.

B. Y. Sovetov, A. I. Yashin

HOMOGENEOUS MATHEMATICAL METHOD OF PROCESSES OF PLANNING AND MANAGEMENT

The analysis of requirements to methods of the mathematical description of processes of adaptive automated management is carried out, the estimation of methods of planning and management is given, the homogeneous method which is based on dynamic linear programming is offered. Problems and ways of its realization are considered.

Automated management, business process, dynamic linear programming, an integrated method, planning

ТОПОЛОГИЧЕСКИЕ И МАТРИЧНЫЕ УСЛОВИЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Формулируются условия локализации сигнальных неисправностей в системах диагностики процессов управления, модели которых представлены в виде сигнальных графов и структурных схем. На примере системы управления судового турбоагрегата иллюстрируется некорректность задач локализации и идентификации сигналов неисправности, а также эффективность применения методов регуляризации решения.

Диагностика процессов, система управления, модель неисправности, сигнальный граф, частотные характеристики, ранг матрицы, число обусловленности, регуляризация некорректных задач

В последние десятилетия усилилось внимание к исследованиям и разработкам, посвященным диагностике процессов и созданию систем, толерантных к неисправностям [1]–[3]. К основным задачам проектирования систем технической диагностики относится выбор точек измерения. Ошибки, допущенные на этом этапе, не могут быть исправлены в дальнейшем никакими методами обработки данных. Структурные условия диагностирования сложных систем, модели которых представлены в форме сигнальных графов или структурных схем, обсуждаются в [4]. Неисправности интерпретируются как воздействия среды функционирования объекта диагностирования в виде сигналов или вариаций компонентов и связей между ними. Здесь рассматриваются условия обнаружения, локализации и идентификации сигнальных неисправностей систем управления.

Топологические условия диагностирования сигналов неисправности. Рассмотрим модели первого, топологического ранга, когда не конкретизированы классы и структуры операторов дуг сигнального графа [5]. Известно, что свойства систем, выявленные по наименее определенным моделям, являются наиболее общими и сохраняются при повышении уровня определенности. Модель неисправности – переменная f_r , приложенная к вершине сигнального графа $r = 1, \dots, R$. Предполагается наличие априорной информации о подмножестве вершин графа, куда могут быть приложены сигналы неисправностей. Источниками могут быть вибрации механических частей системы, автоколебания из-за потери устойчивости подсистем низших уровней иерархии (измерительных или исполнительных устройств, построенных по принципу обратной связи). Пусть обработка данных измерений сигналов y_q ($q = 1, \dots, Q$) выявила аддитивную составляющую с амплитудой, превышающей установленный порог, т. е. *обнаружила симптом* неисправности.

Необходимым условием обнаружения сигнала неисправности является существование пути в графе от вершины входа к измеряемому выходу. Задача решается топологическим анализом орграфа, для чего предложен ряд алгоритмов (см., например, [5]). В результате анализа путей в орграфе заполняется матрица достижимости \mathbf{D} : если существует путь из вершины $r = 1, \dots, R$ до вершины $q = 1, \dots, Q$, то элемент (q, r) равен 1, иначе 0. Отображение «неисправность–симптом» $\mathbf{D}: F \rightarrow Y$, где F – множество событий в виде сигналов неисправностей, Y – множество событий в виде обнаружения реакций выходов, в общем случае не является однозначным.

Следующим этапом процесса диагностирования является *локализация* источника неисправности – определение номера вершины r , куда приложено воздействие. Локализация базируется на обратном отображении «симптом–неисправность» $\mathbf{D}^{-1}: Y \rightarrow F$, неоднозначность которого обуславливает нетривиальность задачи локализации неисправности. Если для некоторого f_r не найдется подмножества точек измерения, доставляющих информативные данные для обнаружения его следствия, т. е. столбец r матрицы \mathbf{D} нулевой, то задача диагностирования не имеет полного решения в данной постановке. Пусть симптом неисправности обнаружен на множестве вершин $\{R(q); q = 1, 2, \dots\}$. Искомая вершина r принадлежит пересечению множеств $R = \bigcap_q R_q$, найденных для каждой вершины измерений q . Мощность пересечения не превосходит наибольшей мощности множеств, участвующих в операции теоретико-множественного пересечения. Отсюда следует вывод – чем больше число вершин, где выявлен симптом, тем, в общем случае, определеннее локализация.

Выбор точек измерений означает *декомпозицию* – разбиение множества выходов на подмножества, которые предназначаются для диагностирования определенных групп неисправностей. Для этого номера входов и выходов упорядочиваются таким образом, чтобы матрица достижимости \mathbf{D} имела блочно-диагональную структуру. Если, в частности, число точек измерения Q равно числу сигналов R , а матрица \mathbf{D} диагональная, то достигается полная декомпозиция – каждый измеритель настроен на обнаружение единственного воздействия. В несвязных графах декомпозиция естественна. Если связный граф содержит несколько сильных компонентов, то строится так называемый *граф конденсаций*, вершинам которого соответствуют сильные подграфы. Построение графа конденсаций означает декомпозицию задачи диагностирования. При проектировании системы технического диагностирования следует предусмотреть точки измерений для каждого несвязного и сильного компонента, подверженного сигнальным неисправностям.

Информативность матрицы достижимости \mathbf{D} повысится, если ее элементы заполнять числами путей с указанием их длины [4]. Это позволяет принять дополнительный критерий ранжирования пар (q, r) для столбцов матрицы \mathbf{D} по критерию: $\max_r d_{qr}$. Если обработка сигнала выхода q позволяет обнаруживать несколько воздействий (в строке q имеется несколько ненулевых столбцов), то условия диагностирования предпочтительней для вершины r , от которой больше число путей до вершины q . Чем путь короче, тем вероятнее меньшее ослабление высокочастотного сигнала инерционными дугами.

Классификация точек измерения по сигналам потенциальных неисправностей становится более определенной с повышением ранга моделей до второго — структурного. Когда топология объекта диагностирования дополняется информацией о структуре операторов (например, о степенях полиномов m и n числителей и знаменателей передаточных функций), появляется дополнительная возможность ранжирования точек измерения и уточнения результатов декомпозиции. При прочих равных условиях предпочтение может быть отдано пути с большим значением разности $(m - n)$. Вероятно, это путь с более широкой полосой пропускания частот, что обеспечивает меньшее ослабление высокочастотного сигнала неисправности.

Анализ *достижимости* в орграфах применим, главным образом, к бесконтурным графам. Особенностью систем управления являются обратные связи, изменяющие свойства передач. Необходимы критерии, характеризующие свойства *связности* орграфов и позволяющие количественно оценить совокупную роль путей и контуров. Например, для сильного орграфа любая пара вершин взаимно достижима, т. е. все элементы матрицы **D** равны 1, что приводит к потере ее информативности.

Анализ роли контуров в формировании свойств передач. Для исследования условий диагностирования сигнальных неисправностей систем с контурами построим максимально упрощенный граф с единичными дугами, который наследует только топологию исходного графа. Для сохранения знаков обратных связей веса некоторых дуг принимаются -1 . Формула Мэйсона для передачи сигнального графа преобразуется к следующему виду:

$$k_{qr} = \Sigma_{qr} / \Delta, \quad (1)$$

где

$$\Sigma_{qr} = \sum_p (1 + \lambda_{p1} + \lambda_{p2} + \lambda_{p3} + \dots), \quad (2)$$

$$\Delta = 1 + \kappa_1 + \kappa_2 + \kappa_3 + \dots \quad (3)$$

Выражение Σ_{qr} для числителя (2) складывается из суммы путей из r в q с учетом миноров: λ_{p1} – число контуров, не касающихся p -го пути из r до q ; λ_{p2} – число пар контуров, не касающихся p -го пути; λ_{p3} – число троек контуров, не касающихся p -го пути, и т. д. Выражение (3) для определителя графа Δ содержит: κ_1 – число контуров; κ_2 – число пар некасающихся контуров; κ_3 – число троек попарно некасающихся контуров и т. д. Компоненты выражений (2) и (3) – целые числа, над которыми выполняются операции сложения, поэтому числитель и знаменатель (1) являются целыми.

Формулы (1)–(3) устанавливают связь между топологией графов диагностируемых систем и качественной характеристикой передач. Элементы матрицы передач $\mathbf{K} = \{k_{qr}; q = 1, \dots, Q; r = 1, \dots, R\}$ представляют собой дроби с одинаковыми знаменателями Δ , поэтому достаточно сопоставлять числители Σ_{qr} матрицы **K**, отражающие влияние путей и контуров. Как следует из (2), чем больше число путей и не касающихся их контуров, тем, при прочих равных условиях, эффективнее канал передачи.

В системах управления контуры отрицательной обратной связи ослабляют передачи касающихся их путей. В свою очередь, контуры, непосредственно не касающиеся пути, но принадлежащие сильному подграфу, которого путь касается, ослабляют влияние контуров, касающихся пути (усиливают передачи путей). Таким образом, при выборе точек измерения предпочтение следует отдавать передачам с максимальным числом путей с минимальным числом касающихся и максимальным числом не касающихся их контуров.

Выводы, полученные для упрощенного графа, имеют силу для моделей более определенных – когда выбраны структуры операторов и параметры. Качественный анализ роли путей, контуров и отношений их касания применим и к нелинейным моделям.

Матричная интерпретация условий диагностирования. Матричный формализм помогает в разработке доказательной базы методов обнаружения и локализации неисправностей, а также позволяет использовать мощные методы линейной алгебры и соответствующие программные средства. Графу модели топологического ранга отвечает система уравнений

$$\begin{aligned} \mathbf{Ax} &= \mathbf{Bf}; \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx}, \end{aligned}$$

где $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^N$; $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^R$; $\mathbf{y} \in \mathbb{R}^Q$ – векторы переменных системы, входа и выхода; \mathbf{A} – матрица смежности графа; \mathbf{B} и \mathbf{C} – матрицы связи системы со средой на входе и выходе. Главная диагональ матрицы \mathbf{A} единична, а ее недиагональные элементы равны 1 или -1 в зависимости от знака обратной связи; матрицы \mathbf{B} , \mathbf{C} содержат по одному единичному элементу в каждом столбце (каждой строке). Элементы матрицы передач

$$\mathbf{K} = \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B} = \mathbf{CA}^*\mathbf{B} / \det \mathbf{A} \quad (4)$$

– дроби с одинаковыми знаменателями $\det \mathbf{A}$ – отношения целых чисел. Действительно, определитель матрицы – отличное от нуля целое, так как вычисление определителя требует только операции перемножения и сложения, а сама матрица целочисленная. Матрица числителей $\mathbf{CA}^*\mathbf{B}$ также целочисленная, так как элементы присоединенной матрицы \mathbf{A}^* представляют собой алгебраические дополнения элементов транспонированной матрицы.

Легко показать, что элементы матрицы \mathbf{K} , полученные по топологическим формулам (1)–(3) и вычисленные по формуле (4), совпадают, если пути от вершины r до вершины q имеют единичную передачу. Следовательно, для их получения можно использовать как топологический анализ графов, так и матричные операции. Матрица \mathbf{K} в среде MATLAB вычисляется так:

$$\det(\mathbf{A})$$

$$\mathbf{C} * \text{inv}(\mathbf{A}) * \mathbf{B} * \det(\mathbf{A})$$

Пример 1. Матрицы, представляющие граф (рис. 1), имеют вид:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

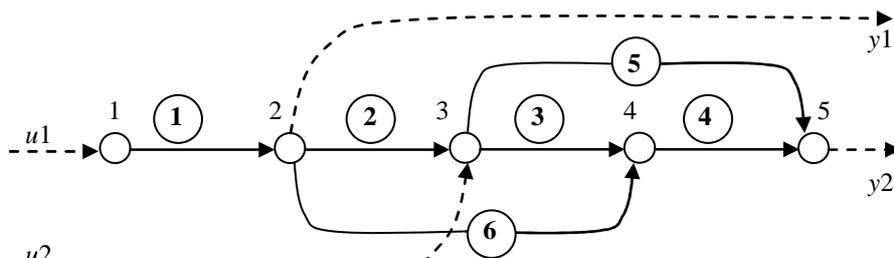


Рис. 1

Определитель треугольной матрицы $\det \mathbf{A} = 1$. Целочисленная матрица передач

$$\mathbf{K} = \mathbf{CA}^{-1}\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 3 & 2 \end{bmatrix}.$$

Между входом 1 и выходом 1 имеется путь; нет пути между входом 2 и выходом 1; от входа 1 до выхода 2 имеется 3 пути; число путей от входа 2 до выхода 2 равно 2. Выход 1 не годится для диагностирования входа 2, так как элемент (1, 2) равен 0. Так как элемент (2, 1) равен 3, на топологическом уровне можно заключить, что выход 2 наиболее уверенно может диагностировать сигнал неисправности, приложенный к вершине 1.

Условия обнаружения и локализации гармонических сигналов неисправности.

Если линейная модель определена полностью, то при выборе точек измерения следует сравнивать амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) каналов передач с учетом информации об ожидаемом частотном спектре сигнала неисправности Ω . Показателями влияния входов f_r на выходы y_q являются усредненные на множестве частот Ω оценки АЧХ системы $M_{qr}(\omega) = \text{mod } \Phi_{qr}(j\omega)$. Результат в форме матрицы является основой для декомпозиции задачи диагностирования.

Рассмотрим случай, когда оцениваются только амплитуды выходов и не принимаются во внимание их фазы. Локализация источника и идентификация значения его амплитуды сводятся к решению системы уравнений

$$\mathbf{M}\mathbf{f} = \mathbf{a}, \quad (5)$$

где $\mathbf{f} = [0 \dots 0 f_r 0 \dots 0]'$ — искомый вектор амплитуд воздействий; \mathbf{a} — вектор амплитуд реакций; $\mathbf{M} = \text{mod } \mathbf{W}(j\omega_f)$ — матрица значений АЧХ.

Задача выбора точек измерений ставится как упорядочение пар вход-выход с целью приведения матрицы \mathbf{M} к блочно-диагональному виду. Существование решения задачи диагностики в соответствии с теоремой Кронекера—Капелли формулируется так: система (5) совместна тогда и только тогда, когда ранг ее основной матрицы равен рангу ее расширенной матрицы, причем система имеет единственное решение, если ранг равен числу неизвестных, и бесконечное множество решений, если ранг меньше числа неизвестных.

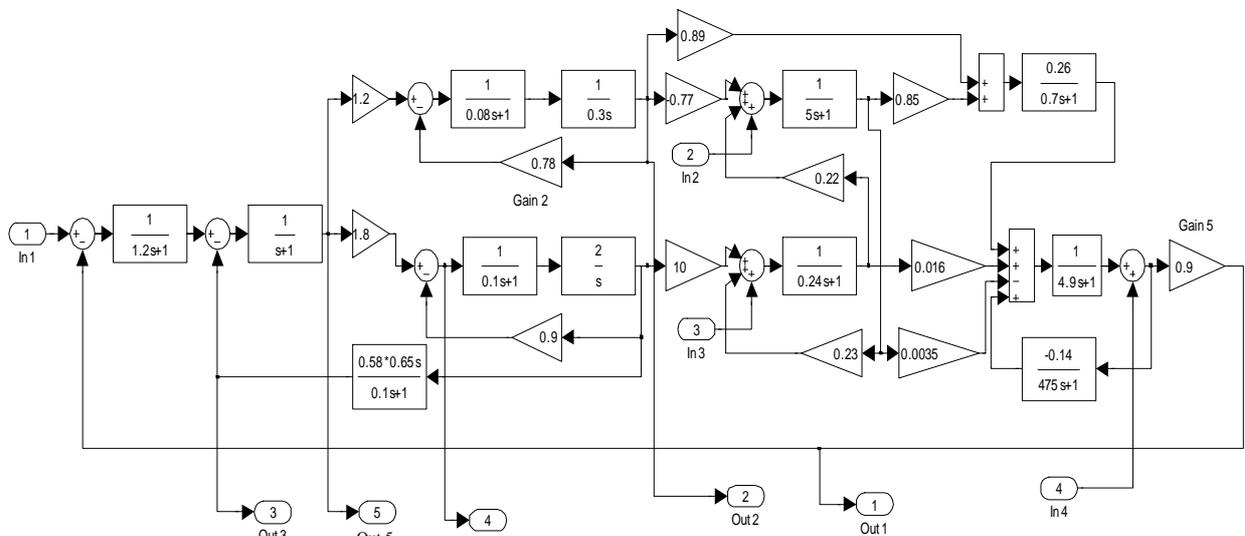


Рис. 2

Пример 2. Исследования проиллюстрируем на примере судовой системы регулирования частоты вращения главного турбозубчатого агрегата (СРЧВ ГТЗА), модель которой изображена на рис. 2. Система имеет $Q=5$ измеряемых выходов и указаны $R=4$ точки входа потенциальных сигналов неисправностей (входы 2 и 3 – вибрации клапанов пара переднего и заднего хода, 4 – турбины).

Для построения частотных характеристик модель на языке Simulink (рис. 2) преобразуется к стандартной форме пространства состояний:

```
[A,B,C,D] = linmod2('gtza_basic');
sys_basic = ss(A,B,C,D),
```

после чего вызывается программа построения диаграмм Бode (ЛАЧХ)

```
bodemag(sys_basic,{0.1,1000}).
```

По виду ЛАЧХ системы (рис. 3) устанавливается диапазон диагностируемых частот – предельные частоты лежат ниже 10 рад/с. По ЛАЧХ выбирается множество пар входо-выходов, для которых решение задачи практически возможно. В частности, такими каналами могут служить (2, 1), (3, 1), (1, 2), (1, 3). Характеристики между входами-выходами (2, 1) и (3, 1), (2, 2) и (3, 2), а также (2, 3) и (3, 3) практически совпадают на всем диапазоне частот.

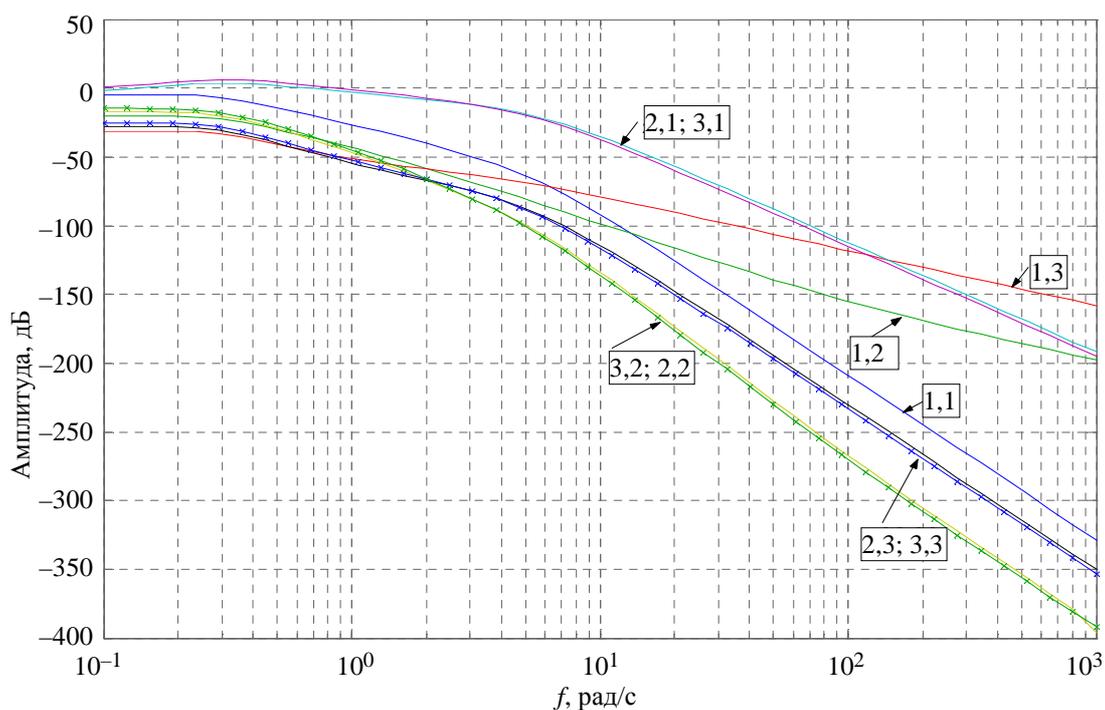


Рис. 3

Пусть к входу $r = 4$ приложено воздействие с частотой $\omega_f = 10$ рад/с. Результаты компьютерной имитации процедуры диагностирования и обработки данных дают значения амплитуд установившихся реакций на выходах:

```
a = [0.9 0.0028 0.006 0.015 0.008] .
```

Матрица усилений системы на частоте $\omega_f = 10$ рад/с вычисляется так:

```
M = abs(freqresp(sys_basic,10)).
```

Результат выводится в коротком формате:

```

0.0000  0.0000  0.0001  0.9000
0.0031  0.0000  0.0000  0.0028
0.0066  0.0000  0.0000  0.0059
0.0175  0.0000  0.0000  0.0158
0.0089  0.0000  0.0000  0.0080

```

Можно заметить, что элементы столбцов 2 и 3 весьма малы, вследствие чего затруднительно диагностирование сигналов неисправностей, приложенных к соответствующим входам. Сигнал входа 1 целесообразно диагностировать на выходе 4, а сигнал 4 – на выходе 1.

Ранг основной матрицы $\text{rank}(M) = 2$ меньше ранга расширенной матрицы $\text{rank}([M \ a]) = 3$. Система уравнений (5) несовместна. Поскольку ранг основной матрицы меньше числа неизвестных, система должна иметь бесконечно много решений. Система (5) переопределена: число уравнений равно 5, число неизвестных – 4, т. е. система (5) не имеет решений в обычном смысле.

Решение переопределенной системы (5) методом псевдообращения дает:

$$f = M \backslash a$$

Warning: Rank deficient, rank = 2 tol = 9.9942e-016.

```

-0.0308
  0
  0
  1.0000

```

Знак амплитуды сигнала на первом входе отрицателен, значит, это ошибка вычислений. Число обусловленности матрицы огромно: $\text{cond}(M) = 9.8598e+017$. Задача (5) является некорректной.

Регуляризация некорректно поставленных задач диагностики. Некорректно поставленные задачи непосредственно не могут быть решены классическими методами вычислительной математики, так как малые вариации данных могут привести к сколь угодно сильно отличающимся результатам. Для решения некорректных задач А. Н. Тихоновым был предложен метод регуляризации [6]. Рассмотрим 2 варианта метода.

1. Вместо исходной задачи (5) решается задача

$$(M' M + \alpha I) f = M' a,$$

причем для любого положительного параметра регуляризации $\alpha > 0$ задача оказывается устойчивой. Регуляризованное решение при выборе параметра регуляризации $\alpha = 0.03$:

```

f = (M'*M+0.03*eye(4))\ (M'*a)
  0.0000
  0.0000
  0.0001
  0.9643

```

ближе к действительности.

2. Явный итерационный вариант метода регуляризации А. Н. Тихонова представляет собой матричное разностное уравнение

$$\mathbf{f}_k = \mathbf{f}_{k-1} - \mu(\mathbf{M}\mathbf{f}_{k-1} - \mathbf{a}); \mathbf{f}_0, k = 0, 1, \dots; \mu > 0,$$

где \mathbf{f}_0 – начальное приближение, которое примем равным нулю, полагая, что о решении нет никакой априорной информации. Здесь подразумевается обычное решение, поэтому предварительно симметризуем матрицу

$$\mathbf{f}_k = \mathbf{f}_{k-1} - \mu(\mathbf{M}'\mathbf{M}\mathbf{f}_{k-1} - \mathbf{M}'\mathbf{a}); \mathbf{f}_0, k = 0, 1, \dots; \mu > 0.$$

Параметр регуляризации не обязательно мал и выбирается из условия

$$0 < \mu \leq 2 / \|\mathbf{M}'\mathbf{M}^2\| = 3.0464.$$

Выберем $\mu = 1$ и выполним несколько итераций, результаты которых сведены в столбцы:

0.0004	0.0004	0.0004	0.0004
0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
0.8103	0.9640	0.9932	0.9988

Неплохой результат получен уже на 3-й итерации, после 6-й итерации результат не улучшается.

Подведем итоги. Первоочередная задача проектирования систем технической диагностики – выбор точек измерения – означает разбиение множества непосредственно измеряемых переменных на подмножества, которые предназначаются для диагностирования определенных групп неисправностей. Задача решается путем анализа достижимости и связности моделей объектов диагностирования топологического и структурного рангов неопределенности. Соблюдение необходимых условий локализации неисправностей обеспечивается ранговым анализом матриц передач полностью определенных моделей параметрического ранга.

Задачи диагностики являются некорректно поставленными. Для успешного решения задач локализации и идентификации сигналов неисправности необходимо использовать методы регуляризации.

Результаты исследований, касающиеся задач диагностирования систем управления сложными технологическими процессами, применимы к любым техническим системам, структурированные модели которых представлены в виде ориентированной взаимосвязи компонентов направленного действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Diagnosis and Fault-Tolerant Control / M. Blanke, M. Kinnaert, M. Staroswiecki, J. Schröder. NY, NJ: Springer-Verlag, 2004.
2. Isermann R. Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. NY: Springer-Verlag, 2006.
3. Алексеев А. А., Кораблев Ю. А., Шестопалов М. Ю. Идентификация и диагностика систем. М.: Издательский центр «Академия», 2009.

4. Структурный анализ в задачах диагностики сложных систем / Д. Х. Имаев, Л. Б. Пошехонов, И. В. Шевцов, М. Ю. Шестопалов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 9. С. 65–72.
5. Вавилов А. А., Имаев Д. Х. Машинные методы расчета систем управления. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981.
6. Тихонов А. Н., Арсенин В. Я. Методы решения некорректных задач. М.: Наука, 1979.

D. H. Imaev, M. Y. Shestopalov

TOPOLOGICAL AND MATRIX LOCATION CONDITIONS OF CONTROL SYSTEMS ERROR

Are determined localization terms of signal error in diagnosis control systems processes, models of which are presented in the form of signal graphs and block diagrams. On the example of marine turbine control system is illustrated ill-posedness of localization problems and error signals identification, as well as solution regularization methods.

Diagnosis processes, control system, error model, signal graphs, frequency characteristic, matrix rank, condition number, normalization

УДК 681.518.5+681.5

Д. Х. Имаев, М. Ю. Шестопалов

МЕТОДЫ ТЕОРИИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ ПРОЦЕССОВ УПРАВЛЕНИЯ

Для обоснованного выбора структур информационных связей в системах технической диагностики процессов управления целесообразно оценивать чувствительности характеристик объектов к вариациям компонентов. Рассматриваются задачи диагностирования неисправностей систем управления, модели которых представлены в виде сигнальных графов. На примере системы управления судового турбоагрегата иллюстрируются методы вычисления функций чувствительности и дается их интерпретация.

Диагностика процессов управления, модель неисправности, сигнальный граф, определитель графа, частотная характеристика, функция чувствительности

Ужесточение требований к эффективности небезопасных технологий и качеству продукции, повышение уровня интеграции систем контроля и управления, широкое распространение дорогостоящих систем мехатроники и другие сопутствующие факторы обуславливают актуальность развития средств мониторинга и диагностики систем управления [1]–[3]. В последние десятилетия техническая диагностика не ограничивается пассивной ролью обнаружения и локализации неисправностей. Она расширяет область исследований, включая в нее активную функцию создания так называемых толерантных систем управления FTCS (англ. Fault-Tolerant Control Systems), сохраняющих работоспособность в случае возникновения неисправностей [2], [3]. В связи с этим возникает ряд новых задач проектирования систем технической диагностики. К ним относится формирование структур информационных связей и исполнительных подсистем диагностики, что, в свою очередь, требует: 1 – упорядочения неисправностей по степени их влияния на динамику систем; 2 – выбора точек измерения, обеспечивающих условия диагностирования; 3 – выбора подсистем и связей, подстройка и реконфигурация которых обеспечивает толерантность к тем или иным неисправностям. Для их решения далее предлагаются методы теории чувствительности [4]–[7], позволяющие количественно оценивать роль неисправностей и характер информации о диагностируемой системе.

Причинно-следственные модели диагностируемых систем представляются в форме сигнальных графов или структурных схем, дугам или звеньям которых ставятся в соответствие линейные стационарные операторы. Неисправности интерпретируются: 1 – как воздействия среды функционирования объекта диагностирования в виде сигналов («сигнальные» неисправности) или 2 – в виде вариаций параметров и структур операторов элементов системы, а также вариаций, учет которых требует изменения топологии модели («системные» неисправности). Диагностические модели в виде ориентированных графов и методы упорядочения диагностических показателей предлагались в работе [8]. Структурные условия диагностирования сложных систем, модели которых представлены в форме сигнальных графов или структурных схем, обсуждаются в [9].

Влияние параметров на свойства систем управления оценивается с помощью *функций чувствительности* [5]–[7], [10], которые могут применяться и для выбора структур информационных связей систем технической диагностики (СТД). Обратим внимание на принципиальное отличие требований проектирования СТД от требований к системам управления. Свойства систем управления должны быть малочувствительны к вариациям подсистем – система управления должна быть *грубой*. Для систем диагностики, напротив, важно, чтобы данные измерений были в достаточной мере *чувствительны* к неисправностям. Функции чувствительности количественно оценивают влияние *малых* изменений характеристик элементов на свойства системы. Во многих случаях важно обнаружение именно малых вариаций, свидетельствующих о зарождении нежелательных явлений, приводящих при дальнейшем развитии к неисправности и отказам элементов и, возможно, к авариям системы. При допущении о малых отклонениях переменных от положений равновесия анализ чувствительности можно проводить по *линеаризованным* моделям. Это позволяет привлечь для анализа чувствительности и синтеза малочувствительных систем мощные методы линейной теории систем и развитые инструментальные средства.

Рассмотрим отдельно задачи анализа чувствительности собственно систем M_S и систем со связями со средой $M_{YSF} = \langle M_{YS}, M_S, M_{SF} \rangle$ [10]. Вариации модели M_S влияют на устойчивость и характер переходных процессов. По моделям M_{YSF} оценивают чувствительность каналов передач систем – влияние звеньев, путей и контуров систем на условия инвариантности систем к возмущениям и ковариантности с воспроизводимыми сигналами задания.

Функции чувствительности передач. Абсолютная чувствительность передаточной функции системы $\Phi(s)$ к вариации передаточной функции звена $W(s)$ определяется как частная производная

$$T_W^\Phi = \partial\Phi(W) / \partial W$$

и позволяет в первом приближении найти вариацию передаточной функции системы по известной вариации передаточной функции звена:

$$\delta\Phi(s) \approx T_W^\Phi(s)\delta W(s).$$

Относительная (логарифмическая) чувствительность S_W^Φ отражает связь между относительными вариациями передаточных функций или частотных характеристик:

$$\frac{\delta\Phi}{\Phi} \approx S_W^\Phi \frac{\delta W}{W}.$$

Свойства динамических систем зависят от частоты сигналов – на различных диапазонах частот элементы и связи между ними по-разному влияют на свойства системы в целом. Следовательно, функции чувствительности необходимо рассматривать в *частотной* области. Функции чувствительности (ФЧ) – рациональные функции комплексного аргумента s . Говоря о количественной оценке чувствительности, имеют в виду модуль ФЧ. Если вместо s подставить $j\omega$, то по ФЧ можно найти малые вариации амплитудных частотных характеристик.

Вычисление ФЧ передач. Диполь чувствительности. Абсолютная ФЧ передачи Φ_{qr} к неструктурированным вариациям дуги (a, b) равна произведению двух передач графа – от конца дуги до вершины выхода графа и от входной вершины графа до начала дуги [4], [10]:

$$T_{ab}^{qr} = \Phi_{qa} \Phi_{br}.$$

Модули абсолютной ФЧ позволяют ранжировать дуги графа системы по их влиянию на свойства выбранной передачи.

Относительные ФЧ передач графа системы к дуге S_{qr}^{ab} могут быть вычислены как передаточные функции некоторой преобразованной системы. Преобразования сводятся к введению в графы единичных дуг, так называемых *диполей чувствительности* [6], [7]. Пусть в графе имеется единственный путь. Дуга находится в позиции 1, если принадлежит пути. Дуга находится в позиции 2, если принадлежит контурам, касающимся пути, но в путь не входит. Наконец, позиция 3 соответствует ситуации, когда дуга входит в контуры, не касающиеся пути. Вложение диполя чувствительности в дугу означает последовательное соединение, другими словами, подразбиение варьлируемой дуги. Положение диполя чувствительности в графе зависит от *позиции* варьлируемой дуги. Если варьлируемая дуга находится в позиции 1, то ФЧ равна передаточной функции графа от вершины-входа диполя чувствительности, вложенного в варьлируемую дугу, до его вершины-выхода.

Приближенное вычисление ФЧ передач. Относительную ФЧ можно найти приближенным численным методом [11]. Относительная ФЧ как частная производная определяется как предел отношения приращений

$$S_{ab}^{qr}(j\omega) = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi(j\omega)/\Phi(j\omega)}{\Delta W_{ab}(j\omega)/W_{ab}(j\omega)} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\Delta\Phi(j\omega)}{\delta \cdot \Phi(j\omega)},$$

где $\Delta W_{ab} = (1 + \delta)W_{ab}$. Если выбрать малое конечное значение δ , то можно вычислить приращение частотной характеристики передачи на данной частоте $\Delta\Phi(j\omega)$ и составить отношение приращений, равное приближенному значению ФЧ:

$$S_{ab}^{qr}(j\omega) \cong \frac{\Delta\Phi(j\omega)}{\delta \cdot \Phi(j\omega)}. \quad (1)$$

Процедура вычислений такова: подразбиением исследуемой дуги вводится диполь чувствительности с усилением $1 + \delta$ и вычисляются значения частотной характеристики по выбранной паре вход-выход $\Phi_{qr}(j\omega)$ для $\delta=0$ и новое значение $\Phi_{qr}(j\omega) + \Delta\Phi(j\omega)$ для $\delta \ll 1$. Далее выполняется операция, реализующая формулу (1). Вычисления проводятся для конкретной частоты и, при необходимости, повторяются для других частот исследуемого диапазона. Численный метод особенно важен, если исследуемое звено занимает не позиции 1 и 2, а иные позиции, для которых нет простых правил вычисления ФЧ.

Пример анализа чувствительности передач системы регулирования частоты вращения судового турбоагрегата. На рис. 1 приведена линейная модель системы gtza_basic.mdl на языке Simulink. Пусть необходимо оценить влияние вариаций звена Gain 5 с усилением 0.9 на характеристики канала (1, 4) – от выхода турбины до выхода системы для различных частот. Исследуемое звено занимает позицию 1 по отношению к каналу передачи. Особенностью структурных схем является то, что дуги связи представляют собой диполи чувствительности. Введем сумматор и вход 5, который будет входом прямого диполя чувствительности; выходом диполя окажется выход 1 системы.

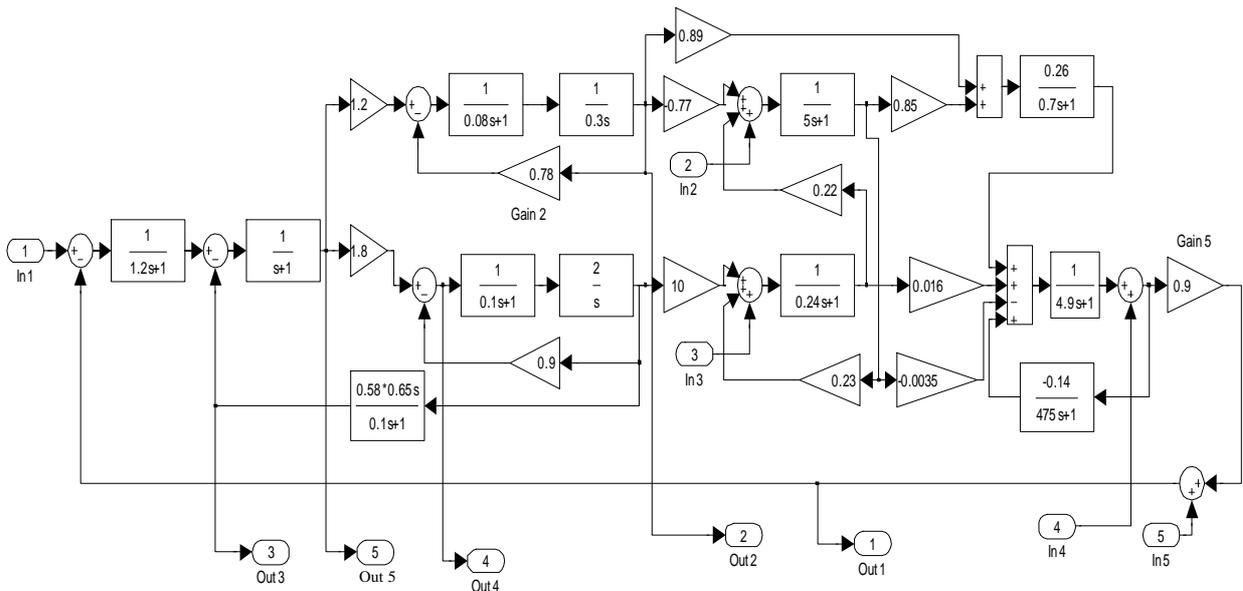


Рис. 1

Чувствительность на нулевой частоте. Вначале вычислим значение ФЧ передачи на нулевой частоте (по постоянному сигналу). Преобразуем модель к форме пространства состояний

```
[A,B,C,D] = linmod2('gtza_basic');
```

и вычислим усиление системы с входа диполя чувствительности до его выхода

```
S41 = dcgain(A,B,C,D) % Усиление по постоянному сигналу  
0.4706
```

Модуль относительной ФЧ передачи определяет, на сколько процентов изменится усиление передачи системы на выбранной частоте, если усиление звена изменилось на 1 %. Следовательно, изменение усиления звена Gain 5 на 1 % приводит к изменению усиления канала на 0.47 %. Вычислим то же значение ФЧ приближенным численным методом. Усиление номинальной системы

```
g41 = dcgain(A,B,C,D);
```

изменим усиление звена на величину $(1 + \delta)$; выберем $\delta = 0.01$ и вычислим усиление варьированной системы

```
g41v = dcgain(A,B,C,D);
```

после этого вычислим относительную ФЧ по формуле (1)

```
S41 = (g41v-g41)/delta/g41  
0.4681
```

Результаты достаточно близки и сближаются с уменьшением вариации звена.

Вывод: чувствительность канала к вариациям звена достаточна для выявления вариаций звена Gain 5 по данным измерений усиления канала (4, 1).

Чувствительность канала (4, 1) к вариациям звена Gain 2 с номинальным усилением 0.78 равна 0.0294. Это значение ФЧ мало; можно сделать вывод о том, что не удастся успешно диагностировать изменения данного звена. Если неисправности звена критичны, то следует искать другие точки измерений.

Выберем вход 2 и выход 2 (см. рис. 1) и вычислим значение ФЧ к звену Gain 2. Результат -0.4460 свидетельствует о том, что данные об изменениях свойств канала (2, 2) вполне могут служить для целей диагностирования вариаций усиления звена Gain 2.

Зависимость ФЧ канала от частоты. Вычислим ФЧ канала передачи (4–1) к вариациям звена Gain 5 по методу включения прямого диполя чувствительности:

```
B5 = B(:,5);  
C1 = C(1,:);  
D51 = D(1,5);  
sys51 = ss(A,B5,C1,D51);  
bodemag(sys51)
```

График модуля ЧХ ФЧ в логарифмическом масштабе приведен на рис. 2. На малых частотах значение ФЧ в децибелах совпадает с ранее вычисленным значением для нулевой частоты

$$20 \cdot \log_{10}(0.47)$$

$$-6.5580$$

Можно сделать вывод о том, что канал передачи целесообразно использовать для диагностирования изменений звена на всех частотах, а на частотах выше 1 рад/с чувствительность вдвое выше (на 6 дБ).

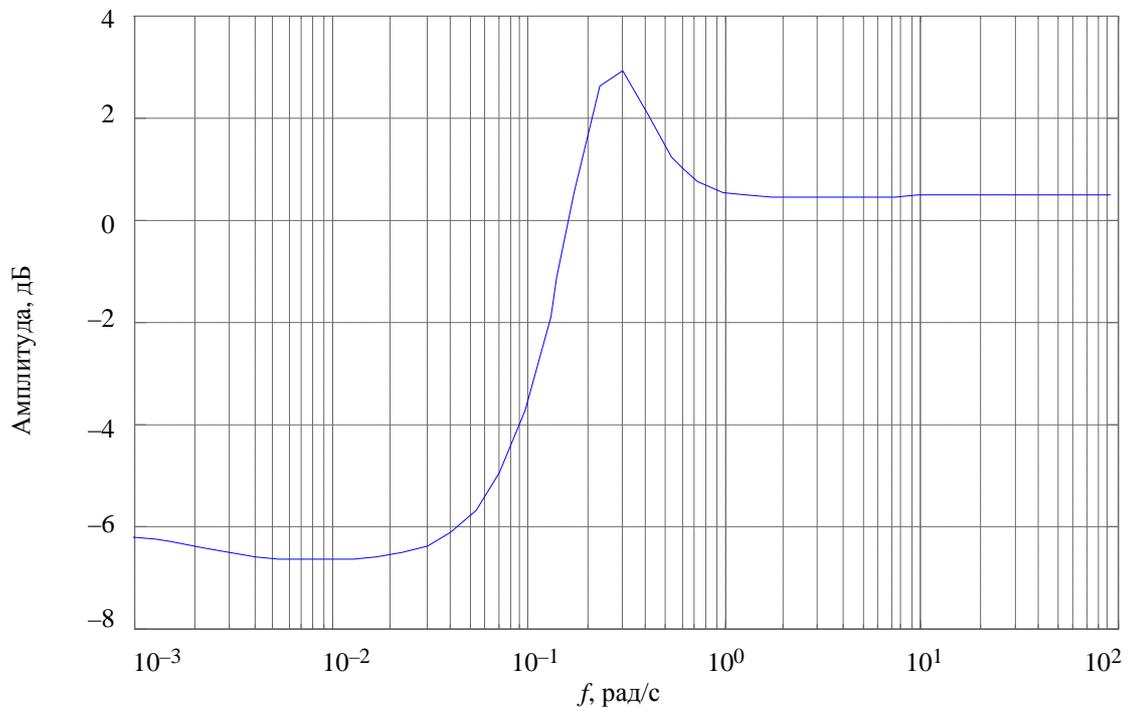


Рис. 2

Проиллюстрируем процедуру вычисления ФЧ в зависимости от частоты приближенным численным методом при малых вариациях звена Gain 2. Для этого достаточно повторить команды для вычисления модуля ФЧ:

```
d = 0;
[A,B,C,D] = linmod2('gtza_basic');
B2 = B(:,2); C2 = C(2,:); D22=D(2,2);
sys = ss(A,B2,C2,D22);
d=0.01;
[A,B,C,D] = linmod2('gtza_basic');
B2 = B(:,2); C2 = C(2,:); D22 = D(2,2);
sysv = ss(A,B2,C2,D22);
s = (sysv-sys)/sys/d;
bodemag(s)
```

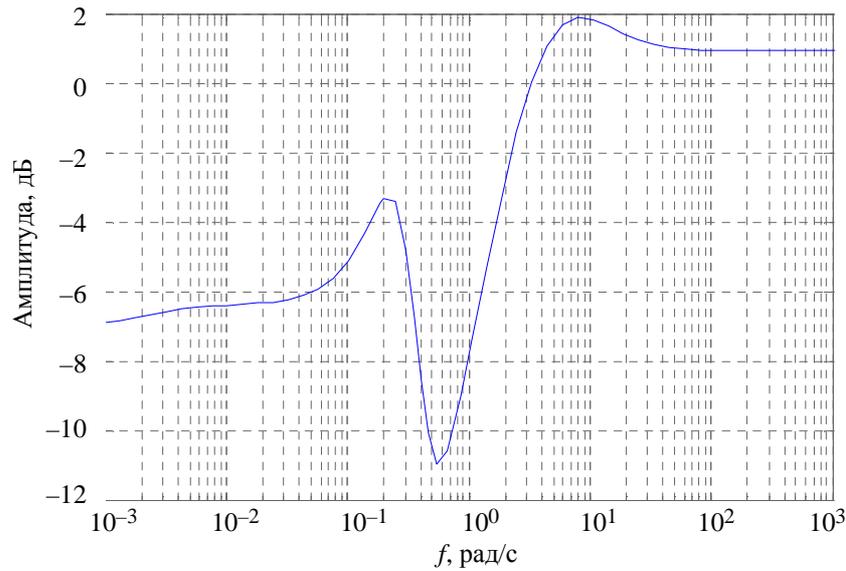


Рис. 3

Результат приведен на рис. 3. На низких частотах значение модуля ФЧ примерно совпадает со значением, вычисленным для постоянного сигнала (в децибелах):

$$20 \cdot \log_{10}(\text{abs}(\text{dcgain}(s))) \\ -7.0135$$

Вывод: данные измерений канала (2, 2) могут быть использованы для обнаружения вариации характеристик звена Gain 2 на всех частотах.

Функции чувствительности определителя графа. Устойчивость и характер собственных движений диагностируемой системы определяются корнями характеристического полинома (собственными значениями матрицы состояний). Традиционно разрабатывались методы анализа чувствительности передач [4]–[7]. Относительно немного работ по анализу чувствительности собственных движений в зависимости от структуры систем [10].

Вариации собственных значений системы удобно оценивать по изменениям определителя сигнального графа

$$\Delta(s) = 1 - \sum_k K_k(s) + \sum_{k,l} K_k(s)K_l(s) - \dots \quad (2)$$

Выражение (2) линейно зависит от передач контуров $K_k(s)$ с учетом отношения их касания, т. е. содержит информацию о топологии контурной части систем с обратными связями. Определитель графа линейно зависит от передачи любой дуги (a, b) , входящей в контур: $\Delta = \Delta_0 + T_{ab}^{\Delta} W_{ab}$. С другой стороны, определитель равен отношению характеристических полиномов замкнутой и полностью разомкнутой систем [10] и, таким образом, характеризует совокупную роль контуров в перемещении корней характеристического полинома системы (собственных значений).

Для анализа роли контуров и дуг наиболее удобной оказывается *комплексно-частотная область*, естественным образом сочетающаяся со структурным подходом. Амплитудно-частотные характеристики контуров представляют собой зависимость

усиления контуров от частоты. Если на частотах, равных модулям некоторых собственных значений подсистем (звеньев), контур или группа контуров системы имеют большое усиление, то собственные значения будут сильно перемещаться в результате замыкания или размыкания этих контуров. И наоборот, если усиление контуров на некоторых частотах мало, то контуры слабо влияют на положение собственных значений подсистем (звеньев).

Вычисление ФЧ определителя графа. Относительная ФЧ определителя к дуге графа

$$S_{ab}^{\Delta} = -\Phi_{ba}W_{ab}$$

равна произведению передаточной функции дуги (a, b) и передаточной функции графа от вершины-конца дуги до вершины-начала [10]. Относительную ФЧ можно вычислять как передаточную функцию Φ_{ca} нового графа, полученного подразбиением дуги (a, b) .

Можно сделать ряд выводов, устанавливающих взаимосвязи относительных ФЧ определителя к дугам и контурам, а также упрощающих алгоритмы их вычисления: 1 – относительные ФЧ определителя к дугам, входящим в одни и те же контуры, совпадают; 2 – если дуга (a, b) входит только в k -й контур, то ФЧ определителя к контуру и дуге совпадают; 3 – если существует дуга (a, b) , входящая только в k -й контур, то ФЧ определителя к контуру S_k^{Δ} равна передаче графа $-\Phi_{ca}$ от конца к началу диполя чувствительности, вложенной в дугу (a, b) . Выводы особенно важны для многоконтурных систем, когда источником неисправности может оказаться подсистема, контур которой является причиной неустойчивости.

Пример анализа чувствительности определителя графа. Рассмотрим пример системы регулирования частоты вращения судового турбоагрегата (см. рис. 1). Пусть следует оценить влияние вариаций звена Gain 2 с усилением 0.78 на определитель графа системы на различных частотах.

Диполем чувствительности в структурных схемах оказывается единичная связь выхода усилителя с сумматором. Вычислим передачу от сумматора до выхода усилителя и построим ЛАЧХ (рис. 4):

```
[A,B,C,D] = linmod2('gtza_basic');
sys_basic = ss(A,B,C,D);
bodemag(sys_basic,{0.01,100})
```

Влияние вариаций звена Gain 2 на собственные значения зависит от модулей собственных значений. До значений частот $\omega \cong 2$ рад/с модуль относительной ФЧ несколько превышает 1 (более 0 дБ); следовательно, изменение усиления звена на 1 % вызовет относительное изменение модуля определителя на этой частоте $\Delta(j\omega)$ несколько более одного процента. Изменения корней, модули которых принадлежат этому диапазону, будут того же порядка. Корни, модули которых принадлежат диапазону частот выше 2 рад/с, изменятся меньше.

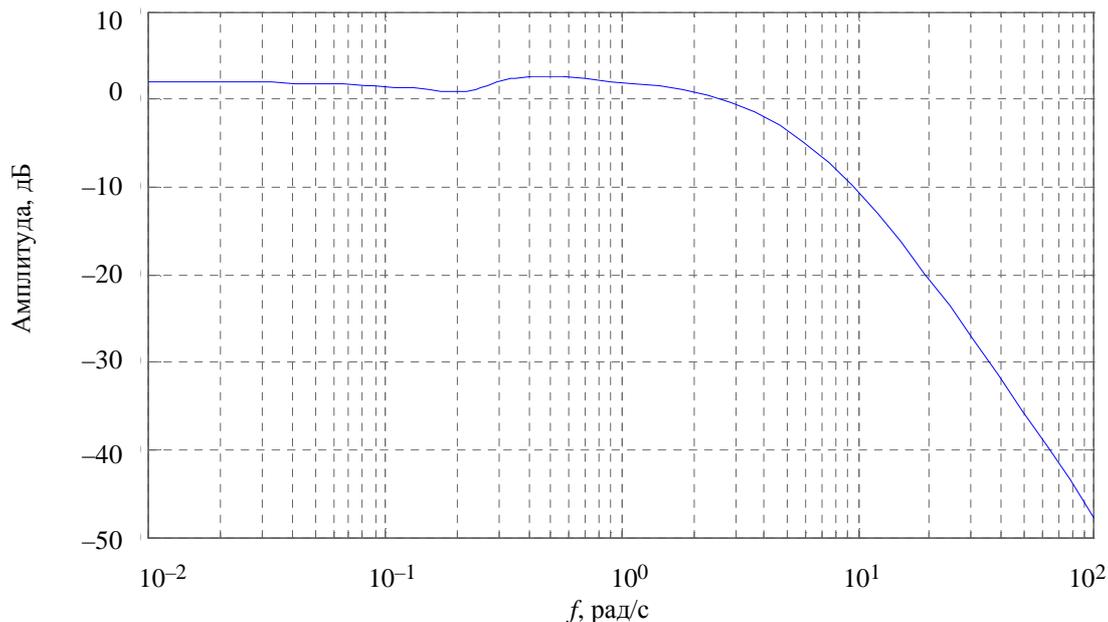


Рис. 4

Подведем итоги. Компоненты и подсистемы диагностируемых систем управления целесообразно упорядочить по степени их влияния на вынужденные и собственные составляющие процессов. Для этого предлагается использовать оценки модулей относительных функций чувствительности передач и определителей графов на различных частотах. Информация, ранжирующая потенциальные неисправности, является основой выбора точек измерений в проектируемой системе технической диагностики. Результаты исследований применимы к техническим системам, структурированные модели которых представлены в виде ориентированной взаимосвязи компонентов направленного действия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев А. А., Кораблев Ю. А., Шестопалов М. Ю. Идентификация и диагностика систем. М.: Издательский центр «Академия», 2009.
2. Diagnosis and Fault-Tolerant Control / M. Blanke, M. Kinnaert, M. Staroswiecki, J. Schröder. NY, NJ: Springer-Verlag, 2004.
3. Isermann R. Fault Diagnosis Systems. An Introduction from Fault Detection to Fault Tolerance. NY: Springer-Verlag, 2006.
4. Быховский М. Л. Основы динамической точности электрических и механических цепей. М.: Изд-во АН СССР, 1958.
5. Розенвассер Е. Н., Юсупов Р. М. Чувствительность систем управления. М.: Наука, 1981.
6. Кокотович П. В. Метод точек чувствительности в исследовании и оптимизации линейных систем управления // Автоматика и телемеханика. 1964. № 12. С. 1670–1676.
7. Седлар М. Диполь чувствительности и метод точек чувствительности // Чувствительность автоматических систем. М.: Наука, 1968. С. 79–84.
8. Мозгалевский А. В., Калявин В. П., Костанди Г. Г. Диагностирование электронных систем/ Под ред. А. В. Мозгалевского. Л.: Судостроение, 1984.
9. Структурный анализ в задачах диагностики сложных систем / Д. Х. Имаев, Л. Б. Пошехонов, И. В. Шевцов, М. Ю. Шестопалов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 9. С. 65–72.

10. Вавилов А. А., Имаев Д. Х. Машинные методы расчета систем управления. Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1981.

11. Имаев Д. Х., Станиславски В. Исследование динамики иерархических систем на примере парогенераторов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011.

D. H. Imaev, M. Y. Shestopalov

SENSITIVITY THEORY METHODS IN CONTROL PROCEDURE TECHNICAL DIAGNOSTICS.

In order to make choice of data connection structures in technical diagnostics systems of control procedure it is reasonable to evaluate sensitivity of objects characteristics to components variations. Are observed diagnosing faults problems of control systems, models of which are presented in the form of signal graphs. On the example of marine turbine control system are illustrated methods for calculating sensitivity functions and are given their integration.

Control procedure diagnostics, fault model, signal graph, graph determinant, frequency characteristics, sensitivity function

УДК 004.056.55

Хо Нгок Зуй, Н. А. Молдовян

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЯЕМЫХ ПОДСТАНОВОЧНО-ПЕРЕСТАНОВОЧНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ СИНТЕЗА БЛОЧНЫХ АЛГОРИТМОВ ШИФРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ЭЛЕМЕНТОВ $F_{4/1}$

Построены управляемые подстановочно-перестановочные сети на основе управляемых элементов $F_{4/1}$, ориентированных на использование в блочных шифрах в качестве операций, зависящих от преобразуемых данных. Определены основные алгебраические и вероятностные характеристики построенных сетей.

Подстановочно-перестановочные сети, скоростные блочные шифры, скоростное шифрование, аппаратная реализация

Управляемые подстановочно-перестановочные сети (УППС) представляют собой чередование активных слоев, состоящих из управляемых элементов (УЭ), и фиксированных перестановок. С увеличением размера УЭ улучшаются криптографические свойства УППС, однако при этом возрастают затраты схемотехнических ресурсов на их реализацию. В работах [1], [2] были проанализированы и исследованы УППС, использующие УЭ $F_{2/1}$ и $F_{2/2}$ в качестве типовых конструктивных узлов. Такого рода УППС применяются в качестве эффективного криптографического примитива при синтезе блочных шифров, ориентированных на эффективную аппаратную реализацию. В программируемых логических СБИС типа FPGA нового поколения (Virtex 5, Virtex 6 и Virtex 7) типовые логические блоки содержат ячейки 64-битовой памяти, что потенциально обеспечивает эффективную аппаратную реализацию УППС, включающих УЭ большего размера по сравнению с ранее использованными УЭ.

В данной статье рассматривается вопрос о построении УППС, использующих в качестве типового узла УЭ $F_{4/1}$, и синтезе на их основе скоростных блочных шифров, ориентированных на реализацию в приборах FPGA нового поколения.

С учетом целей использования УППС в криптографических алгоритмах они должны удовлетворять принципам построения [1], [2]. Комбинируя базовые УЭ $F_{4/1}$ можно синтезировать УППС $F_{n/m}$, где n – число входных (выходных) бит, m – число управляющих бит.

Конкатенация всех управляющих бит образует управляющий вектор V . Управляемые операции, выполняемые с помощью УППС, задают отображение вида $GF(2)^{n+m} \rightarrow GF(2)^n$. Общий вид УППС показан рис. 1.

Слоистая структура УППС с 4^s -битовым входом для данных ($n = 4^s$) имеет управляющий вектор размера $m = sn/4$ бит, где s – количество подстановочных слоев. Топология построения УППС может быть самой различной. При использовании только УЭ $F_{4/1}$ основным принципом коммутации УЭ, принадлежащих трем соседним слоям УППС, является принцип «каждый с каждым». На основе этого принципа достаточно просто синтезировать УППС, осуществляющие отображения вида $GF(2)^{n(s/4+1)} \rightarrow GF(2)^n$. Понятие порядка УППС определяется через понятие порядка перестановочной сети следующим образом.

Определение порядка перестановочной сети [1], [2]. Перестановочная сеть $P_{n/m}$ называется сетью порядка h ($1 \leq h \leq n$), если для произвольного множества индексов i_1, i_2, \dots, i_h и произвольного множества индексов j_1, j_2, \dots, j_h ($i_\alpha \neq i_\beta$ и $j_\alpha \neq j_\beta$ для $\alpha \neq \beta$) существует по крайней мере одно значение управляющего вектора V , которое определяет перестановку бит P_V , перемещающую $x_{i\alpha}$ на $y_{j\alpha}$ для всех $\alpha = 1, 2, \dots, h$.

Определение порядка УППС. Пусть дана УППС типа $F_{n/m}$. Блок $F_{n/m}$ имеет порядок h , если его топология идентична топологии некоторой перестановочной сети порядка h .

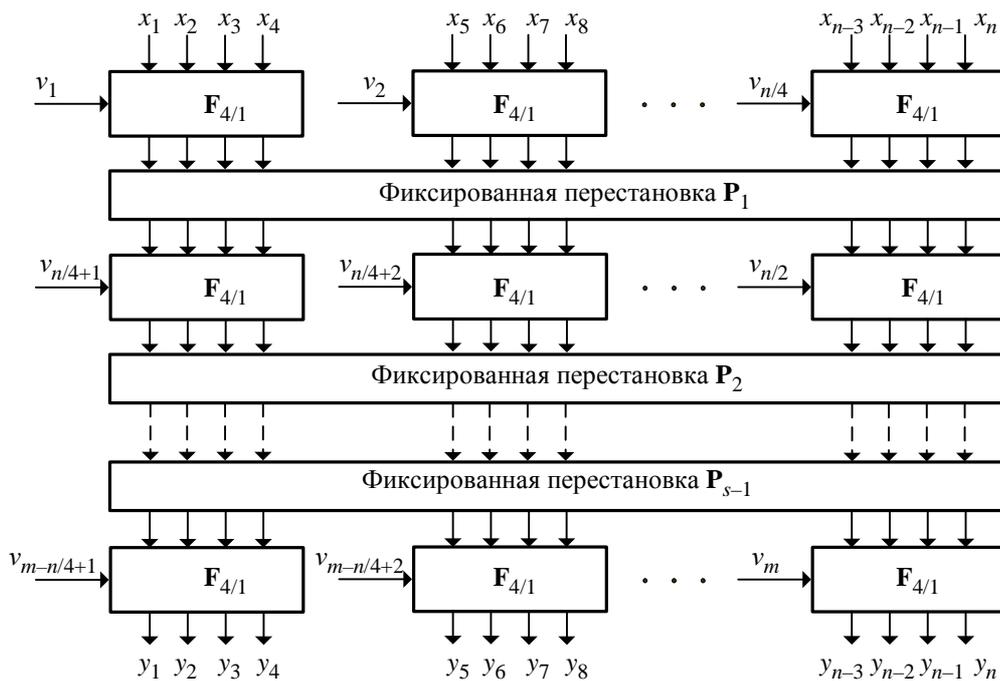


Рис. 1

Очевидно, что $0 \leq h \leq n$, поэтому УППС, для которой $h = n$, называется *сетью максимального порядка*. При значении n , равном натуральной степени числа 4, для реализации УППС порядка h требуется число активных слоев $s = \log_4 nh$.

УППС различного порядка $h = 1, 4, 16, \dots, n/4, n$ строятся с помощью следующих трех рекурсивных схем. На рис. 2 представлена модель построения УППС с рекурсивной структурой, а именно: блоков $F_{4n/4m+n}$ с использованием четырех произвольных УППС $F_{n/m}$ и n дополнительных элементарных блоков $F_{4/1}$. Такую модель условно будем называть рекур-

сивной моделью *первого типа*. Используя на первом шаге первой модели 4 УЭ $F_{4/1}$ в качестве объединяемых блоков $F_{n/m}$ получим следующий ряд синтезируемых УППС первого порядка: $F_{16/8}$, $F_{64/48}$, $F_{256/256}$ и т. д.

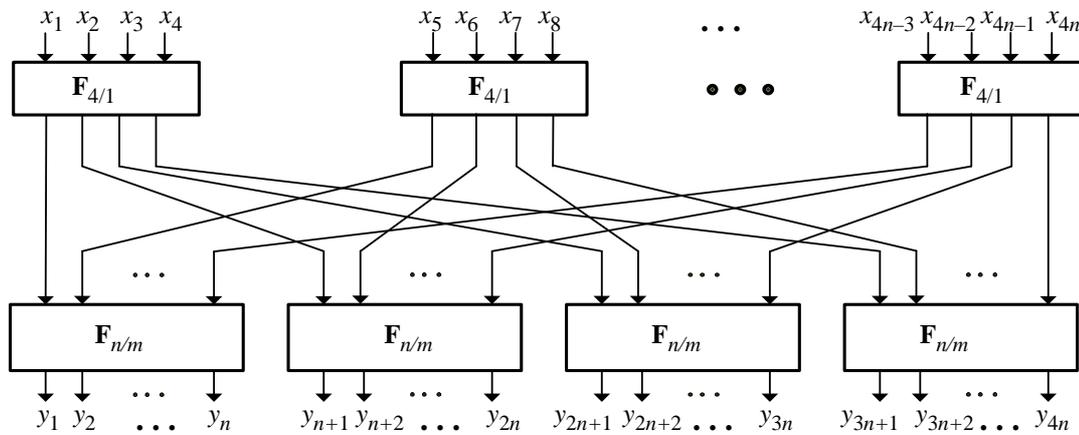


Рис. 2

На рис. 3 представлена рекурсивная модель *второго типа*, которая обеспечивает построение сети $F_{4n/4m+n}^{-1}$ как объединение четырех сетей $F_{n/m}^{-1}$ с помощью дополнительного нижнего активного слоя, где $F_{n/m}^{-1}$ обозначает УППС, являющуюся *обратной* по отношению к сети $F_{n/m}$. Начиная рекурсивное построение второго типа с использования четырех блоков $F_{4/1}^{-1}$ в качестве объединяемых блоков $F_{n/m}^{-1}$, получаем следующий ряд УППС первого порядка: $F_{16/8}^{-1}$, $F_{64/48}^{-1}$, $F_{256/256}^{-1}$ и т. д.

В ряде случаев при синтезе блочных шифров удобно использовать симметричные УППС. При использовании УЭ $F_{4/1}$, являющихся инволюциями (в этом случае $F_{4/1}^{-1} = F_{4/1}$), обе рассмотренные модели рекурсивного построения дают симметричную топологию только для блоков $F_{16/8}$ и $F_{16/8}^{-1}$. Синтез УППС, обладающих симметричной топологией, реализуется рекурсивной моделью *третьего типа*, которая характеризуется объединением четырех исходных блоков $F_{n/m}$ с помощью двух связующих активных слоев (рис. 4), коммутируемых двумя фиксированными перестановками с блоками $F_{n/m}$. Третья модель представляет собой сочетание первых двух моделей.

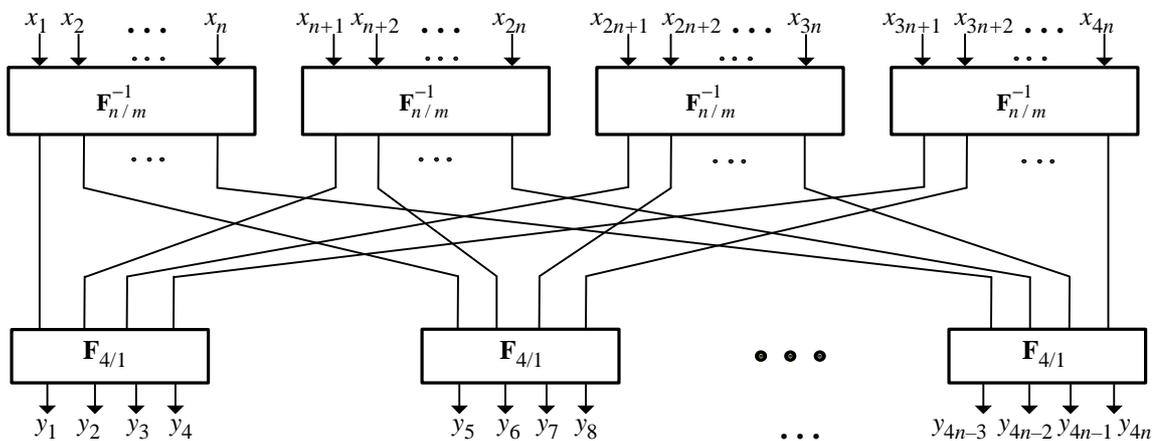


Рис. 3

С третьей моделью рекурсивного построения УППС связано следующее важное утверждение.

Утверждение четырехкратного порядка. Если сети $F_{n/m}$ имеют порядок не ниже значения h ($1 \leq h \leq n$), то шаг рекурсивного построения третьего типа приводит к построению блока $F_{4n/4m+2n}$ порядка не ниже $4h$.

С учетом данного утверждения, используя на первом шаге построения по третьей модели блоки максимального порядка $F_{4/1}$, получаем следующий ряд симметричных УППС максимального порядка: $F_{16/12}$, $F_{64/80}$, $F_{256/448}$ и т. д. Данное утверждение используется также для обоснования способа построения УППС порядков, отличных от первого и максимального, которые обеспечивают минимальное число активных слоев для заданных значений $h = 4^q$ и $n = 4^k$ бит, где q и k – натуральные числа, $k \geq q$.

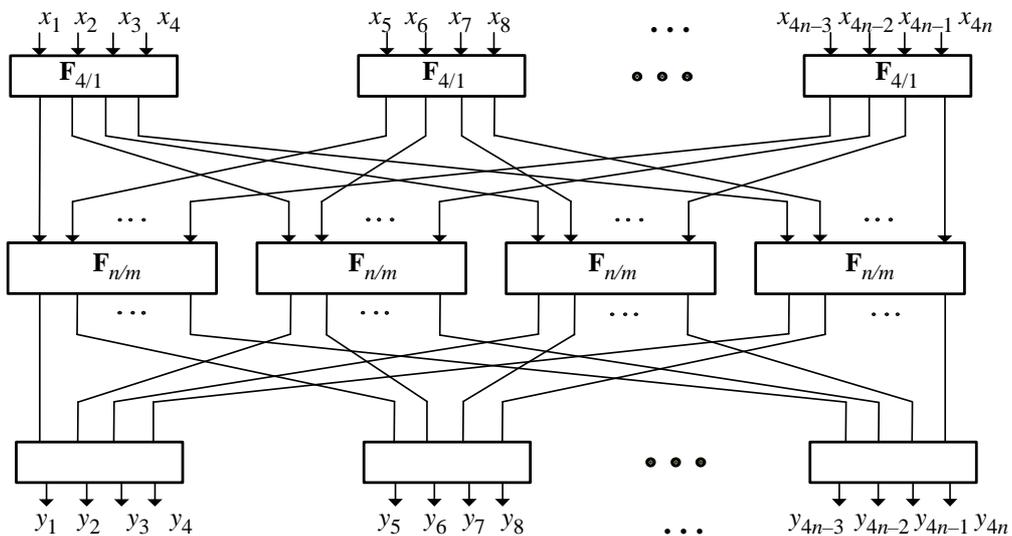


Рис. 4

На основе сочетания трех рассмотренных рекурсивных механизмов легко обосновать построение УППС со значением порядка $h = 1, 4, 16, \dots, n/4, n$, которые требуют использования $s = \log_4 nh$ активных слоев при $h < n$ и $s = 4\log_4 n - 1$ при $h = n$.

В таблице представлены все возможные типы УППС с размером входных данных от 4 до 256 бит, синтезируемые с использованием УЭ $F_{4/1}$.

n	h				
	1	4	16	64	256
4	–	$F_{4/1}$	–	–	–
16	$F_{16/8}$	–	$F_{16/12}$	–	–
64	$F_{64/48}$	$F_{64/64}$	–	$F_{64/80}$	–
256	$F_{256/256}$	$F_{256/320}$	$F_{256/384}$	–	$F_{256/448}$

В результате проведенных исследований определены следующие основные свойства однородных блоков УППС $\mathbf{F}_{n/m}$ слоистого типа, построенных на основе элементарных подстановочных УЭ $\mathbf{F}_{4/1}$ и имеющих топологию, представленную на рис. 1:

1. Для любого блока УППС $\mathbf{F}_{n/m}$, состоящего из s подстановочных слоев, где $s = \log_4 n$, и использующего в качестве основного конструктивного элемента биективный УЭ $\mathbf{F}_{4/1}$, управляющий вектор должен иметь разрядность $m = sn/4$.

2. Если $f_i \in \Psi_n$, где Ψ_n – множество всех БФ, реализующих конкретный вид УППС, то для любого $i = 1, 2, \dots, n$ количество аргументов μ БФ f_i определяется выражением $\mu = (4^s - 1)/3 + n = (4n - 1)/3$.

3. Если в каждом узле УППС $\mathbf{F}_{n/m}$ используется биективный УЭ $\mathbf{F}_{4/1}$, то преобразование $Y = \mathbf{F}_{n/m}(X, V): \text{GF}(2)^{n+m} \rightarrow \text{GF}(2)^n$, где $X, Y \in \text{GF}(2)^n$, $V \in \text{GF}(2)^m$, будет биективным относительно X при фиксированных значениях управляющего вектора V и регулярным относительно множества входных и управляющих векторов.

4. Если $f_i \in \Psi_n$, то при однородной структуре УППС алгебраическая степень нелинейности БФ $\deg(f_i)$ определяется выражениями $\deg(f_i) = 3(3^s - 1)/2 + 1$, если $\deg(f^{\mathbf{F}_{4/1}}) = 4$.

5. Применительно к УППС $\mathbf{F}_{n/m}$ верхнюю границу нелинейности образующих БФ можно найти, учитывая количество аргументов БФ [1], [2]: $\mu = (4^s - 1)/3 + n = (4n - 1)/3$. В этом случае выражение для верхней границы нелинейности будет иметь следующий вид:

$$\text{NL}(\mathbf{F}_{n/m}) \leq 2^{(4n-4)/3} - 2^{(4n-7)/6}.$$

При исследовании стойкости алгоритмов шифрования информации к различным методам криптоанализа используются вероятностные свойства алгоритмов и криптографических примитивов, реализующих данные алгоритмы. В частности, важным показателем является среднее число изменяющихся выходных бит при изменении одного входного бита (лавинный эффект). Для УППС $\mathbf{F}_{n/m}$ различной размерности определим условные вероятности $P(\text{wt}(\Delta y)/\text{wt}(\Delta x) = 1, \text{wt}(\Delta v) = 0)$ появления разностей с различным весом Хэмминга на выходе при единичной входной разности и при нулевой разности на управляющем входе. Получение производящей функции вероятностей появления разности веса $\text{wt}(\Delta y) = 4$, $\text{wt}(\Delta y) = 3$, $\text{wt}(\Delta y) = 2$ и $\text{wt}(\Delta y) = 1$ на выходе элементарного УЭ $\mathbf{F}_{4/1}$ при единичной разности $\text{wt}(\Delta x) = 1$ на входе тривиально. В этом случае будем использовать данные из [3]. Для УЭ $\mathbf{F}_{4/1}$ производящие функции вероятностей имеют вид

$$\mathbf{F}_{4/1}: \Phi_4^{\mathbf{F}_{4/1}}(z) = 0.563z + 0.188z^2 + 0.188z^3 + 0.061z^4.$$

Для УППС, имеющих однородную структуру, итерационно, подстановкой выражений производящих функций с предыдущего слоя УППС в выражение производящей функции следующего слоя, получены производящие функции вероятностей вида $\Phi_n^{\mathbf{F}_{n/m}}(z)$. В качестве примера на рис. 5 представлены распределения вероятностей

$P(wt(\Delta y) / wt(\Delta x) = 1, wt(\Delta v) = 0)$ появления разностей с различным весом Хэмминга на выходе УППС $F_{n/m}$, где $n = 16$ и $m = 8$, в случае, когда на вход данных подается разность веса $wt(\Delta x) = 1$, а на вход управления – разность нулевого веса $wt(\Delta v) = 0$.

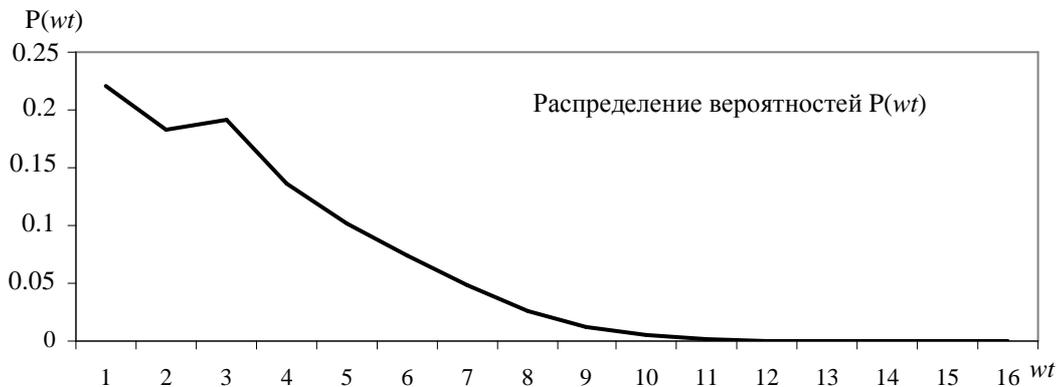


Рис. 5

Таким образом, в данной статье описано построение различных типов УППС с рекурсивной топологией на основе УЭ нового типа. Полученные результаты показывают, что при построении УППС на основе УЭ с 4-битовым входом и УППС на основе УЭ с 2-битовым входом, обладающих одинаковыми значениями порядка, первому типу УППС необходимо в 2 раза меньше активных слоев. Это дает возможность сократить число раундов преобразования при сохранении лавинного свойства алгоритмов, синтезированных на основе этих УППС, упрощает аппаратную реализацию (при конвейерной архитектуре) и повышает скорость шифрования (при итеративной архитектуре реализации). Разнообразие УППС позволяет использовать их для построения шифров, также имеющих различную топологическую структуру. Особый интерес представляет использование новых типов УППС при синтезе шифров, ориентированных на реализацию с использованием приборов FPGA нового поколения. В целом полученные результаты являются дальнейшим развитием концепции управляемых преобразований [1], [2].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moldovyan N. A., Moldovyan A. A., Eremeev M. A. A Class of Data-Dependent Operations // Intern. J. of Network Security. 2006. Vol. 2, № 3. P. 187–204.
2. New Class of Cryptographic Primitives and Cipher Design, for Networks Security / N. A. Moldovyan, A. A. Moldovyan, M. A. Eremeev, N. Sklavos // Intern. J. of Network Security. 2006. Vol. 2, № 2. P. 114–125.
3. Хо Нгок Зуй, Молдовян Н. А., Фахрутдинов Р. Ш. Новый класс управляемых элементов F2/3 для синтеза скоростных блочных шифров // Вопр. защиты информации. 2011. № 1.

Ho Ngoc Duy, N. A. Moldovyan

DEVELOPMENT AND STUDY OF THE CONTROLLED SUBSTITUTION-PERMUTATION NETWORKS BASED ON THE CONTROLLED ELEMENTS F4/1 FOR DESIGNING BLOCK CIPHERS

Using the controlled elements F4/1 there are constructed the controlled substitution-permutation networks oriented for application as data-dependent operations in the design of fast block ciphers. There are investigated the algebraic and probabilistic characteristics of the constructed networks.

Substitution-permutation networks, fast block ciphers, fast encryption, hardware implementation

ОБРАБОТКА И РАСПОЗНАВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ЛИЦ С ПРОБЛЕМАМИ ОСВЕЩЕНИЯ

Обсуждается задача распознавания изображений лиц с проблемами освещения – бликами, тенями и очень низким уровнем яркости. Предлагается решение этой задачи, основанное на процедурах предварительной обработки исходных данных (гамма-коррекция, логарифмирование), фузии спектров изображений в собственном базисе, полученном в рамках 2DPCA/2DKLT. Эксперименты выполнены на базе YaleB.

Распознавание лиц, яркость изображений, блики и тени на изображении, гамма-коррекция, логарифмирование, фузия спектров изображений, двумерный анализ главных компонент

Одной из нерешенных сегодня проблем в практике распознавания изображений с лицами остается динамика освещенности сцены и, как следствие этого, – нестабильность яркости изображений на входе FaReS (Face Recognition System – **FaReS**).

В этих условиях в области лица и фона вокруг него появляются изменения двух типов. Первые можно отнести к «локальным ярко выраженным теням», а вторые – к «глобальным теням». Локальные тени изменяют форму отдельных частей лиц (носа, рта и глаз) и искажают границы области лица, а также границы «волосы/лоб» и «шея/подбородок». Глобальные тени существенно снижают различимость области лиц на общем фоне и/или полностью «закрывают» их. Кроме этих двух типов изменений на области лица существует и третий тип, основной характеристикой которого являются блики на лицах – «не ярко выраженные, но быстро изменяющиеся пятна яркости и распределенных теней». Такие варианты бликов возникают, например, при наблюдениях за быстрым перемещением людей в пространстве с различным освещением и/или временными помехами в освещении. Примеры этого можно также наблюдать, например, на лицах людей, находящихся в движущемся транспорте.

Нестабильность яркости исходной сцены ухудшает работу детекторов лиц (вплоть до полной невозможности их детектирования) и/или приводит к непредсказуемой динамике значений исходных признаков, представляющих область лица. Очевидно также, что эта нестабильность приводит, в свою очередь, к ухудшению результативности работы FaReS. Именно поэтому интерес к проблеме распознавания изображений лиц с проблемами освещения не ослабевает последние 10 лет [1]–[10]. Анализируя эти работы, можно отметить, что методы распознавания изображений лиц с проблемами освещения основаны на нескольких подходах, среди которых можно выделить:

1. Предобработку исходных изображений, включающую процедуры выравнивания яркости (эквализация); уменьшение градиента изменений яркости (гамма-коррекция, логарифмирование) [2], [4], [10], инвариантное (относительно яркости) представление изображений на основе локальных бинарных эталонов (LBP – Local Binary Patterns) [3], [9].

2. Представление информации о лицах в собственных подпространствах (PCA и LDA) или других ортогональных преобразованиях (вейвлет- и cos-преобразования) с исключением компонент яркости из этого представления [2]–[6], [8], [9].

3. Дополнение базы FaReS новыми эталонами, имеющими практически все искажения, связанные с проблемами освещения изображений лиц [1], [5].

Тестирование методов распознавания изображений лиц с проблемами освещения осуществляется обычно в рамках базы «Yale B» [11]. При этом правильной необходимо считать постановку задачи распознавания изображений лиц с проблемами освещения только в том случае, когда база FaReS не дополняется эталонами с глобальными и/или локальными тенями [4], [6] в противовес постановке, определенной в [1], [5], [9].

Следует также отметить, что для представления и обработки изображений лиц в собственных подпространствах в работах [2]–[9] используется метод анализа главных компонент – PCA (Principle Component Analysis).

В работах [4]–[6], [9] используется метод одномерного PCA (1DPCA), а в [2], [8] – метод двумерного PCA (2DPCA). При этом метод 1DPCA, основанный на технологии «eigenfaces», позволяет получить столько главных компонент, сколько имеется эталонов в базе FaReS. Именно поэтому в работах [4]–[6], [9] не представлено полного эксперимента по распознаванию изображений базы «Yale B», поскольку в одном из составов этой базы находится только 38 изображений-эталонов, что является недостаточным для полного эксперимента.

В работах [2], [8] использован «метод 2DPCA», однако проекция в новое пространство признаков выполнена только по одному направлению, что незначительно уменьшает размерность исходного признакового пространства и не использует всех преимуществ этого метода [12]. Поэтому как в случае 1DPCA, так и в случае 2DPCA результативность распознавания в [2], [4]–[6], [8], [9] находилась в диапазоне от 35 до 80 % при довольно непростых методах предобработки исходных изображений.

Целью статьи является представление простого алгоритма распознавания изображений лиц с проблемами освещения – бликами, тенями и очень низким уровнем яркости.

Предлагаемый алгоритм основан на следующих подходах:

- использовании только оригинальных изображений базы «Yale B» и при условии, что база эталонов FaReS не дополняется никакими другими эталонами, а также эталонами с распределенными, локальными и/или глобальными тенями из базы «Yale B»;
- простой предобработке исходных изображений с целью уменьшения градиента изменений яркости (гамма-коррекция и логарифмирование);
- использовании метода 2DPCA/2DKLT с выполнением проекции по двум направлениям (строкам и столбцам [12]);
- использовании механизма совмещения характеристик изображений в случаях низкого уровня их яркости для улучшения их классификации.

Характеристика изображений лиц базы Yale B. База «Yale B» предназначена для исследования методов распознавания изображений лиц с проблемами освещения, однако изображения в ней отличаются не только бликами, тенями и очень низким уровнем яркости, но и разной выделенной областью лиц, их размерами и неточностью положения линии глаз как в отдельных классах, так и внутри класса между составами данных. Эти различия не так заметны визуально, но, учитывая, что они определяют центральную часть

лица, даже небольшие их рассогласования приводят к заметным изменениям представляющих их характеристик. И этот факт надо также учитывать при общей оценке результата распознавания, поскольку он в основном будет связан с проблемами освещения.

В описываемых экспериментах база включает 2452 изображения центральной части лиц (ракурс «анфас») размером 192×168 пикселей для 38 людей. Изображения представлены в шкале GRAY (256 уровней яркости) и сгруппированы в 6 составов: Subset0–Subset5. Изображения состава Subset0 показаны на рис. 1 в порядке увеличения средней яркости: от 71 в минимуме (левое верхнее изображение), до 172 в максимуме – правое нижнее изображение.

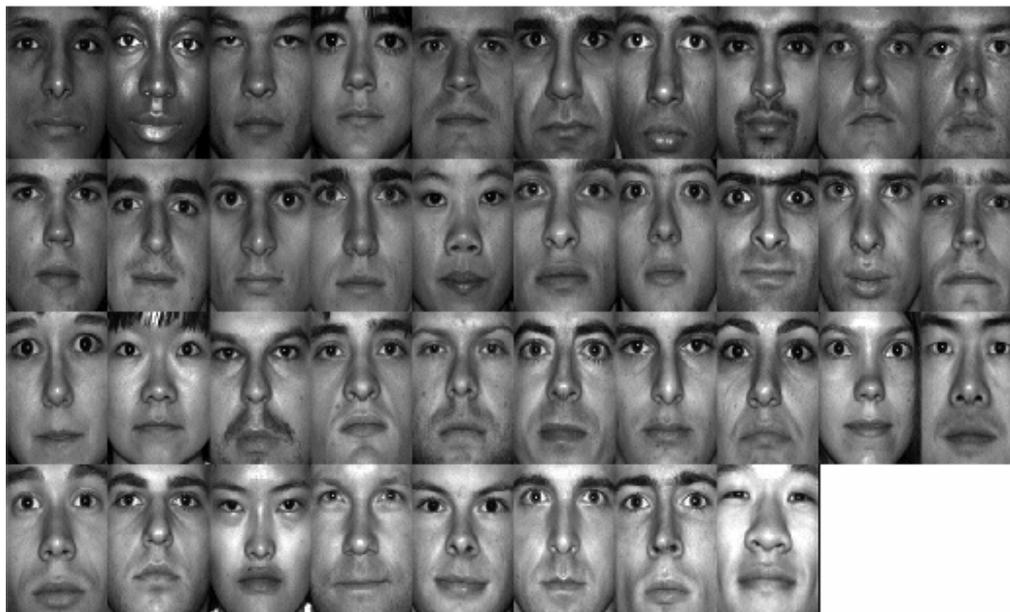


Рис. 1

Видно, что они имеют разную яркость, но не имеют бликов, теней и очень низкого уровня яркости. Примеры изображений составов Subset3–Subset5 для одного и того же лица показаны на рис. 2, где цифрами 3–5 определена принадлежность изображений лиц к соответствующему составу данных.

Составы Subset1–Subset5 получены при моделировании пространственного перемещения источника света, поэтому представляют различные варианты теней – блики (Subset1 и Subset2), локальные тени (Subset3) и боковые тени (Subset4 и Subset5), а также глобальные тени (Subset5), закрывающие практически всю область лица. Наибольшие трудности при распознавании этих изображений вызывают изображения из составов Subset3–Subset5.

Предобработка изображений лиц. Ясно, что если не выравнять яркости тестовых изображений, то результативность их распознавания будет очень низкой. Известно [13], что методы улучшения яркости изображений, показанные на рис. 2, могут быть основаны на использовании процедур гамма-коррекции и логарифмировании каждого пикселя этих изображений. Однако сами эти процедуры, с одной стороны, требуют учета характеристик исходных изображений, например средней и локальной яркости, границ теней, контраста [10], а с другой – не являются суперфинишными операциями, поскольку частично сами искажают формы и характеристики этих изображений.



Рис. 2

На рис. 3 приведены оригинальное изображение на входе FaReS в условиях освещения лица «спереди и сверху» и результат воздействия на него процедур обработки – гамма-коррекции и логарифмирования значений его яркости.

Наблюдаемые при этом искажения (появившиеся на лице тени и новые яркие области, потеря контраста, шумы) отчетливо видны на результатах обработки – особенно в сравнении с изображением-оригиналом. Однако на полученных изображениях уже легко выделяются границы областей лиц и их антропометрические параметры. При этом также видно, что гамма-коррекция и процедура логарифмирования исходного изображения «вытягивают» область лица из тени и улучшают конечный результат.

Оригинал	Гамма-корр.	Логарифм	Оригинал	Гамма-корр.	Логарифм

Рис. 3

Пусть I – изображение размера $M \times N$. Тогда процедура гамма-коррекции изображения с целью повышения его яркости реализуется следующим образом:

$$i_G(m, n) = i(m, n)^\gamma, \quad \forall m = 1, 2, \dots, M \text{ и } n = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где $i_G(m, n)$ – пиксель откорректированного изображения; γ – коэффициент степенного преобразования, причем здесь $\gamma \ll 1$. Логарифмирование выполняется в 2 этапа. На первом – все пиксели, имеющие нулевые значения яркости, заменяются на значения «1»:

$$i(m, n) = i(m, n) + 1, \quad \forall i(m, n) \equiv 0. \quad (2)$$

На втором этапе реализуется собственно логарифмирование:

$$i_L(m, n) = \log(i(m, n)), \quad \forall m = 1, 2, \dots, M \text{ и } n = 1, 2, \dots, N, \quad (3)$$

где $i_L(m, n)$ – пиксель после логарифмирования его значения.

Эксперименты. Представленные в статье результаты выполнены в рамках двух групп экспериментов. В первой группе база эталонов FaReS включает в себя только 38 изображений – весь состав Subset0. В этом случае база содержит по одному эталону на класс, а составы Subset1–Subset5 определяют 2414 тестовых изображений, принадлежащих всем 38 классам.

Во второй группе база FaReS содержит 228 изображений состава Subset1 (по 6 изображений на класс), а составы Subset2–Subset5 определяют 2151 тестовое изображение для всех 38 классов. При этом ни в одном выполненном эксперименте база FaReS не дополнялась никакими другими изображениями.

Предлагаемый алгоритм обработки и распознавания изображений базы «Yale B» предусматривает следующие 5 этапов, что отображено схематически на рис. 4:

1. Реализацию 2DPCA [12] на базе эталонов, не подвергнутых предобработке; выбор d главных компонент и соответствующего им базиса собственного преобразования с определением двух матриц проекции F_1 и F_2 размеров $d_1 \times M$ и $N \times d_2$ соответственно (здесь $d_1 \ll M$ и $d_2 \ll N$; $d_1 \neq d_2$ в общем случае).

2. Реализацию 2DKLT [12] для базы эталонов с предварительной их обработкой по (1)–(3) и записью результата в базу обработанных эталонов. Заметим, что именно здесь реализуется проекция исходных данных – изображений размером $M \times N$ – в новое пространство признаков, в результате чего получаем их представление спектральными матрицами C размером $d_1 \times d_2 \ll MN$:

$$C = F_1 \tilde{I} F_2, \quad (4)$$

где \tilde{I} – изображение (эталон) после этапа предобработки.

3. Предобработку каждого тестового изображения по варианту (1) или по варианту (1)–(3). Выбор варианта предобработки связан со средней яркостью J тестового изображения. Если значение J меньше некоторого порога P , то выполняются 2 вида предобработки, в противном случае – только вариант (1).

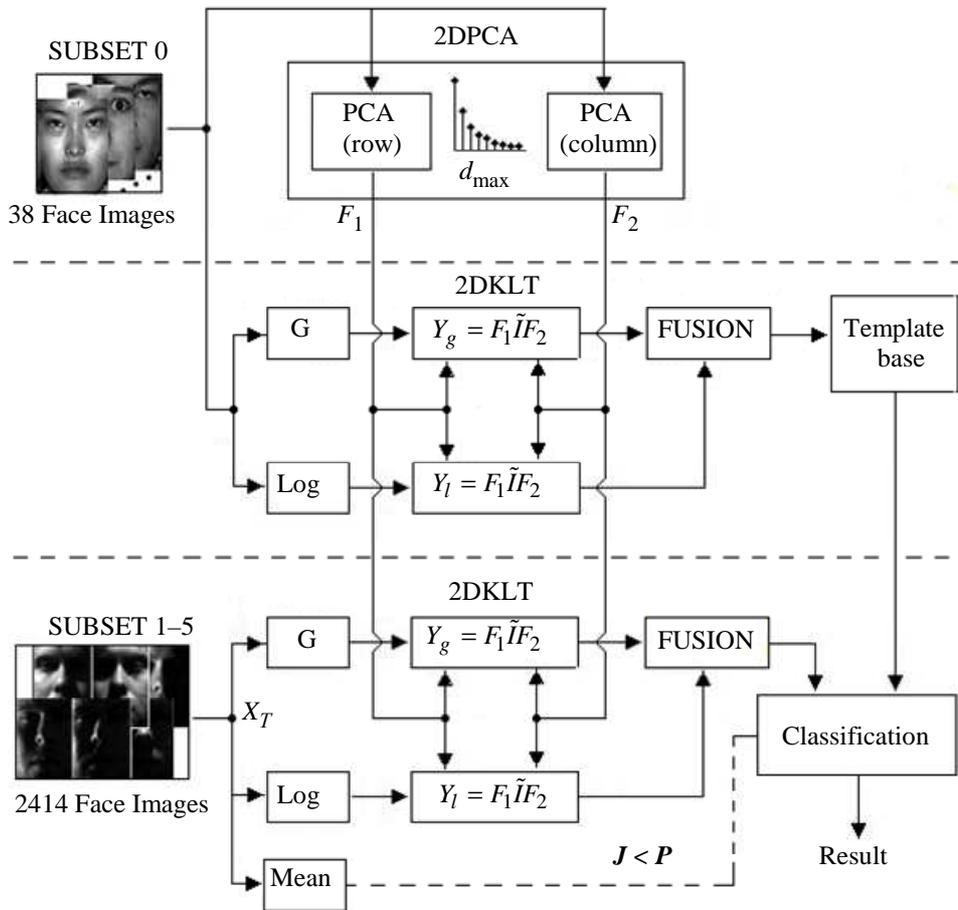


Рис. 4

4. Проекцию результата предобработки с шага 3 в новое пространство признаков на основе 2DKLT, выполняемую аналогично (4). Результат проекции – также получение спектральных матриц (одной или двух) размером $d_1 \times d_2 \ll MN$.

Окончательный результат проекции, выполняемой на этапах 2 и 4, представляется в форме вектора, считанного с верхнего левого угла спектральной матрицы. Число элементов вектора при этом составляет $d(d + 1)/2$, где $d = \min(d_1, d_2)$.

5. Классификацию результата, полученного на этапе 4 при его сравнении с признаками 38 классов из базы обработанных эталонов (на этапе 2). Классификация выполнена по критерию минимума расстояний в метрике L1 (КМР/L1). При этом тестовый образ будет принадлежать тому классу из 38, расстояние до которого будет наименьшим, а результат оценивается по $\text{rank} = 1$.

В процессе классификации для каждого тестового изображения вычисляется среднее значение яркости J . Если $J < P$, то результаты проекции этого изображения с этапа 4 объединяются в один общий вектор и далее выполняется их классификация относительно аналогичных составов признаков, определенных для всех 38 эталонов.

Значение P было получено в ходе решения вариационной задачи и было выбрано равным 50 как обеспечивающее наилучший результат при распознавании 2414 изображений. Модель первой группы экспериментов имеет следующий вид:

$$\text{YaleB}(38/1/2414)\{2\text{DPCA}/\text{G}\&\text{Log}/2\text{DKLT}: 192\times 168\rightarrow d\times d\}\{\Phi+\text{KMP}/\text{L1}/\text{rank}=1\} \quad (5)$$

Модель второй группы экспериментов имеет следующий вид:

$$\text{YaleB}(228/1/2151)\{2\text{DPCA}/\text{G}\&\text{Log}/2\text{DKLT}: 192\times 168\rightarrow d\times d\}\{\Phi+\text{KMP}/\text{L1}/\text{rank}=1\} \quad (6)$$

В (5), (6) приняты следующие обозначения [11]: Yale(38/1/2414) – использована база изображений, состоящая из 38 эталонов (по одному на класс), а число тестовых образов составило 2414; Yale(228/1/2151) – использовано 228 эталонов (6 на каждый класс) и 2151 тестовое изображение; 2DPCA/G&Log/2DKLT – реализован метод двумерного анализа главных компонент, гамма-коррекция/логарифмирование эталонных данных и двумерное преобразование Карунена–Лоэва (на этапе проекции эталонных и тестовых данных); $192\times 168 \rightarrow d \times d$ – представлены размеры исходных изображений и размеры матриц-результатов проекции после редукции размерности пространства признаков; $\Phi+\text{KMP}/\text{L1}/\text{rank} = 1$ – использована процедура объединения признаков (фузия) и классификатор по минимуму расстояния с метрикой L1, а результат оценивается по первому месту (rank = 1).

Динамика процесса и результат классификации тестовых изображений в рамках модели (5) показаны на рис. 5. Здесь 170 изображений из 2414 были классифицированы неверно, поэтому результат составил около 93 %. Вертикальные сплошные линии определяют границы составов данных.

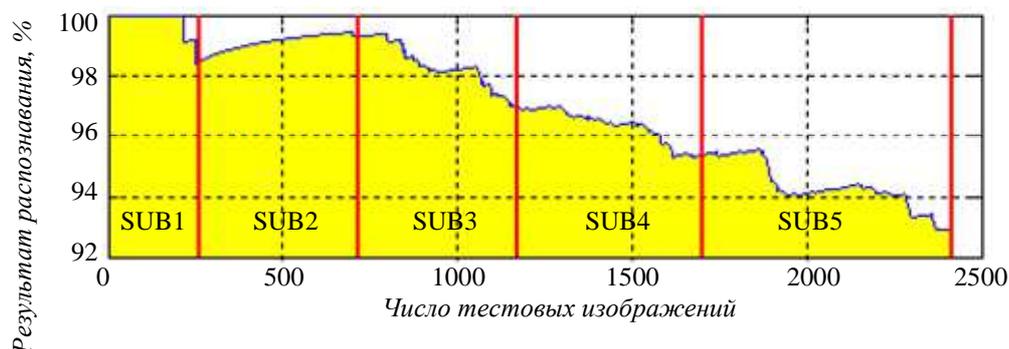


Рис. 5

В табл. 1 приведены результаты классификации тестовых изображений внутри каждого состава. Здесь «начальная компонента» определяет номер, с которого начинается отсчет элементов из левого верхнего угла спектральной матрицы. Для параметра НК = 14 это соответствует фильтрации первых 13 (низкочастотных) компонент спектра. Значения параметров « d » и НК получены при моделировании и исследовании алгоритма классификации в рамках решения соответствующей вариационной задачи.

Таблица 1

Число эталонов – 38 (по одному на класс)						
SUBSET	1	2	3	4	5	Все
Параметр « d »	20	30	49	59	54	–
Начальная компонента (НК)	1	1	1	1	14	–
Число тестовых изображений	263	456	455	526	714	2414
Не распознано изображений	4	1	31	43	91	170
Результат распознавания, %	98.48	99.78	93.19	91.82	87.25	92.96

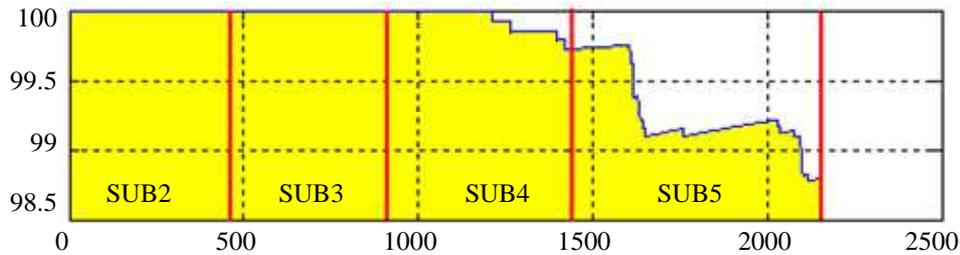


Рис. 6

Процесс и результат классификации (в динамике) тестовых изображений в рамках модели (6) показан на рис. 6.

Для эталонов использован состав SUBSET1. При этом, поскольку классы 16–18 содержат по 6 изображений (а остальные по 7 изображений), то для эталонов использовано только по 6 изображений из каждого класса (всего – 228). В этом эксперименте только 26 изображений из 2151 не были классифицированы. Окончательный результат классификации тестовых изображений составил при этом 98.8 %. В табл. 2 приведены результаты классификации тестовых изображений внутри каждого состава Subset2–Subset5.

Таблица 2

Число эталонов – 228 (по 6 на класс)					
SUBSET	2	3	4	5	Все
Параметр «d»	30	49	59	54	-
Начальная компонента	1	1	1	14	-
Число тестовых изображений	456	455	526	714	2151
Не распознано изображений	0	0	4	22	26
Результат распознавания, %	100	100	99.2	96.9	98.8

Таким образом, показано, что метод 2DPCA\2DKLT в совокупности с процедурами уменьшения градиента яркости исходных изображений, объединением (фузией) признаков по условиям текущей средней яркости, а также фильтрацией первых (низкочастотных) компонент спектра позволяет более эффективно распознавать изображения лиц с проблемами освещения – бликами, тенями и очень низким уровнем яркости.

Приведены точные модели реализованных компьютерных экспериментов, структура соответствующей FaReS, реализуемый ею алгоритм и результаты его тестирования на базе Yale В. Полученные при этом результаты выше, чем показанные в работах [2]–[9], а предложенный алгоритм представляется более понятным и простым в реализации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Terence Sim and Takeo Kanade. Combining Models and Exemplars for Face Recognition: An Illuminating Example // Proc. of Workshop on Models versus Exemplars in Computer Vision, CVPR 2001.
2. Yong Xu and et. Two-dimensional technique for image presentation and its application // Proc. of the Fifth Intern. Conf. on Machine Learning and Cybernetics, Dalian, 13–16 August 2006.
3. Xiaoyang Tan and Bill Triggs. Preprocessing and Feature Sets for Robust Face Recognition // IEEE Computer Society Conference CVPR'2007, 18–23 June 2007, Minneapolis, Minnesota, USA. P. 1–8.
4. Vucini Erald and et. Face recognition under varying illumination // The 15th IC in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision 6 WSCG'2007, Full Papers Proceedings, P. 57–64.
5. Wang Ying-Hui and et. A method of illumination compensation for human face image based on quotient image // Information Sciences. 2008. Vol. 178. P. 2705–2721.
6. Taiping Zhanga and et. Multiscale facial structure representation for face recognition under varying illumination // Pattern Recognition. 2009. № 42. P. 251–258.

7. Raghuraman Gopalan and David Jacobs. Comparing and combining lighting insensitive approaches for face recognition // Computer Vision and Image Understanding. 2010. Vol. 114. P. 135–145.
8. Dilna K. T., Senthilkumar T. D. Quality Index Based Face Recognition under Varying Illumination Conditions // ACC 2011. Part III, CCIS 192. P. 185–192.
9. Face analysis, modeling and recognition systems/ Edited by Tudor Barbu, Published by InTech, September, 2011.
10. Ву Зуи Линь, Кухарев Г. А. Экспресс-метод выравнивания яркости цветных изображений с лицами для систем видеонаблюдения // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 1. С. 24–29.
11. Face data base Yale B. <http://cvc.yale.edu/projects/yalefacesB/yalefacesB.html>.
12. Кухарев Г. А., Щеголева Н. Л. Алгоритмы двумерного анализа главных компонент для задач распознавания изображений лиц // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34, № 4. С. 545–551.
13. Прэтт У. Цифровая обработка изображений. М.: Мир, 1982.

N. L. Schegoleva, G. A. Kukharev

PREPROCESSING AND RECOGNITION FACE IMAGES WITH ILLUMINATION PROBLEMS

Discuss the problem of face recognition images with illumination problems - highlights, shadows, and very low brightness. To solve this problem proposed procedures based on the preprocessing data (gamma correction, logarithm), fusion spectra of the images in the eigen-basis obtained using 2DPCA/2DKLT. The experiments were performed on the basis of YaleB.

Face recognition, image brightness, highlight and shadows in the image, gamma correction, logarithm, fusion spectra of the images, two-dimensional principal component analysis

УДК 004.3'144

A. X. Mursaev

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИСКРЕТНЫХ УСТРОЙСТВ С НАРАСТАЮЩЕЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ

Рассматривается способ описания дискретных устройств для моделирования с учетом задержек компонентов, обеспечивающий обнаружение рисков временных сбоев, и его интерпретация при использовании распространенных языков проектирования аппаратуры – VerilogHDL и VHDL.

Дискретные устройства, моделирование, задержки

Моделирование цифровых устройств с учетом временных характеристик в современных системах проектирования выполняется главным образом на основе метода событийного моделирования. При этом на каждом шаге моделирования вычисляются состояния только тех компонентов, на входах которых в данный момент модельного времени изменился входной сигнал. Такой подход имеет целый ряд преимуществ по сравнению с другими известными [1], [2], и прежде всего существенно сокращаются затраты машинного времени. Изменения сигналов, приводящие к срабатыванию компонентов, называют событиями.

Событийное моделирование базируется на понятии очереди предсказанных событий. Последовательность событий представляется связанным списком. Каждая запись списка содержит идентификатор сигнала, изменение которого порождает это событие, состояние, в которое сигнал переходит, и временную отметку события. События в списке упорядочены по времени наступления. Каждый цикл моделирования содержит следующие действия:

1. Из списка выбирается запись, соответствующая очередному событию. В первом цикле выбирается первая. В дальнейшем выборке подлежит событие, у которого отметка модельного времени является ближайшей большей по сравнению с отметкой времени события, проанализированного на предыдущем цикле. Устанавливается модельное время в соответствии с указателем времени события, а новое значение сигнала, вызвавшего событие, переписывается в поле текущих состояний сигналов.

2. По имени сигнала из структурных таблиц последовательно выбираются компоненты, на входы которых подан изменяющийся сигнал, и для всех этих компонентов выполняется предсказание изменений выходных сигналов в будущие моменты модельного времени. При этом все новые предсказанные события добавляются в список. Отметка времени каждого нового события вычисляется как сумма текущего времени и времени задержки элемента, который генерирует соответствующий сигнал. Каждое новое событие помещается в список вслед за событием в списке, характеризующимся ближайшей меньшей отметкой времени.

3. Если в списке нет событий, предсказанных на время, большее текущего модельного времени, то моделирование прекращается, в противном случае выполняется возврат к п. 1.

При создании тестовых программ для моделирования дискретных устройств с учетом задержек часто опираются на относительно простую модель, так называемую чистую задержку. Другими словами, предполагается, что до истечения времени задержки выход сохраняет предыдущее состояние, после чего принимает значение, соответствующее новому значению изменившегося входа.

В языке VHDL такая модель поведения представляется оператором вида [3], [4]:

$$O \leq S \text{ after } T, \quad (1)$$

где O – выходной сигнал компонента; T – выражение, определяющее принятое в модели время задержки; S – функция, реализуемая компонентом, т. е. значение, которое примет выход компонента по истечении времени задержки после инициирующего события.

Отметим, что инициирующим событием для параллельных присваиваний является изменение любого аргумента функции S , а для последовательных – изменения сигнала из списка чувствительности оператора PROCESS, включающего такое присваивание. Представления в языке Verilog обсуждаются в данной статье далее.

Результат моделирования при использовании модели (1) иллюстрируется рис. 1, а. Здесь Inp – входной сигнал, O_1 и O_2 – выходы компонентов, вход первого из которых соединен с сигналом Inp , а второго – с сигналом O_1 . В примере предполагается, что в текущей ситуации, в том числе комбинации сигналов на других входах, по истечении времени задержки выходы принимают значения, равные значениям изменяющихся входов. Первый компонент срабатывает с задержкой t_{31} , а второй – с задержкой t_{32} . Задержка в последовательной цепочке накапливается.

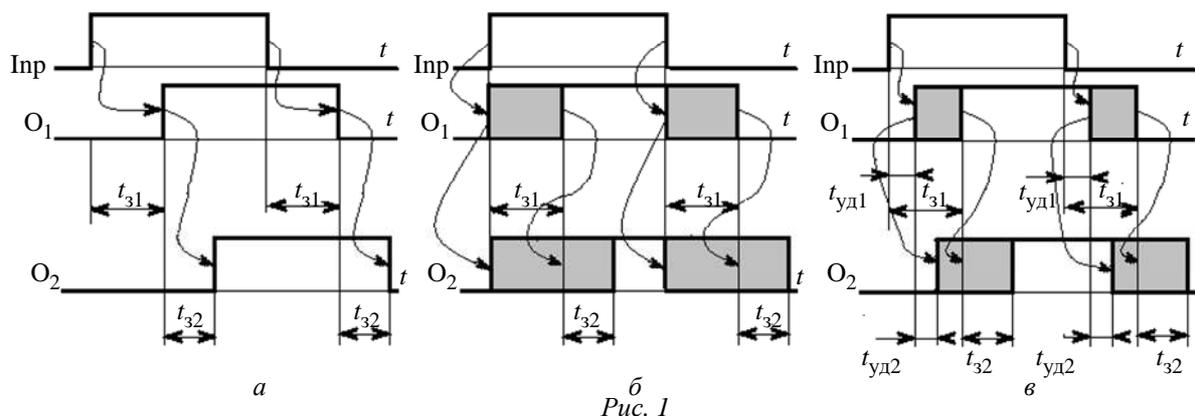


Рис. 1

Однако модель «чистой задержки» не гарантирует выявления состязаний и тем самым может привести к пропуску неисправности или ее ложному обнаружению [1]. Даже если в результате моделирования обнаружено непредусмотренное поведение, иногда

трудно определить, в каком узле устройства возникло рассогласование, например расхождение во времени установления какого-либо сигнала и момента его съема или фиксации значения в соответствующем элементе памяти. Ведь ошибочная фиксация любого из допустимых значений (логического нуля вместо единицы и наоборот) при исполнении моделирующей программы не имеет явных признаков.

Эффективным способом анализа состязаний является моделирование в троичном алфавите. В реальности в некотором интервале между началом изменения входа элемента и установлением окончательного значения выхода элементы-приемники выходного сигнала могут воспринять состояние этого сигнала и как логический ноль, и как единицу. Для представления такой ситуации при моделировании на это время сигналу приписывается «неопределенное состояние». Такой подход позволяет учесть также и то, что в серии изделий, которые будут реализовываться по используемому описанию, задержки элементов могут отличаться – в диапазоне возможных задержек сигналу также приписывается неопределенное состояние. В большинстве систем моделирования при записи тестирующих программ и отображении результатов неопределенное состояние обозначается символом ‘X’.

В моделирующей программе на языке VHDL такое поведение может быть представлено оператором вида

$$O \leq 'X', S \text{ after } T. \quad (2)$$

Здесь O и S – сигналы, представленные данными перечислимого типа, допускающего многозначное представление, или массивами данных такого типа (например, `std_logic` или `std_logic_vector`), а T – максимальное для множества реализаций время задержки.

Результат исполнения таких операторов иллюстрируется временной диаграммой, приведенной на рис 1, б, где затемненная область представляет неопределенное состояние. Отметим следующую особенность процессов, отображенных на рис. 1, б. Выход первого элемента неопределен от моментов изменения его входов в течение интервала, определяемого максимально возможной задержкой. Выход второго элемента может начать изменяться в любое время в интервале между любым изменением выхода первого и моментом времени, определяемым суммой максимальных задержек обоих. Таким образом, происходит «нарастание определенности». Состояние неопределенности легко диагностируется в системах моделирования. Это обозначается специальными символами (и цветом!) на временных диаграммах или обнаруживается операторами проверки (`assert` в VHDL).

Выход элемента после возмущающего воздействия в течение некоторого времени сохраняет прежнее состояние. Этот интервал называют временем удержания; в это время можно снимать достоверную информацию, что используется в ряде приложений. Очевидно, что при использовании модели, представляемой рис. 1, б, может произойти ложное обнаружение ошибки. Оператор, описывающий поведение элемента с учетом конечного времени удержания, может быть записан следующим образом:

$$O \leq 'X' \text{ after } T_{\text{уд}}, S \text{ after } T_3; \quad (3)$$

Здесь $T_{\text{уд}}$ – минимальное время удержания; T_3 – максимальное время задержки.

Результат моделирования пары последовательно соединенных элементов на основе модели (3) иллюстрируется рис. 1, в, где $t_{уд1}$ и $t_{уд2}$ – минимальное на множестве реализаций время удержания первого и второго элементов, а $t_{з1}$ и $t_{з2}$ – максимальное время задержки.

Для примера приведем результат моделирования накапливающего сумматора с последовательным переносом. Программа, описывающая сумматор с учетом задержек на языке VHDL, представлена на рис 2, а полученная при моделировании с помощью программы Modelsim v. 6.4 временная диаграмма – на рис. 3. Модуль генерации входных сигналов здесь не представлен, но его содержимое очевидно из временной диаграммы.

В модели все элементы описаны как последовательные соединения логических безынерционных блоков и элементов задержки (**s_id** – выход идеализированного регистра результата, а **s** – тот же сигнал с учетом задержки; подобно **c_id** и **c** представляют сигналы в цепи переносов, а **s_comb_id** и **s_comb** – сигналы в цепи формирования суммы). Элементы задержки представлены вызовами процедуры `acc_del`, воспроизводящей поведение в соответствии с выражением (3). На временной диаграмме интервалы, в которых значение сигналов нельзя достоверно предсказать, отображены уровнем, лежащим между уровнями нуля и единицы.

```

library ieee;
USE ieee.std_logic_1164.ALL;
entity test_adder is
  port ( clock,reset: in std_logic;
        a: in std_logic_vector(7 downto 0);
        result: out std_logic_vector(7
downto 0);
  end test_adder;
  Architecture tst of test_adder is
  signal clock,reset:std_logic;
  signal s, s_id, s_comb, s_comb_id, c_id, c,
  procedure acc_del(signal u_id:in
std_logic;
                    signal u:out std_logic;
                    constant
del_min,del_max:time) is
  begin      u<= 'X'after
del_min,u_id after del_max;
  end procedure;
  begin
  delay_model:for i in 0 to 7 generate
    acc_del(c_id(i),c(i),1.2 ns, 1.5 ns);
    acc_del(s_id(i),s(i),2.2 ns, 3.5 ns);
  acc_del(s_comb_id(i),s_comb(i),1.2 ns, 1.5
ns);
  end generate;
                    combinat_logic:
                    c_id(0)<=a(0) and s(0);
                    s_comb_id(0)<= a(0) xor s(0);
                    for i in 1 to 7 generate
                    c_id(i)<=(a(i) and s(i)) or (a(i) and
c(i-1)) or (s(i)
                    and c(i-1));
                    s_comb_id(i)<= (a(i) xor s(i)) xor
c(i-1) ;
                    end generate;
                    mem:process (clock,reset)
                    begin if reset='1' then
s_id<="00000000";
                    elsif clock='1' and clock'event
                    then
                    for i in 0 to 7 loop
                    assert (s(i)/='X' )
                    report "carry delay is grater
                    then clock delay"
                    severity error;
                    end loop;
                    s_id<=s_comb;
                    end if;
                    end process;
                    end tst;

```

Рис. 2

Программа на рис. 2 также иллюстрирует встраивание оператора для обнаружения временного рассогласования. Для проверки введен оператор `assert`, который выдает сообщение об ошибке, если в момент появления положительного фронта сигнала записи в регистр результата **clock** информационные входы этого регистра окажутся в неопределенном состоянии.

В языке Verilog (в отличие от VHDL) не определены операторы, непосредственно описывающие сложные временные последовательности. Поэтому присваивания, подобные задаваемым операторами (2) и (3), должны описываться как несколько операторов присваивания, иницируемых общим событием, с указанием относительной задержки исполнения каждого из них. Например, в программе на рис. 3 универсальный элемент моделирования задержки описан как модуль (accum_delay), операторы внутри которого иницируются входным сигналом, причем первое присваивание, задающее неопределенное значение, задержано на время удержания t1, а второе – на время задержки t2.

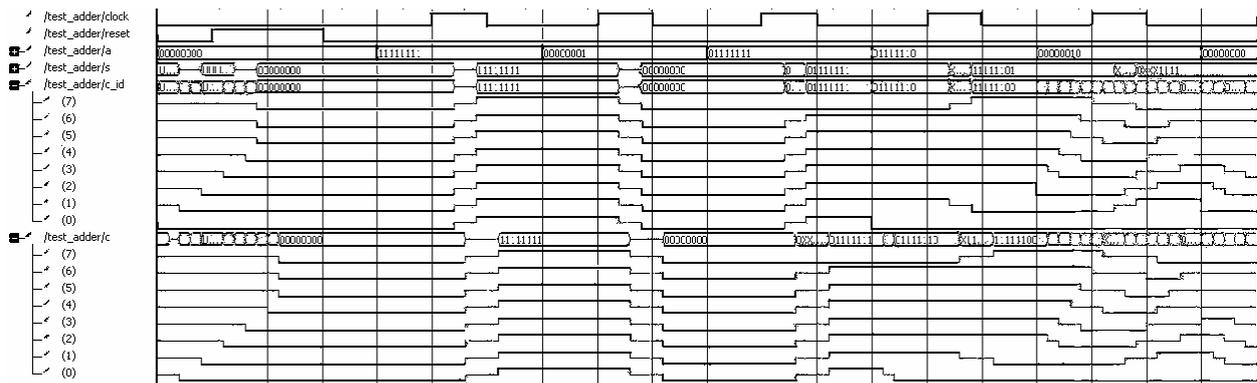


Рис. 3

<pre> module accum_delay(a_id,a); parameter n=1; input a_id;output a; reg[n-1:0] a; wire[n-1:0] a_id; parameter t1=0; // минимальное время удержания parameter t2=0; ; //максимальное время задержки always @ (a_id) begin #t1; a='bx; #(t2-t1); a=a_id; end endmodule// module example; reg x_0,x_1,x_2; wire [2:0]y_id,y;//,x0,x1,x2; wire z_0_id,z_1_id,z_0,z_1; reg [2:0] takt; </pre>	<pre> initial begin// генерация тестовой последовательности x_0='b0; x_1='b0; for (takt=0;takt!=6;takt=takt+1) begin #10 x_0=takt[0]; x_1= takt[1]; x_2= takt[2]; end end. //вычисление сигналов без задержек assign y_id[0] = x_0 && x_1 && ~x_2, y_id[1] = x_0 && x_2, y_id[2] =~x_0 && ~x_2, z_0_id = y [0] y[1] y[2] , z_1_id = y[0] x_0 && ~x_1 ; // моделирование задержек accum_delay #(3,2,3) d1 (y_id,y); accum_delay #(1,2,4) d2 (z_0_id,z_0), d3 (z_1_id,z_1); endmodule </pre>
--	--

Рис. 4

Программа на рис. 4 описывает процедуру тестирования двухступенчатой И-ИЛИ логической схемы, где x_0 , x_1 и x_2 представляют входные сигналы, изменяющиеся с интервалом 10 единиц модельного времени, y – вектор выходных сигналов слоя И, а z_0 и z_1 – выходные сигналы, формируемые схемами И.

Компоненты устройства в модели представлены последовательным соединением безынерционных логических схем (соответствующие присваивания объединены оператором `assign`), выходы которых помечены суффиксом “_id”, и элементов задержки.

Временная диаграмма сигналов, полученная в результате моделирования, представлена на рис. 5.

Как видно из рис. 3 и 5, область неопределенности в последовательности соединенных элементов расширяется и сдвигается.

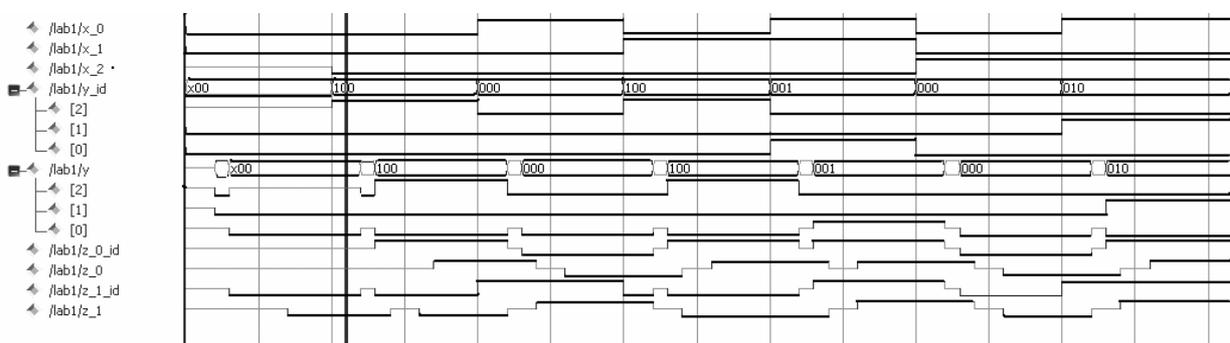


Рис. 5

Теоретически более адекватные результаты может дать стохастический подход (псевдослучайное моделирование) [5], предполагающий многократное выполнение процедуры моделирования при различных значениях параметров, случайно выбираемых из возможного диапазона. К сожалению, законы распределения времени задержек в большинстве случаев неизвестны. Кроме того, такой метод оказывается очень трудоемким и может дать существенные отличия лишь при моделировании устройств с относительно длинными последовательными цепочками комбинационных схем, а такие структуры в принципе нежелательно применять при проектировании высокопроизводительных устройств. По возможности целесообразно перестраивать подобные устройства, приводя их к параллельной или конвейерной форме [2], [6]. Поэтому несмотря на наличие, например, в языке SystemVerilog и системах его интерпретации конструкций, обеспечивающих статическое моделирование, такой подход к анализу задержек можно рассматривать лишь как относительно отдаленную перспективу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Автоматизированное проектирование цифровых устройств / С. С. Бадулин, Ю. Н. Барнаулов, В. А. Бердышев и др.; под ред. С. С. Бадулина. М.: Радио и связь, 1981.
2. Kaeslin H. Digital Integrated Circuit Design. From VLSI Architectures to CMOS Fabrication. New York: Cambridge University Press, 2008.
3. Грушвицкий Р. И., Мурсаев А. Х., Угрюмов Е. П. Проектирование систем на микросхемах с программируемой структурой. СПб.: БХВ-Петербург, 2006.
4. Поляков А. К. Языки VHDL и VERILOG в проектировании цифровой аппаратуры. М.: СОЛОН-Пресс, 2003.

5. Sutherland S., Devidman S., Flake P. SystemVerilog for design and modeling. USA: Springer, 2007.

6. Мурсаев А. Х. Представление в языках проектирования аппаратуры потоковой, конвейерной и микропрограммной реализации операционных устройств //Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2010. № 5. С. 73–78.

A. H. Mursaev

DISCRETE DEVICES SIMULATION WITH SPREADING UNCERTAINTY

The way to describe discrete devices for simulation with the account of components' delays, providing detection of races, is considered. Interpretation of this model with the use of widespread Hardware design languages – VerilogHDL and VHDL is presented.

Discrete device, simulation, delays



УДК 681.51.011; 681.513.6; 62-83-52

*В. Е. Кузнецов, Н. Д. Поляхов,
Д. М. Филатов, Я. Чжан*

ИССЛЕДОВАНИЕ И УЛУЧШЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОГИДРОСТАТИЧЕСКИХ РУЛЕВЫХ СИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ С ЭТАЛОННОЙ МОДЕЛЬЮ¹

Рассматривается электрогидростатическая схема построения автономных рулевых систем, преимущества ее применения и особенности реализации. Исследуются различные способы построения системы управления как в канале управления вентильным двигателем, так и в гидростатическом канале позиционирования. Приведена структура адаптивного регулятора с эталонной моделью, схемы управления и результаты моделирования электрогидростатической системы рулевых приводов самолета.

Электрогидростатический рулевой привод, вентильный двигатель, адаптивный регулятор

Характерной чертой развития и разработки современных перспективных самолетов является следование новой концепции [1], [2], при которой наиболее энергоемкие системы, традиционно использовавшие для своего функционирования гидравлическую энергию, переводятся на электричество. Повышение уровня электрификации самолета может дать следующие преимущества: снижение его взлетной и эксплуатационной масс; улучшение летно-технических характеристик; снижение удельного расхода топлива; упрощение конструкции; упрощение эксплуатации и наземного обслуживания; снижение прямых эксплуатационных расходов.

Для маневренных самолетов к таким системам следует отнести прежде всего системы управления рулевыми поверхностями, получающие питание от центральной гидросистемы. В этом случае ключевым моментом в реализации концепции электрифицированного самолета является создание электрогидростатических приводов (ЭГСП) управления рулями. По данным фирмы Lockheed Martin реализация электрогидростатических приводов позволила обеспечить: уменьшение взлетного веса – на 6 %; уменьшение поражаемой площади – на 15 %; снижение стоимости самолета – на 5 %; снижение стоимости жизненного цикла – на 2–3 %.

¹ Исследования выполнены при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по программе ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. в рамках реализации мероприятия № 1.2.2 в соответствии с гос. контрактом № 698 от 20.05.10.

На рис. 1 представлена схема исследуемой электрогидростатической системы управления рулями. Система осуществляет преобразование электрической энергии в механическое перемещение с помощью электропривода и гидростатической передачи, выполненной на основе гидроцилиндра ГЦ и нерегулируемого реверсивного насоса Н, скорость вращения которого регулируется электроприводом ЭП.

Минимальное сливное давление в приводе поддерживается пружинным гидрокомпенсатором ГК (гидроаккумулятор), необходимым для компенсации температурного расширения жидкости. Для восполнения утечек и исключения кавитации в основном насосе силовая гидросистема подключена к гидрокомпенсатору с помощью обратных клапанов ОК.

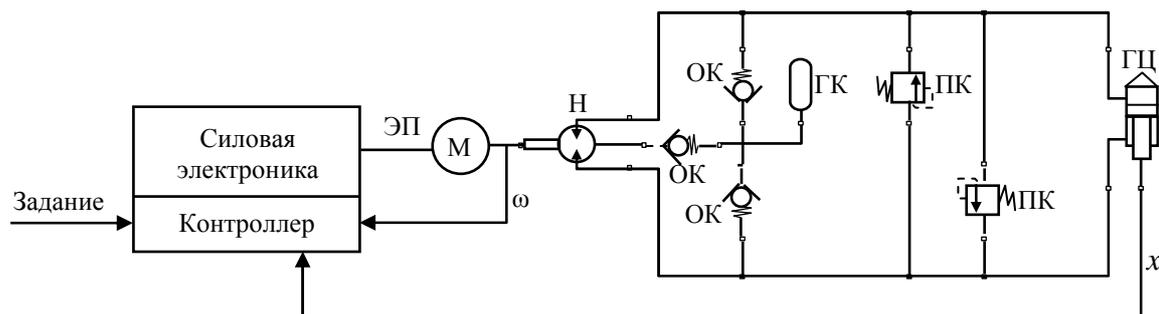


Рис. 1

Для предохранения силовой гидросистемы от чрезмерных забросов давления служат предохранительные клапаны ПК.

В настоящее время создание чисто «электрического» самолета с применением только электромеханических приводов сталкивается с существенными затруднениями, связанными с отсутствием электродвигателей с высокой удельной мощностью, соизмеримой с гидродвигателями, механических редукторов с высокими показателями надежности, а также отечественных электронных компонентов. Поэтому при применении электрических систем передачи мощности на борту используются комплексы электрогидростатических приводов с электромеханическими приводами насосов.

Исполнительные механизмы приводов с нерегулируемым реверсивным насосом гораздо проще и дешевле, чем с регулируемым. Удельная мощность электрической части привода приближается к удельной мощности гидроагрегатов [3]. Насосы и электродвигатели в таких приводах работают при переменной скорости вращения, что позволяет обеспечить их большой ресурс по сравнению с приводами с регулируемым насосом, в которых скорость вращения ротора постоянно поддерживается близкой к максимальной скорости.

Улучшение их регулировочных характеристик осуществляется средствами электронной части привода.

В данной статье исследуется электрогидростатическая система.

В качестве регулируемого электродвигателя насоса рассматривается вентильный двигатель на основе трехфазной синхронной машины с возбуждением от постоянного магнита.

Это объясняется его высокой перегрузочной способностью, возможностью работы в тяжелых условиях эксплуатации, отсутствием трущихся контактов, большим сроком службы и высокой надежностью, хорошими регулировочными свойствами и возмож-

ностью построения высококачественных систем управления. Математическое описание электродвигателя с явнополюсным ротором в виде постоянного магнита, поле которого ориентировано по оси d , составлено с учетом обобщенной модели вентильного двигателя (рис. 2).

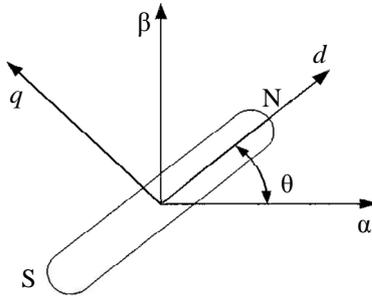


Рис. 2

В синхронно вращающейся со скоростью $p_{\Pi}\omega$ системе координат уравнения, описывающие электромагнитные процессы в вентильном двигателе, имеют вид:

$$\begin{cases} u_{1d} = R_1 i_{1d} + \frac{d\Psi_{1d}}{dt} - p_{\Pi}\omega\Psi_{1q}; \\ u_{1q} = R_1 i_{1q} + \frac{d\Psi_{1q}}{dt} - p_{\Pi}\omega\Psi_{1d}; \end{cases}$$

$$\Psi_{1q} = L_{1q} i_{1q}, \quad \Psi_{1d} = L_{1d} i_{1d} + \Psi_{fd},$$

где u_{1d} , u_{1q} , i_{1d} , i_{1q} – проекции напряжения и тока статора по осям d , q ; ω – угловая скорость двигателя; p_{Π} – число пар полюсов; L_{1q} , L_{1d} – индуктивности по осям d , q соответственно.

Электромагнитный момент трехфазного электродвигателя при явнополюсном роторе в общем виде выглядит следующим образом:

$$M = 1.5 p_{\Pi} [\Psi_{1d} i_{1q} - \Psi_{1q} i_{1d}],$$

или с учетом (2):

$$M = 1.5 p_{\Pi} [\Psi_f i_{1q} + (L_{1d} - L_{1q}) i_{1d} i_{1q}].$$

Уравнение движения имеет вид:

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega = M - M_{\Pi},$$

где J – момент инерции ротора; M , M_{Π} – электромагнитный момент и момент нагрузки; B – коэффициент вязкого трения.

Функциональная схема управления вентильным двигателем с ШИМ-регулированием приведена на рис. 3. Система управления содержит токовые контуры со сравнением заданных токов статора i_a^* , i_b^* , i_c^* с их фактическими значениями i_a , i_b , i_c и последующим поддержанием релейным регулятором заданного значения тока в пределах

$$\Delta i^* - \delta i \leq i \leq \Delta i^* + \delta i.$$

В результате имеем синусоидальные функции, модулированные ШИМ-преобразованием с помощью ключей инвертора, причем логическая единица соответствует замкнутому состоянию ключа, а логический ноль – его разомкнутому состоянию.

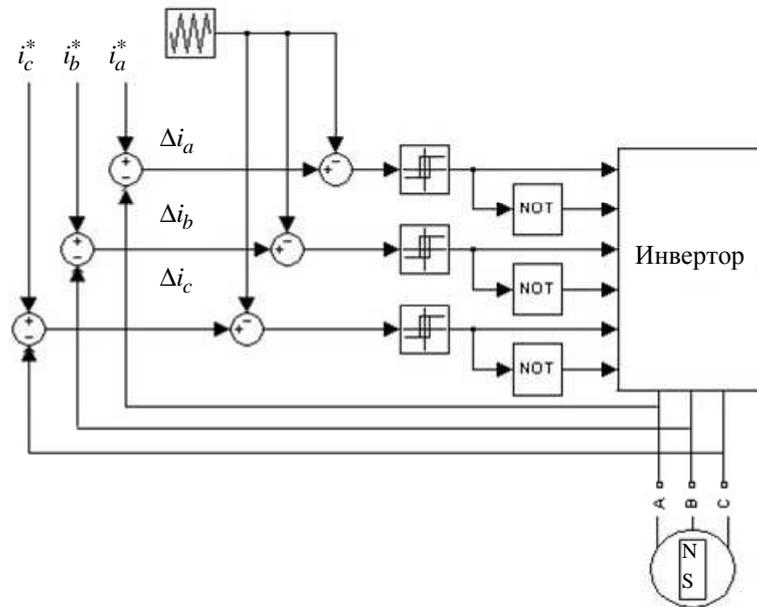


Рис. 3

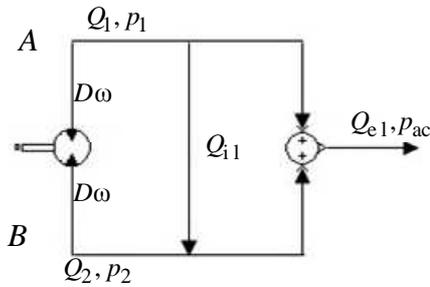


Рис. 4

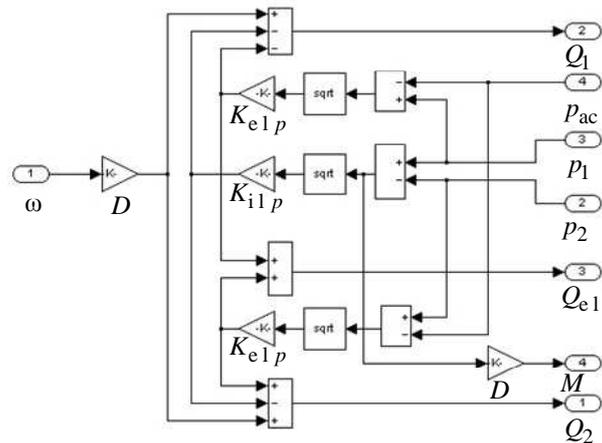


Рис. 5

Принципиальная схема насоса с учетом утечек показана на рис. 4, а модель его приведена на рис. 5 [4].

Для точки A расход определяется следующим образом:

$$Q_1 = D\omega - Q_{i1} - Q_{e11} = D\omega - K_{i1p}\sqrt{p_1 - p_2} - K_{e1p}\sqrt{p_1 - p_{ac}}.$$

Для точки B, соответственно, имеем:

$$Q_2 = D\omega - Q_{i1} + Q_{e12} = D\omega - K_{i1p}\sqrt{p_1 - p_2} + K_{e1p}\sqrt{p_2 - p_{ac}},$$

где D – характерный объем насоса; K_{i1p} – коэффициент внутренних утечек; K_{e1p} – коэффициент внешних утечек; p_{ac} – давление в гидроаккумуляторе.

Принципиальная схема гидроаккумулятора и клапанов подпитки показана на рис. 6, а модель гидроаккумулятора и клапанов подпитки – на рис. 7.

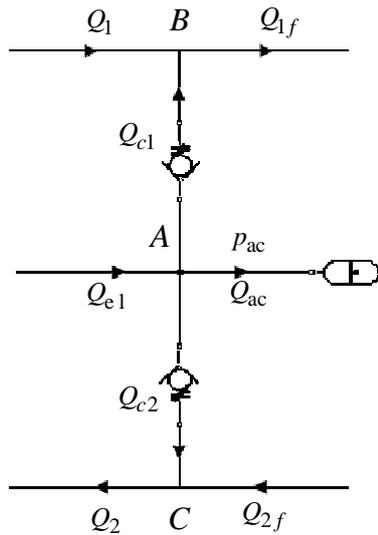


Рис. 6

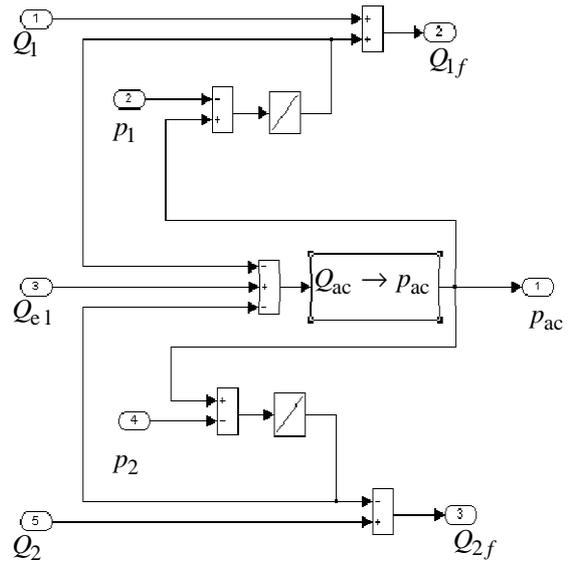


Рис. 7

Для точек A, B, C схемы получены следующие уравнения расходов жидкости:

$$\begin{cases} Q_{ac} = Q_{e1} - Q_{c1} - Q_{c2}, \\ Q_{1f} = Q_1 + Q_{c1}, \\ Q_{2f} = Q_2 - Q_{c2}, \end{cases}$$

где Q_{c1} и Q_{c2} – расходы клапанов подпитки.

Давление в гидроаккумуляторе связано расходом следующим образом:

$$P_{ac} = \frac{P_{aci} V_{gasi}^k}{\left| V_{gasi} - \int Q_{ac} dt \right|^k},$$

где P_{aci} , V_{gasi} – начальные значения давления и объема в гидроаккумуляторе; k – показатель политропы, обычно принимаемый в пределах $k = 1 \dots 1,3$. На основе уравнения баланса расходов и динамического формирования полостных давлений p_1 и p_2 упругой жидкости и силы на поршне F_p гидроцилиндра (рис. 8) с площадями A_1 , A_2 сформирована модель гидродвигателя, представленная на рис. 9.

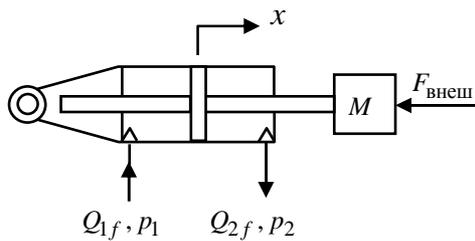


Рис. 8

Уравнения давления в полостях гидроцилиндра имеют следующий вид:

$$P_1 = \begin{cases} P_{\max}, & P_1 > P_{\max}; \\ P_1, & P_{\min} \leq P_1 \leq P_{\max}; \\ P_{\min}, & P_1 < P_{\min}, \end{cases}$$

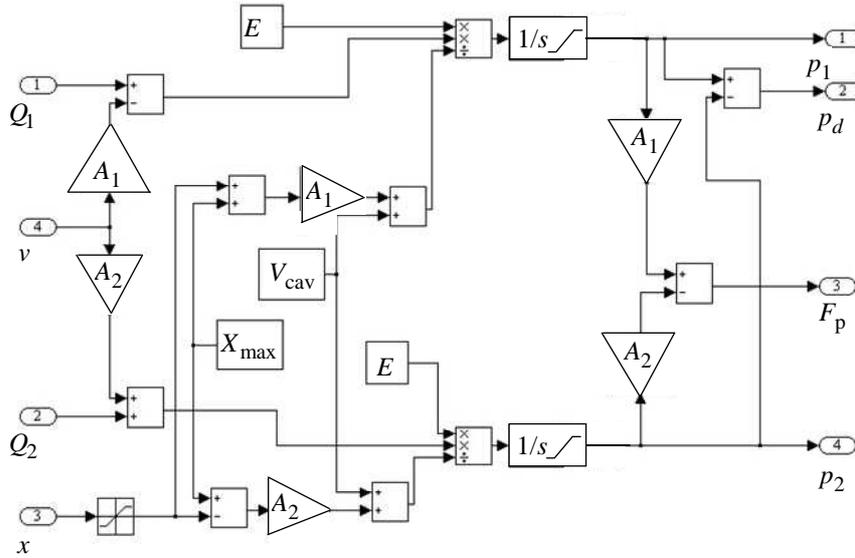


Рис. 9

$$\frac{dp_1}{dt} = Q_1 - \frac{A_1 E v}{V_1 = [A_1(x + X_{\max}) + V_{\text{cav}}]},$$

$$p_2 = \begin{cases} p_{\max}, & p_2 > p_{\max}; \\ p_2, & p_{\min} \leq p_2 \leq p_{\max}; \\ p_{\min}, & p_2 < p_{\min}; \end{cases}$$

$$\frac{dp_2}{dt} = Q_2 + \frac{A_2 E v}{[A_2(X_{\max} - x) + V_{\text{cav}}]},$$

где Q_1 – расход в первую полость гидроцилиндра; Q_2 – расход во вторую полость гидроцилиндра; v – скорость движения поршня, x – перемещение поршня; V_{cav} – постоянная составляющая объема; p_1, p_2 – давления в первой и второй полостях гидроцилиндра, $p_d = p_1 - p_2$ – разность давлений в гидроцилиндре; F_p – сила, развиваемая поршнем.

Уравнение движения гидроцилиндра с учетом сил трения на объект управления:

$$F_p = A(p_1 - p_2) = M \ddot{x} + F_{\text{внеш}} + F_{\text{тр}}.$$

Данное уравнение составлено с учетом сил сухого трения, включающих в себя и эффект Штрибека:

$$F_{\text{тр}} = \left(F_{\text{с.тр}} + (F_{\text{ст.тр}} - F_{\text{с.тр}}) e^{-\left(\frac{\dot{x}}{v_{\text{Ш}}}\right)^2} \right) \text{sgn}(\dot{x}) + \sigma_2 \dot{x},$$

где $F_{\text{с.тр}}$ – сила сухого трения, $F_{\text{ст.тр}}$ – сила статического трения при трогании; σ_2 – коэффициент вязкого трения для высоких скоростей, $v_{\text{Ш}}$ – скорость Штрибека (крутизна падения момента трения в начале движения).

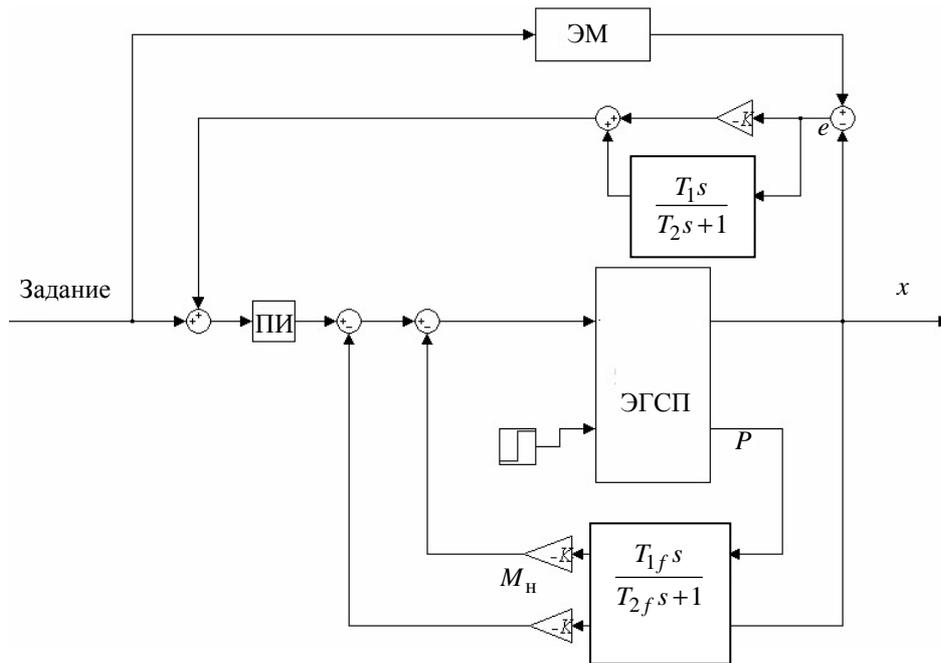


Рис. 10

Для улучшения динамических характеристик электрогидростатической системы в нее включается адаптивный регулятор с эталонной моделью (ЭМ) (рис. 10).

Эталонная динамика задается уравнением ЭМ:

$$\dot{x}_M = A_M x_M + B_M g,$$

где x_M – переменные ЭМ; A_M и B_M – матрицы состояния и управления ЭМ соответственно. Матрицы A_M и B_M задают желаемое поведение объекта управления. Использование рассогласования между движением объекта и ЭМ

$$e = x - x_M$$

в соответствии со структурной схемой управления (рис. 10) должно обеспечивать достижение цели адаптивного управления, т. е. выполнение одного из соотношений:

$$\|e(t)\| \leq \varepsilon_0,$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|e(t)\| = 0,$$

где ε_0 – малое положительное число.

На рис. 11 представлены переходные процессы (кривые 1, 2) в электрогидростатической системе по положению поршня гидродвигателя. Для проверки грубости системы к внешним возмущениям на выходное звено объекта управления скачкообразно набрасывается внешняя сила нагрузки на 0.75 с. Переходные процессы адаптивной системы с ЭМ представлены на кривых 2.

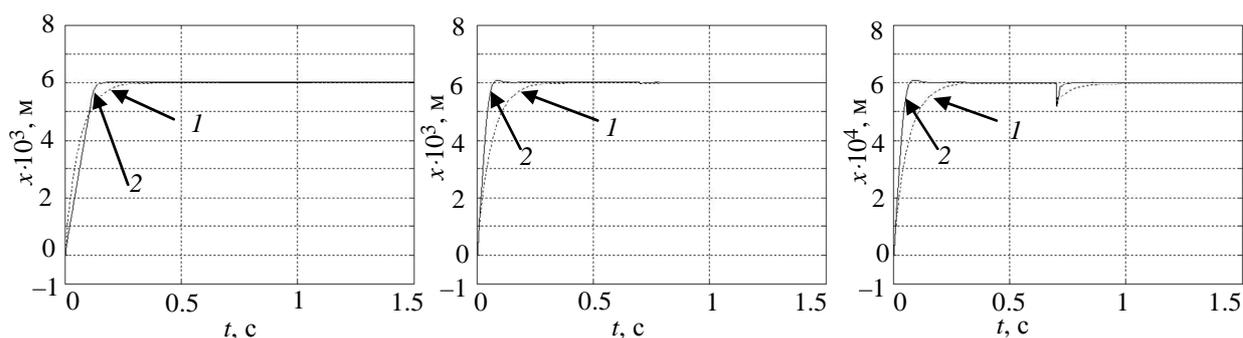


Рис. 11

Из анализа приведенных переходных характеристик можно заключить, что предложенный способ коррекции электрогидростатической системы с помощью динамической составляющей перепада давления на гидродвигателе и корректирующем воздействии с адаптивного регулятора с ЭМ улучшает быстродействие системы и эффективно расширяет диапазон ее регулирования в области малых сигналов управления. Кроме того, введенный закон регулирования обеспечивает увеличение грубости системы к действию внешних возмущений.

Результаты исследований показывают, что автономная электрогидростатическая система с адаптивным управлением имеет динамические характеристики, соизмеримые с быстродействием централизованных систем дроссельного регулирования и малочувствительна к внешним возмущениям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Электрогидравлические рулевые приводы с адаптивным управлением маневренных самолетов / С. В. Константинов, В. Е. Кузнецов, Н. Д. Поляхов и др. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. 513 с.
2. Ермаков С. А., Селиванов А. М., Хомутов В. С. Схемотехника и характеристики электрогидростатических приводов / МИФИ. М., 2006. 178 с.
3. Шумилов И. С. Системы управления рулями самолетов: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009.
4. Habibi S., Glodenberg A. Design of a New High Performance ElectroHydraulic Actuator[A] // 1999 IEEE/ASME Intern. Conf. on Advanced Intelligent.

V. E. Kuznetsov, N. D. Polyakhov, D. M. Filatov, Yang Zhun

RESEARCH AND IMPROVEMENT OF DYNAMIC CHARACTERISTICS FOR ELECTRO-HYDROSTATIC ACTUATOR SYSTEMS WITH MODEL REFERENCE ADAPTIVE CONTROLLERS

Electro-hydrostatic scheme of self-contained actuator systems, application advantages and features of realization of the systems are presented are considered. Different methods of building control system, such as in control channel PMSM and in hydrostatic channel positioning were studied. The structure of model Reference Adaptive Controller, control scheme and modeling results of aircraft electro-hydrostatic actuators are given.

Electro-hydrostatic actuator systems, steering drive, valve motor, adaptive controlle

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРЯМОЙ И НЕПРЯМОЙ АДАПТИВНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ АСИНХРОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ С НЕЛИНЕЙНЫМИ УПРУГИМИ СВОЙСТВАМИ

Рассматриваются вопросы построения прямой и не прямой адаптивных систем управления асинхронным электроприводом с двухмассовым нелинейным упругим объектом и векторным управлением. С использованием пакета Matlab Simulink проводится сравнительный анализ эффективности: не прямой с настраиваемой моделью и прямой с эталонной моделью адаптивных систем с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем для управления асинхронным электроприводом с двухмассовым нелинейным упругим объектом.

Асинхронный электропривод, упругий объект, прямое и не прямое адаптивное управление, эталонная и настраиваемая модели, параметрическая настройка, мажорирующие функции

Рассмотрим электромеханическую следящую систему векторного управления асинхронным электроприводом с двухмассовым нелинейным упругим объектом [1], структурная схема которой представлена на рис. 1.

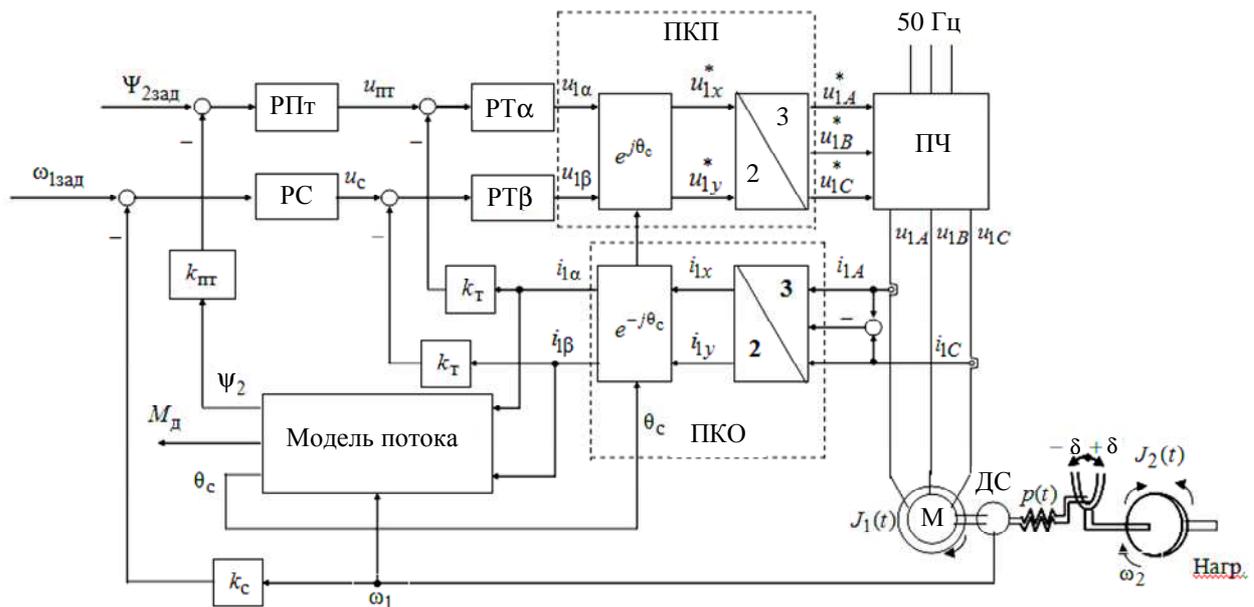


Рис. 1

Асинхронный электропривод (М) питается от преобразователя частоты (ПЧ) со звеном постоянного тока и автономным инвертором напряжения. На входе преобразователя действует трехфазная система задающих напряжений $u_{1A}^*, u_{1B}^*, u_{1C}^*$. Система регулирования выполнена во вращающейся системе координат α - β при ориентации оси вещественных α вращающейся системы координат α - β по вектору потокосцепления ротора Ψ_2 . Преобразование координат в прямом канале (ПКП) и в канале обратной связи (ПКО) производится в системе векторного управления [1], [2].

Система подчиненного управления асинхронным электроприводом с двухмассовым нелинейным упругим объектом включает в себя внутренние контуры регулирования токов $i_{1\alpha}$ и $i_{1\beta}$ с регуляторами РТ α и РТ β . Внешними по отношению к токовым контурам являются контуры регулирования потокосцепления ротора с регулятором потока РПт и скорости с регулятором РС. Первый из них замкнут по модулю вектора потокосцепления ротора, вычисленному в преобразователе блока «Модель потока», второй – по сигналу скорости с датчика скорости ДС. Потокосцепление ротора ψ_2 сравнивается с сигналом задания $\psi_{2\text{зад}}$ на входе регулятора потока, а скорость асинхронного электропривода – с сигналом задания $\omega_{1\text{зад}}$ на входе регулятора скорости. В качестве регуляторов токов РТ α , РТ β , потокосцепления РПт и скорости РС применены пропорциональные П-регуляторы.

Математическая модель следящей системы управления асинхронным электроприводом с двухмассовым нелинейным упругим объектом при ориентации вращающейся системы координат по вектору потокосцепления ротора описывается системой дифференциальных уравнений шестого порядка вида [1], [3]

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega}_2 &= J_2^{-1} f_y; \quad \dot{m}_y = p(\omega_1 - \omega_2); \quad \dot{\omega}_1 = J_1^{-1} [M_d - f_y]; \quad \dot{\psi}_2 = T_2^{-1} [L_m \dot{i}_{1\alpha} - \psi_2]; \\ \dot{i}_{1\alpha} &= (\sigma R_1 T_1)^{-1} [u_{1\alpha} - R_1 i_{1\alpha} + \omega_{0\text{эл}} \sigma R_1 T_1 i_{1\beta} - L_m L_2^{-1} \dot{\psi}_2]; \\ \dot{i}_{1\beta} &= (\sigma R_1 T_1)^{-1} [u_{1\beta} - R_1 i_{1\beta} - \omega_{0\text{эл}} \sigma R_1 T_1 i_{1\alpha} - L_m L_2^{-1} \omega_{0\text{эл}} \psi_2]; \\ \omega_{0\text{эл}} &= p_{\text{п}} \omega_1 + \omega_{\text{р}}; \quad \omega_{\text{р}} = L_m L_2^{-1} R_2 i_{1\beta} / \psi_2; \quad M_d = 3/2 p_{\text{п}} L_m L_2^{-1} \psi_2 i_{1\beta}; \\ u_{1\alpha} &= k_{\text{п}} \beta_{\text{т}} u_{\text{пт}} - k_{\text{т}} i_{1\alpha}; \quad u_{1\beta} = k_{\text{п}} \beta_{\text{т}} [u_{\text{с}} - k_{\text{т}} i_{1\beta}]; \\ u_{\text{пт}} &= \beta_{\text{пт}} \psi_{2\text{зад}} - k_{\text{пт}} \psi_2; \quad u_{\text{с}} = \beta_{\text{с}} [\omega_{\text{зад}} - k_{\text{с}} \omega_1], \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где J_1 – момент инерции исполнительного привода с частью жестко соединенных с ним инерционных звеньев механизма; J_2 – момент инерции остальной части механической конструкции, приведенный к вращению исполнительного привода; p – коэффициент упругости пружины, соединяющей диск J_1 с диском J_2 ; ω_1, ω_2 – угловые скорости первого и второго дисков; m_y – упругий момент, возникающий при деформации в упругой связи при отсутствии зазора; ψ_2 – проекция пространственного вектора потокосцепления ротора на оси α вращающейся системы координат α - β ; $\omega_{\text{р}}$ – частота роторной ЭДС; $p_{\text{п}}$ – число пар полюсов обмотки статора; $p_{\text{п}} \omega$ – угловая скорость ротора в электрических радианах в секунду; $\omega_{0\text{эл}}$ – угловая скорость вращающейся системы координат α - β , равная частоте напряжения питания, в электрических радианах в секунду; M_d – момент асинхронного электропривода; R_1, R_2 – активные сопротивления обмоток фаз статора и ротора соответственно; L_m – главная индуктивность намагничивающего контура; L_1, L_2 – индуктивности обмоток фаз статора и ротора соответственно; $\sigma = 1 - L_m^2 / (L_1 L_2)$ – коэффициент рассеяния машины; $T_1 = L_1 / R_1, T_2 = L_2 / R_2$ – постоянные времени обмоток статора и ротора

соответственно; $\beta_T, \beta_{\text{ПТ}}, \beta_C$ – коэффициенты передачи регуляторов токов, потокосцепления и скорости соответственно; $k_T, k_{\text{ПТ}}, k_C$ – постоянные коэффициенты передачи датчиков обратных связей по токам, потокосцеплению и скорости соответственно; $k_{\text{П}}$ – коэффициент передачи звена чистого запаздывания; $u_{1\alpha}, u_{1\beta}, u_{\text{ПТ}}, u_C$ – выходные напряжения контурных регуляторов токов, потокосцепления и скорости соответственно; $\omega_{\text{зад}}, \Psi_{2\text{зад}}$ – задающее воздействие скорости и потокосцепления ротора; f_y – упругий момент, описываемый при учете зазора 2δ в упругой связи нелинейной функцией [3], [4].

Исходная следящая система является нелинейной, поэтому рассмотрим ее линейное приближение, полученное методом разложения правых частей уравнений (1) в ряд Тейлора в окрестности некоторого решения. Выбрав некоторые значения переменных состояния в установившемся режиме переходных процессов $\omega_1^*, \Psi_2^*, i_{1\alpha}^*, i_{1\beta}^*$ и приняв следующие обозначения:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= (R_1 T_1 \sigma)^{-1} k_{\text{П}} \beta_T \beta_{\text{ПТ}}; & a_2 &= -(R_1 T_1 T_2 \sigma)^{-1} (R_1 T_2 + k_2 L_m + k_{\text{П}} \beta_T k_T T_2); \\ a_3 &= k_2 R_2; & a_4 &= p_{\text{П}}; & a_5 &= (R_1 T_1 T_2 \sigma)^{-1} (k_2 - k_{\text{П}} \beta_T \beta_{\text{ПТ}} k_{\text{ПТ}} T_2); & a_6 &= (R_1 T_1 \sigma)^{-1} k_{\text{П}} \beta_T \beta_C; \\ a_7 &= -(R_1 T_1 \sigma)^{-1} (R_1 + k_{\text{П}} \beta_T k_T + k_2^2 R_2); & a_8 &= -(R_1 T_1 \sigma)^{-1} k_2 p_{\text{П}}; & a_9 &= -(R_1 T_1 \sigma)^{-1} (k_{\text{П}} \beta_T \beta_C k_C); \\ a_{10} &= L_m / T_2; & a_{11} &= -1 / T_2; & a_{12} &= 3 p_{\text{П}} k_2 / (2 J_{01}); & a_{13} &= 1 / J_{02}; & a_{14} &= p_0; & a_{15} &= 1 / J_{01}; \\ b_1 &= a_{12} i_{1\beta}^*; & b_2 &= a_{12} \Psi_2^*; & b_3 &= a_4 i_{1\beta}^*; & b_4 &= a_5 - a_3 (i_{1\beta}^*)^2 (\Psi_2^*)^{-2}; \\ b_5 &= 2 a_3 i_{1\beta}^* (\Psi_2^*)^{-1} + a_4 \omega_1^*; & b_6 &= a_9 + a_8 \Psi_2^* - a_4 i_{1\alpha}^*; & b_7 &= a_8 \omega_1^* - a_3 i_{1\beta}^* i_{1\alpha}^* (\Psi_2^*)^{-2}; \\ b_8 &= -a_4 \omega_1^* - a_3 i_{1\beta}^* (\Psi_2^*)^{-1}; & b_9 &= a_7 - a_3 i_{1\alpha}^* (\Psi_2^*)^{-1}; & k_2 &= L_m / L_2, \end{aligned} \right\}$$

получим линейризованное приближение уравнений (1) с некоторыми усредненными параметрами векторно-матричного вида

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{b}(u_0 + u_a); & y &= \mathbf{c}^T \mathbf{x}; \\ \mathbf{A} &= \begin{bmatrix} 0 & a_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -a_{14} & 0 & a_{14} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -a_{15} & 0 & b_1 & 0 & b_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_{11} & a_{10} & 0 \\ 0 & 0 & b_3 & b_4 & a_2 & b_5 \\ 0 & 0 & b_6 & b_7 & b_8 & b_9 \end{bmatrix}; & \mathbf{b} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ a_1 \\ a_6 \end{bmatrix}; & \mathbf{c} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ k_C \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\mathbf{x} = [\omega_2 \quad m_y \quad \omega_1 \quad \Psi_2 \quad i_{1\alpha} \quad i_{1\beta}]^T$; $u_0 = \omega_{\text{зад}}$ – задающее воздействие; u_a – адаптивное управление.

На основе полученного линейризованного объекта (2) с усредненными параметрами составляются методики построения прямой с эталонной моделью и непрямой с настраиваемой моделью адаптивных систем с параметрической настройкой, мажорирующими функциями и наблюдателем [4]–[6] для управления асинхронным электроприводом с

двухмассовым нелинейным упругим объектом. В среде Matlab Simulink разработаны программы для моделирования построенных адаптивных систем, результаты которого при задающих воздействиях $\omega_{\text{зад}} = 1$ рад/с представлены на рис. 2.

На рис. 2, *а* показаны переходные процессы угловой скорости второго диска при усредненных постоянных параметрах двухмассового нелинейного упругого объекта, а на рис. 2, *б* – при изменении коэффициента упругости. Причем переходный процесс жесткой системы отражается кривой 1, упругой системы без адаптивного управления – кривой 2, прямой адаптивной системы с эталонной моделью – кривой 3 и непрямой адаптивной системы с настраиваемой моделью – кривой 4.

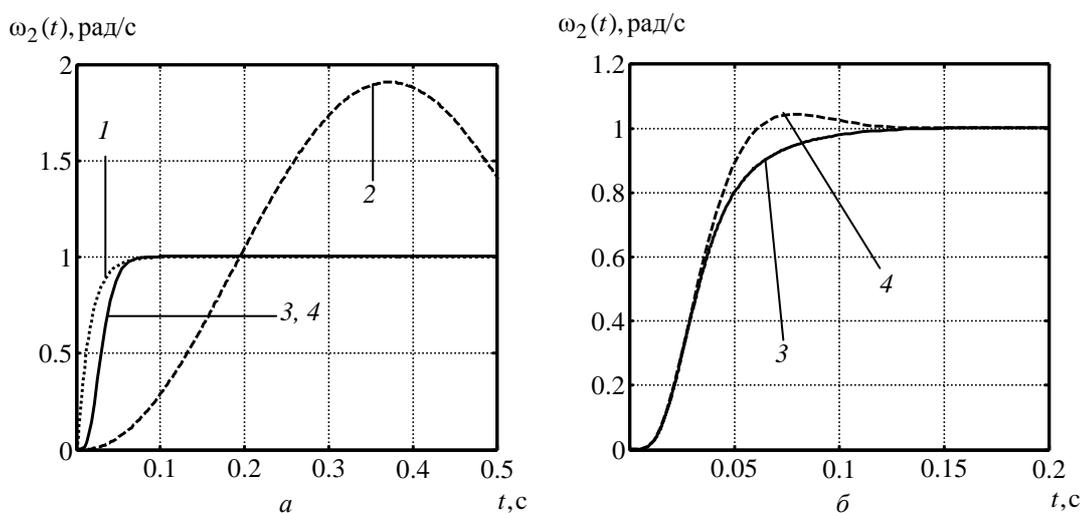


Рис. 2

Результаты моделирования показывают, что в прямой и непрямой адаптивных системах управления асинхронным электроприводом с двухмассовым нелинейным упругим объектом не только успешно подавлены упругие колебания, которые возникали в упругом объекте без адаптивного управления, но и повышены быстродействие и точность управления в условиях параметрической и функциональной неопределенности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Academia, 2006. 265 с.
2. Рудаков В. В., Столяров И. М., Дартау В. А. Асинхронные электроприводы с векторным управлением. Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1987. 136 с.
3. Путов В. В. Адаптивное и модальное управление механическими объектами с упругими деформациями. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2002. 112 с.
4. Путов В. В., Шелудько В. Н., Чьен Н. К. Сравнительное исследование непрямых и прямых адаптивных систем с параметрической настройкой и мажорирующими функциями для управления двухмассовым нелинейным упругим электромеханическим объектом// Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. Вып. 2. С. 58–65.
5. Путов В. В. Методы построения адаптивных систем управления нелинейными нестационарными динамическими объектами с функционально-параметрической неопределенностью: Дис. ... д-ра техн. наук / СПбГЭТУ (ЛЭТИ). СПб., 1993. 590 с.

6. Непрямые адаптивные системы с параметрически настраиваемыми моделями для управления линейными объектами / В. В. Путов, В. Н. Шелудько, Н. К. Чьен, Е. В. Белградская // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. Вып. 7. С. 71–80.

V. V. Putov, V. N. Sheludko, S. G. German-Galkin, N. K. Chien

COMPARATIVE RESEARCH DIRECT AND INDIRECT ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS OF ASYNCHRONOUS ELECTROMOTOR WITH TWO-MASS NONLINEAR ELASTIC PLANT

In article the structure of direct and indirect adaptive systems control for asynchronous electromotor with two-mass nonlinear elastic plant is considered. The efficiency of indirect and direct adaptive systems control developed for considered elastic plant in the condition of parametric functional uncertainty is compared.

Synchronous electromotor, elastic electromechanical plant, direct and indirect adaptive control, reference and adjustable models, parameter setting, mazorized functions



УДК 681.5

А. А. Абрахим

РОБАСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ СЛОЖНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Разработка алгоритма для настройки регулятора скорости четырехмассового радиотелескопа с помощью робастного управления.

Многомассовая система, электропривод, регулятор скорости, робастное управление

Многомассовая система с упругими связями считается одной из сложных динамических систем. Сложность подобных систем заключается в упругости механических связей, из-за которой возникает автоколебание в переходном процессе системы, что в итоге приводит к полной неустойчивости. Робастное управление известно как грубый подход к решению сложных задач. При помощи этого метода можно решить проблему влияния упругости и помех в четырехмассовом крупном радиотелескопе РТ-70 [1] при управлении скоростью.

Радиотелескоп, как четырехмассовый объект управления, включает в себя: двигатель (первая масса), платформу (вторая масса), зеркало (третья масса) и массу противовеса (четвертая масса). Механическая связь между этими частями определяется как упругая, вызывающая автоколебания и неустойчивость в системе. Существует также внешнее возмущение (ветер). При этом возникает проблема ограниченности измеряемых координат объекта, поскольку невозможно измерить момент упругости механической связи между частями объекта.

Для решения подобных задач используются различные подходы к применению регулятора: модальный регулятор с наблюдательным устройством, оптимальное управление и др.

В статье рассматривается робастный подход к решению этих комплексных вопросов. H_∞ -управление имеет несколько особенностей в сравнении с другими методами синтеза робастных контроллеров [2]:

- работает с критериями устойчивости и чувствительности системы;
- имеет простой одношаговый алгоритм;
- точно формирует выходную частотную характеристику.

Математическое описание радиотелескопа включает в себя неопределенность, связанную с коэффициентами жесткости и вязкости трения. Однако при этом не учитывается возмущение ветра, которое будет рассматриваться далее. Параметры меняются в зависимости от изменения температуры, скорости и других факторов, что приводит к изменению характеристик системы и, следовательно, к тому, что регулятор становится недействующим. Достичь желаемого результата невозможно, так как регулятор настраивался для системы с другими внешними условиями.

Робастное управление обеспечивает качество и устойчивость системы.

Далее используются следующие обозначения: $G(s)$ – объект управления; $K(s)$ – регулятор, получаемый от робастного алгоритма.

При расчете регулятора алгоритм обеспечивает три критерия [3]:

I. *Критерий устойчивости* – корни характеристического полинома $1 + G(s)K(s) = 0$ должны находиться на левой половине плоскости S .

II. *Критерий качества* – известен как функция чувствительности $S(s) = 1/(1 + G(s)K(s))$, которая должна иметь малое значение при частотах возмущения.

III. *Критерий робастности* – поддержка качества и устойчивости при разных рабочих условиях.

В общем H_∞ -нормой передаточной матрицы F является ее максимальное значение для всего частотного диапазона, которое обозначается как

$$\|F\| = \sup_{\omega} \bar{\sigma}(F(j\omega)),$$

где $\bar{\sigma}$ – максимальное сингулярное значение передаточной функции. Цель синтеза заключается в разработке регулятора, где H_∞ – норма для управляемого объекта имеет определенные пределы. Структура робастного синтеза показана на рис. 1.

Объект управления $P(s)$ имеет два входа, два внешних воздействия w , которые включают сигнал задания и возмущения. Управляемая переменная обозначена u . Она состоит из сигнала ошибки z , который надо минимизировать, и измеряемой переменной v , которая применяется в контуре управления и используется в $K(s)$ для подсчета переменной u .

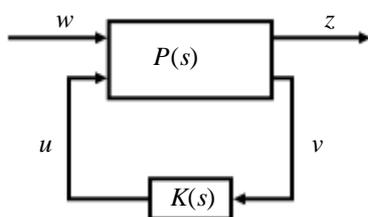


Рис. 1

В синтезе H_∞ -управление применяются две передаточных функции, которые разделяют сложность задачи управления: первая отвечает за устойчивость, вторая – за качество. Функция чувствительности $S(s)$ – это отношение выхода системы к заданным сигналам; функция чувствительности $T(s)$ – качество системы на выходе. Эти две функции используются в синтезе построения регулятора:

$$S(s) = \frac{1}{1 + G(s)K(s)}; \quad T(s) = \frac{G(s)K(s)}{1 + G(s)K(s)}.$$

Система может быть описана следующим уравнением:

$$\begin{bmatrix} z \\ v \end{bmatrix} = P(s) \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{11}(s) & P_{12}(s) \\ P_{21}(s) & P_{22}(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w \\ u \end{bmatrix};$$

$$u = K(s)v.$$

В итоге значения $\bar{\sigma}(S)$ – для качества и $\bar{\sigma}(T)$ – для робастности ограничиваются с помощью минимизации нормы

$$\min_k \|N(K(s))\|,$$

где $N = \begin{bmatrix} W_s S \\ W_t T \end{bmatrix}$, W_s и W_t – весовые функции.

Расширенная модель $P(s)$ для синтеза H_∞ -управления отображается на рис. 2.

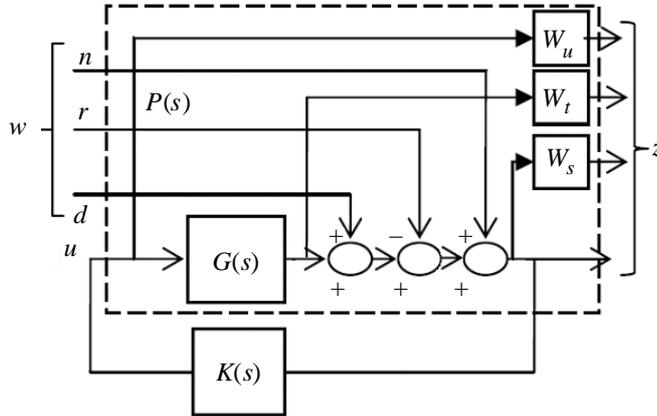


Рис. 2

Модель $P(s)$ имеет следующий нормализованный вид:

$$\begin{bmatrix} W_s e \\ W_u u \\ W_t y \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_s & -W_s G(s) \\ 0 & W_u \\ 0 & W_t G(s) \\ I & -G(s) \end{bmatrix}.$$

После определения W_s и W_t можно определить P :

$$P(s) = \begin{bmatrix} W_s & -W_s G(s) \\ 0 & W_u \\ 0 & W_t G(s) \\ I & -G(s) \end{bmatrix} : \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & D_{11} & D_{12} \\ C_2 & D_{21} & D_{22} \end{bmatrix}.$$

Следующее уравнение отображает смешанную чувствительность робастной задачи:

$$P(s) = \begin{bmatrix} W_s S \\ W_u R \\ W_t T \end{bmatrix}, \quad \min \|P\| = \min \begin{bmatrix} \|W_s S\| \\ \|W_u R\| \\ \|W_t T\| \end{bmatrix} = \gamma,$$

где $P(s)$ – передаточная функция от w до z , т. е. $|T_{zw}| = \gamma$, где $|T_{zw}| = P$ – функция издержек. Согласно теореме о минимальном усилении, норма H_∞ для $|T_{zw}|$ составляет не больше единицы, т. е.

$$\min \|T_{zw}\| = \min \begin{bmatrix} \|W_s S\| \\ \|W_u R\| \\ \|W_t T\| \end{bmatrix} \leq 1.$$

Таким образом, регулятор $K(s)$ получен при минимальной γ [4].

Весовые функции определяют рабочую зону регулятора – чем больше зона, тем лучше робастность:

$$W_s = \left(\frac{(s/\sqrt[m]{M_s} + \omega_b)}{s + \omega_b \sqrt[m]{A}} \right)^m ; W_t = \left(\frac{s/\omega_{bt} + 1/\sqrt[n]{W_t}}{\sqrt[n]{As}/\omega_{bt} + 1} \right)^n ,$$

где M_s, M_t – максимальные значения амплитуды возмущения и объекта; A – качественность (слежение за ошибкой) при малых частотах; ω_b, ω_{bt} – частоты среза.

Порядок регулятора зависит от порядка объекта и функции W_s и W_t :

$$\text{порядок регулятора} = N + m + n,$$

где N – порядок объекта, поэтому n и m должны быть как можно меньше.

Частотные характеристики показывают, что объект имеет три основных тона в диапазоне от 9 до 39 рад/с.

Объект имеет два регулятора: первый управляет координатами обратной связи платформы, второй – координатами обратной связи зеркала. Таким образом, первый регулятор обеспечивает плавное движение двигателя и платформы, а второй – плавное движение зеркала.

Настройки функций качества и устойчивости первого и второго регулятора показаны ниже:

$$W_{S1} = \frac{s/3+1}{s+0.001} ; W_{T1} = \frac{s/30+1/2}{0.001s/30+1} ;$$

$$W_{S2} = \frac{s/5+0.1}{s+0.0001} ; W_{T2} = \frac{s/5+1/3}{0.001s/5+1} .$$

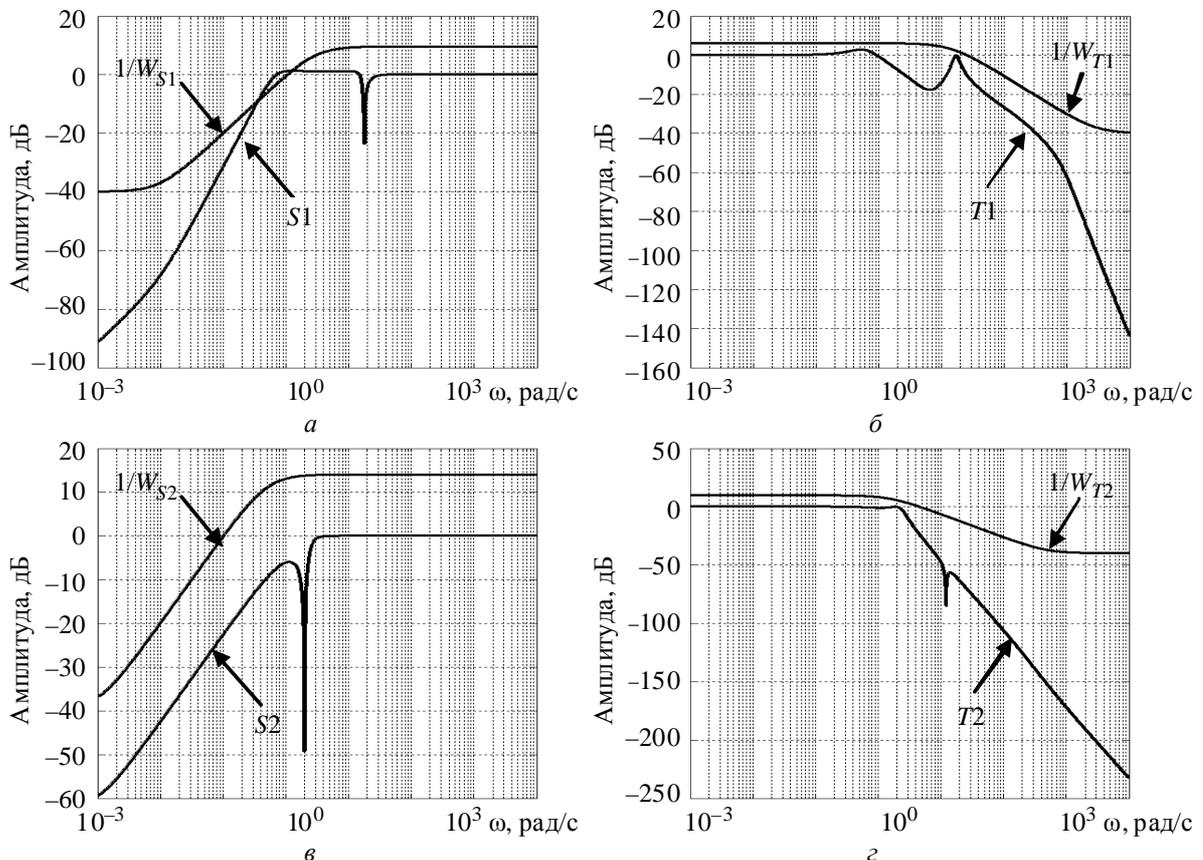


Рис. 3

Получив описание системы $P(s)$ и регулятора $K(s)$, можно изучить амплитудные логарифмические характеристики регулятора, а также чувствительность и качество замкнутой системы (для первого регулятора: рис. 3, *а* – весовая функция $1/W_{S1}$ и чувствительность системы $S1$, рис. 3, *б* – весовая функция $1/W_{T1}$ и качество замкнутой системы $T1$; для второго регулятора: рис. 3, *в* – весовая функция $1/W_{S2}$ и чувствительность системы $S2$, рис. 3, *г* – весовая функция $1/W_{T2}$ и качество замкнутой системы $T2$). Исчезновение резонансов в системе объясняется соответствующей настройкой регуляторов.

На рис. 4 показана структурная схема системы управления скоростью с двумя регуляторами, полученными с помощью синтеза H_∞ : $K1(s)$ – регулятор скорости платформы (ω_2); $K2(s)$ – регулятор скорости зеркала (ω_3).

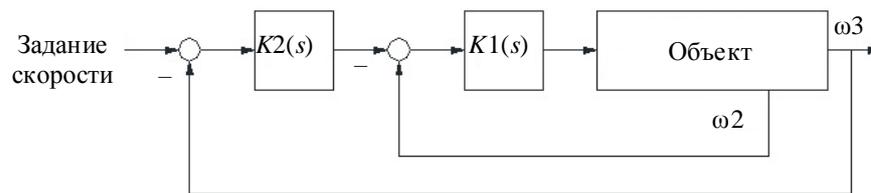


Рис. 4

Рисунок 5 показывает переходный процесс скорости главного зеркала радиотелескопа (на 25-й секунде задается сигнал возмущения). Робастный характер реакции системы позволяет ей продолжать работать и достигать желаемой скорости несмотря на влияние возмущений.

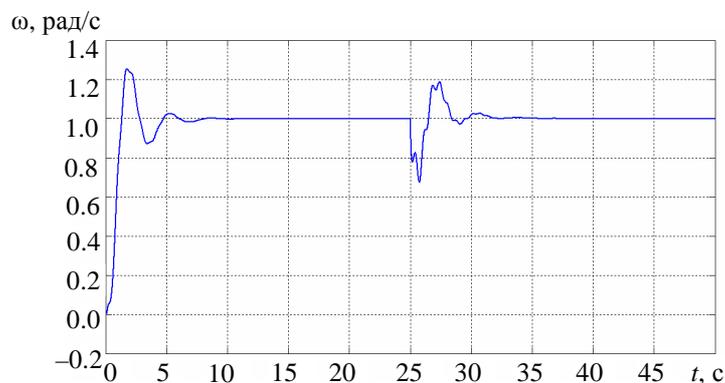


Рис. 5

Результаты, полученные в среде MATLAB SIMULINK, доказывают, что структура такого порядка управления даст надежную и устойчивую систему при различных внешних и внутренних изменениях в объекте.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколовский Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием. М.: Академия, 2006.
2. Skogestad S., Postlethwaite I. Multivariable feedback control. John Wiley & Sons, 2001.
3. Automatic Weight Selection Algorithm for Designing H Infinity controller for Active Magnetic Bearing, Sarath S Nair // Intern. J. of Eng. Sci. and Technol. 2011.
4. Zhou K., Doyle J. C., Glover K. Robust and Optimal Control. New Jersey: Prentice Hall, 1996.

A. A. Abraheem

ROBUST CONTROL OF COMPLEX DYNAMIC SYSTEMS

Development algorithm of speed controller for four-mass radio telescope by using robust control.

Multivariable system, electrical drive, speed control, robust control

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ДЕТАЛЕЙ

Рассмотрены проблемы нагрева крупногабаритных машиностроительных деталей (бандажные кольца турбогенераторов и рабочие колеса паровых турбин) для монтажа и демонтажа способом горячей посадки на вал. Обоснованы преимущества высокочастотного индукционного нагрева по сравнению с нагревом в печи, газовым нагревом и индукционным нагревом на промышленной частоте. Приведены результаты моделирования и экспериментальных исследований на промышленных объектах.

Высокочастотный индукционный нагрев, горячая посадка, бандажные кольца турбогенераторов, рабочие колеса паровых турбин

Выработка электроэнергии на тепловых и атомных электростанциях производится с помощью турбогенераторов, которые приводятся во вращение паровыми турбинами. Мощность этих агрегатов достигает 1200 МВ·А, масса – десятков тонн, а скорость вращения – 3000 об/мин, поэтому конструктивно для крепления деталей на валах роторов турбогенераторов и турбин используется способ горячей посадки, не создающий в деталях несимметричных напряжений, способных вызвать опасные локальные концентрации механических напряжений и вибрации.

На валу ротора турбогенератора способом горячей посадки крепятся бандажные кольца, контактные кольца, полумуфты, вентиляторы, а на валу ротора паровой турбины – до десяти рабочих колес с турбинными лопатками, полумуфты и другие детали. Масса одной насадной детали может достигать 3,5 т.

Монтаж деталей на вал производится при сборке агрегатов на заводах-изготовителях, например ОАО «Силовые машины», а полный цикл – демонтаж и монтаж – при плановых и капитальных ремонтах как на тепловых и атомных электростанциях, так и на специализированных ремонтных заводах.

Суть способа горячей посадки заключается в том, что насаживаемую деталь с диаметром отверстия меньшим, чем диаметр вала, нагревают до температуры 200...400 °С (для увеличения диаметра отверстия из-за температурного расширения металла) и устанавливают в нагретом состоянии на вал. После остывания детали возникает прочное соединение, выдерживающее рабочие усилия. Разница между диаметрами детали и вала в холодном состоянии (натяг) составляет от долей миллиметра до нескольких миллиметров. Зазор между валом и нагретой деталью при посадке обычно не превышает 1...2 мм, так как предельная температура нагрева ограничена опасностью изменения структуры металла и термостойкостью близлежащей электрической изоляции. Столь малый зазор в нагретом состоянии создает проблемы при установке массивных и крупногабаритных деталей, поскольку требует большой точности и высокой скорости проведения операции, которая может закончиться аварийно из-за остывания детали до установки ее в нужное положение.

Традиционно детали при монтаже нагреваются в газовых или электрических печах, газовыми горелками или индукционным способом на промышленной частоте. Нагрев при демонтаже производится индукционным способом на промышленной частоте или газовыми горелками.

Рассмотрим достоинства и недостатки этих способов нагрева.

Нагрев в печи производится только при монтаже и возможен только на заводах изготовителях или ремонтных заводах; при проведении плановых ремонтных работ на электростанциях этот способ неприменим. Транспортировка горячей детали от печи до места проведения монтажных работ приводит к остыванию детали, поэтому требуется перегрев детали в печи выше температуры, требуемой для монтажа. Непредвиденные задержки при транспортировке и в процессе насадки на вал могут привести и часто приводят к недопустимому остыванию детали, уменьшению диаметра ее отверстия и, в тяжелых случаях, к фиксации детали не на расчетном месте. Это тяжелая авария, требующая длительной и дорогостоящей работы по снятию с нештатной посадки детали или к удалению ее путем механического разрушения.

Нагрев газовыми горелками может использоваться при монтаже и демонтаже деталей, однако он имеет существенные недостатки, заставляющие большинство заводов отказываться от этого способа в пользу индукционного нагрева. Главными недостатками газового нагрева являются: открытое пламя и связанная с этим опасность возгорания или оплавления изоляционных элементов конструкции, возможность недопустимых изменений структуры металла из-за локальных перегревов поверхности деталей, ухудшение условий труда и экологической обстановки в цехе. Кроме того, скорость нагрева газом может быть недостаточна для разъединения деталей при демонтаже, особенно с учетом сложности локализации нагрева детали и практически неизбежного нагрева прилегающих частей конструкции.

Индукционный нагрев на промышленной частоте применяется в двух вариантах: трансформаторном, когда энергия переменного магнитного поля передается от катушки индуктора в нагреваемую деталь через магнитопровод, и в варианте непосредственного помещения нагреваемой детали в катушку индуктора.

Трансформаторный способ с успехом применяется при монтаже, но непригоден для демонтажа деталей. Нагревательная установка трансформаторного типа питается непосредственно от сети без преобразователя частоты, имеет сравнительно небольшие размеры и может быть установлена вблизи монтажного участка; она позволяет нагревать различные насадные детали существенно быстрее, чем в печи. К недостаткам следует отнести невозможность нагрева в ходе проведения такелажных работ по насадке детали, что создает опасность аварийного прерывания процесса из-за преждевременного ее остывания.

Нагрев в индукторе на промышленной частоте производится либо в специализированных индукторах с водяным охлаждением, изготавливаемых для каждой конкретной детали, либо с помощью водоохлаждаемого индуктора-провода, наматываемого на различные нагреваемые детали. Достоинством нагрева в индукторе на промышленной частоте является универсальность – возможность использования и при монтаже, и при демонтаже различных деталей. Недостатки связаны с большими токами индуктора и, следовательно, с большой напряженностью внешнего магнитного поля, которое не только ухудшает экологическую обстановку, но и приводит к вредному нагреву прилегающих стальных деталей, снижающему эффективность нагрева.

Рассматривая эффективность индукционного нагрева на промышленной частоте, необходимо особо выделить из множества насадных деталей бандажные кольца турбогенераторов, которые изготавливаются из немагнитных металлов – легированных сталей, ти-

тановых или алюминиевых сплавов. Глубина проникновения тока в немагнитный металл на промышленной частоте превышает толщину бандажных колец, что обуславливает следующие отрицательные эффекты при нагреве бандажных колец для демонтажа:

- нагрев вала полем через бандажное кольцо, что снижает эффективность операции демонтажа из-за расширения вала и требует повышения температуры нагрева бандажа;

- возникновение электрических разрядов между бандажом и валом при потере контакта (при разъединении бандажа и вала), что ведет к электроискровой эрозии внутренней поверхности бандажа, которая может послужить причиной развития трещин в процессе эксплуатации. Учитывая тяжелый режим эксплуатации бандажных колец и тяжелые последствия аварии при разрыве бандажного кольца, эту опасность безусловно необходимо устранить;

- максимальную температуру в процессе нагрева имеют внутренние слои детали, не доступные для оперативного контроля, поэтому невозможно гарантировать соблюдение безопасного температурного режима нагрева.

Индукционный нагрев на высокой частоте для монтажа и демонтажа крупногабаритных деталей способом горячей посадки сравнительно недавно начал внедряться на электромашиностроительных заводах и электростанциях России. Способ прошел стадии теоретических и экспериментальных исследований, испытаний в промышленных условиях на заводах «Электросила» и «ЛМЗ» ОАО «Силовые машины» и принят в качестве основного при монтаже и демонтаже бандажных колец роторов турбогенераторов и рабочих колес роторов паровых турбин мощностью до 1200 МВт [1], [2]. К настоящему времени выпущено специализированное оборудование ООО «ИНТЕРМ»¹ [3], которое включает в свой состав трансформаторные преобразователи частоты серии ТГИ, работающие в частотном диапазоне 66 кГц, гибкие индукторы из термостойкого провода и медной ленты без водяного охлаждения, а также блоки согласования индукторов с преобразователем частоты.

На рис. 1 показан нагрев двумя ленточными индукторами для снятия с горячей посадки титанового бандажного кольца ротора турбогенератора мощностью 890 МВ·А, а на рис. 2 – нагрев индуктором-проводом для снятия с горячей посадки рабочего колеса ротора паровой турбины с помощью оборудования ООО «ИНТЕРМ».



Рис. 1



Рис. 2

¹ www.interm.su.

Эффективность индукционного нагрева столь крупногабаритных деталей на частоте 66 кГц не очевидна. Как правило, при нагреве массивных деталей применяется более низкая частота для быстрого прогрева глубинных слоев детали, однако при нагреве под горячую посадку время нагрева не играет существенной роли – нагрев производится с низкой удельной мощностью 2...10 Вт/см² и на первый план выступают следующие преимущества высокочастотного индукционного нагрева на частоте 66 кГц:

- глубина проникновения тока меньше толщины нагреваемых деталей, поэтому не прогревается вал и не происходит электроискровая эрозия на границе «вал–деталь»;

- при высокочастотном индукционном нагреве максимальную температуру имеет поверхность детали, где температура доступна для контактного или бесконтактного контроля и регулирования, что позволяет гарантировать качество нагрева, т. е. вести нагрев на предельных скоростях без опасности ухудшения кристаллической структуры металла из-за его перегрева;

- низкие значения токов позволяют использовать гибкие и легкие индукторы без водяного охлаждения. Специально разработанные конструкции индуктора-ленты для нагрева бандажных колец из немагнитных металлов и индуктора-провода для нагрева магнитных стальных деталей работают при естественном воздушном охлаждении, что обеспечивает удобство эксплуатации, а также устраняет опасность попадания воды на элементы конструкции ротора при авариях;

- на более низкой частоте ток индуктора возрастает, что требует водяного охлаждения, обуславливает значительные электродинамические усилия, а также приводит к повышению напряженности магнитного поля, отрицательно влияющего на здоровье обслуживающего персонала;

- на более высокой частоте повышается напряжение на индукторе, что может приводить к высокочастотным разрядам и пробоям, электроискровой эрозии поверхности детали;

- напряженность внешнего магнитного поля индуктора существенно ниже, чем при нагреве на промышленной частоте, что предотвращает нагрев прилегающих деталей, уменьшает радиопомехи и улучшает условия труда и экологическую обстановку в цехе;

- нагрев деталей может производиться непосредственно на месте выполнения операций монтажа или демонтажа ввиду малогабаритности и мобильности оборудования;

- низкое напряжение на индукторе при нагреве бандажного кольца индуктором-лентой и потенциальная развязка индуктора с помощью малогабаритного высокочастотного трансформатора или конденсаторов упрощают изоляцию индуктора, позволяют продолжать нагрев в процессе выполнения такелажных работ и передвижения бандажного кольца на валу, обеспечивают безопасность работы персонала;

- при нагреве магнитной детали многовитковым индуктором с большим межвитковым шагом распределение индуцированного тока в детали выравнивается за счет проведения магнитного потока по магнитной детали, что позволяет использовать индуктор-провод без опасности локального перегрева детали под проводом (полосатого нагрева); преимуществом индуктора-провода является возможность его согласования с источником питания без согласующего высокочастотного трансформатора за счет выбора соответствующей длины провода, а также его универсальность – индуктор-провод одной и той же длины может использоваться при нагреве деталей различного размера;

- автоматизированное высокочастотное нагревательное оборудование ООО «ИНТЕРМ» обеспечивает прецизионный контроль и регулирование температуры нагрева, оперативную графическую визуализацию основных параметров и протоколирование процесса нагрева.

Насадные детали роторов турбогенераторов и паровых турбин имеют сложную форму, различаются материалом (магнитная или немагнитная сталь, титановый или алюминиевый сплав), диаметром и длиной посадочного контакта, натягом, числом мест посадки.

При монтаже целесообразно стремиться к равномерному нагреву бандажного кольца турбогенератора, чтобы увеличить его внутренний диаметр на всей длине, так как необходимо не только насадить кольцо на зубцы ротора, но и обжать лобовые части обмотки. При демонтаже целесообразно нагревать только область посадки так, чтобы бандажное кольцо сошло с зубцов ротора. При этом из-за локального нагрева возникают внутренние напряжения с плавным переходом от расширенного горячего участка к недеформированному холодному. Это явление учитывается в конструкции бандажных колец, в которой предусматривается уменьшение толщины кольца в переходной зоне для снижения внутренних напряжений при нагреве.

Нагреть деталь равномерно по всему объему можно только в печи. При этом температура нагрева до требуемого расширения может быть определена по формуле

$$T = \Delta D / (\alpha D), \quad (1)$$

где D – диаметр отверстия нагреваемой детали при температуре 20 °С; ΔD – требуемое увеличение диаметра отверстия при нагреве; α – коэффициент линейного расширения металла, °С⁻¹, который берется из справочной литературы [4], [5].

При индукционном нагреве температурное поле неравномерно как в процессе нагрева, так и во время проведения операции монтажа или демонтажа. При этом для достижения требуемого расширения средняя температура детали, а следовательно, и ее теплосодержание, должны быть больше, чем при равномерном нагреве, из-за внутренних механических напряжений и деформаций. В таком случае значение температуры, полученное по формуле, является оценкой снизу. Кроме того, при снятии детали с посадки до потери контакта между деталью и валом происходит передача тепла в вал, что ведет к его расширению. Тогда оценка (1) представляет собой минимальную разницу температур между валом и деталью (в случае одинаковых коэффициентов линейного расширения материалов детали и вала).

Достаточно точные оценки достижения требуемых деформаций при ограничениях температуры нагрева дает компьютерное моделирование – численное решение взаимосвязанных электромагнитных, тепловых и деформационных задач при точном задании формы и свойств материала детали и индуктора. По этой причине при отработке технологии нагрева для монтажа и демонтажа сложных деталей способом горячей посадки целесообразно использовать компьютерное моделирование. Модели позволяют оптимизировать параметры индукционной системы и режима нагрева и дать рекомендации для практики.

При разработке модели необходимо учитывать, что электромагнитные свойства материалов мало изменяются при нагреве в пределах допустимого диапазона температур (20..450 °С) и необходимости в частом пересчете электромагнитной задачи нет. Кроме того, настил тока при нагреве деталей из немагнитных материалов индуктором-лентой и при нагреве деталей из магнитных материалов индуктором-проводом достаточно равномерен, а глубина проникновения относительно невелика, поэтому с небольшой погрешностью можно рассчитывать структурно-тепловую задачу без расчета электромагнитной, приняв постоянной удельную мощность, приложенную к нагреваемым поверхностям.

При оценке реальной удельной поверхностной мощности нужно учесть, что электрический КПД системы «индуктор-провод – магнитная деталь» составляет около 95 %, а КПД системы «индуктор-лента – немагнитная деталь» – около 80 %.

Для оценки погрешности модели был выполнен эксперимент, данные которого – график мощности нагрева, форма и размеры детали и индуктора, а также свойства материалов – использованы при моделировании. На рис. 3 показаны результаты – расчетные и экспериментальные графики мощности (кривая 1) и температуры бандажного кольца под индуктором-лентой (кривая 2 – экспериментальная, кривая 3 – расчетная). Расчеты выполнены в программном комплексе ANSYS [6]. Отклонение расчетных результатов от экспериментальных не превышает 10 %, что говорит об адекватности моделей и возможности использования результатов моделирования для выработки практических рекомендаций и разработки технологии нагрева.

Примером таких рекомендаций, выработанных на базе компьютерного моделирования, могут служить представленные на рис. 4 зависимости от мощности нагрева двух важных параметров – времени снятия с посадки рабочего колеса ротора турбины массой 3200 кг (кривая 1) и максимальной температуры нагрева колеса в момент его освобождения (кривая 2). Решалась задача нагрева рабочего колеса тремя индукторами при одинаковой мощности в каждом из них. По графикам можно оценить оптимальный диапазон возможной мощности нагрева – от 30 до 40 кВт каждым индуктором, в котором операция демонтажа рабочего колеса происходит без его перегрева выше 430 °С. При снижении или повышении мощности нагрева разъединение рабочего колеса и вала происходит при более высоких температурах, которые могут ухудшить кристаллическую структуру металла. При мощности 30 кВт время нагрева составляет 3 ч 10 мин, а при 40 кВт – 1 ч 40 мин.

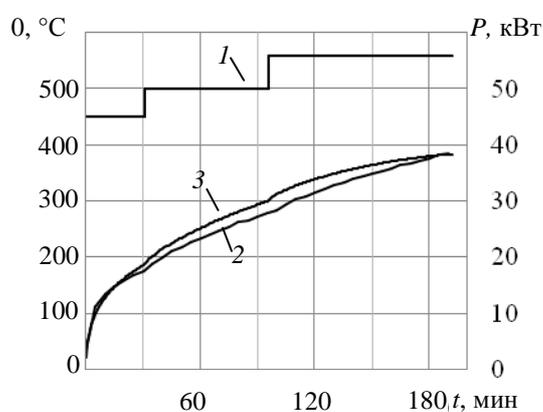


Рис. 3

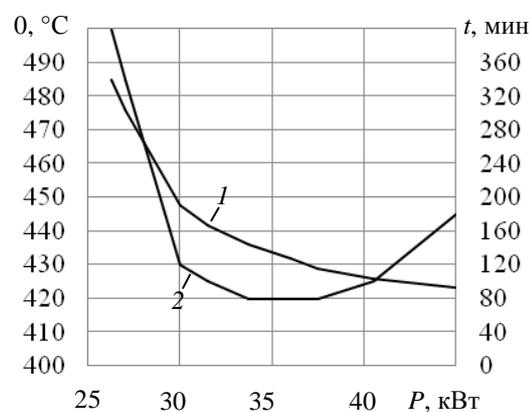


Рис. 4

Ясно, что при технической возможности нагрева на максимальной мощности из допустимого диапазона этот режим предпочтителен, однако возможно проведение операции и при нагреве на мощности 30 кВт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исследование нагрева бандажей роторов турбогенераторов высокочастотным индукционным методом / И. А. Кади-Оглы, О. Л. Кийло, С. В. Дзлиев, И. В. Позняк // *Электричество*. 2003. № 5. С. 23–31.
2. Пат. РФ № 2251823. Гибкий индуктор для нагрева цилиндрических тел. H05B / С. В. Дзлиев, И. А. Кади-Оглы, О. Л. Кийло; опубл.: 10 мая 2005.
3. Дзлиев С. В. Источники питания индукционных нагревательных комплексов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2009. 214 с.

4. Марочник сталей и сплавов / Под ред. А. С. Зубченко. М.: Машиностроение-1, 2003. 784 с.
5. Смирягин А. П. Промышленные цветные металлы и сплавы. М.: Metallurgizdat, 1956. 560 с.
6. Красновский Е. Е. Решение прикладных задач термомеханики с применением программного комплекса ANSYS. Методические указания. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008.

S. V. Dzliev, K. E. Pischalev, D. M. Zhnakin, Yu. Yu. Perevalov

HIGH-FREQUENCY INDUCTION HEATING OF LARGE-SIZED DETAILS

In this article examined problems of heating of large-sized machine parts (bandaging rings of turbogenerators and working wheels of steam turbines) for mounting and dismounting onto shaft using shrink fit. Justified the advantages of high-frequency induction heating as compared with heating in a furnace, gas heating and induction heating at 50 Hz. Shown results of modeling and experimental studies on industrial sites.

High-frequency induction heating, shrink fit, bandaging rings of turbogenerators, working wheels of steam turbines



УДК 534.8

А. В. Осетров, Нгуен Ван Шо

ОСОБЕННОСТИ ЗАДАНИЯ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ В ЗАДАЧЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН ПРИ НАЛИЧИИ ЭЛЕКТРОДОВ

Рассматривается задача распространения поверхностных акустических волн (ПАВ) в полубесконечной пьезоэлектрической среде при наличии электродов, решаемая с применением метода конечных элементов (МКЭ). Сформулированы граничные условия, используемые при решении задачи с периодической структурой электродов. Предложен способ задания граничных условий для получения кривой дисперсии. Анализируются физические явления, возникающие при рассогласовании периода ПАВ с периодом системы электродов.

Поверхностная акустическая волна, акустоэлектроника, метод конечных элементов

Рассмотрим способы решения задачи распространения ПАВ в полубезграничной пьезоэлектрической среде при наличии металлических электродов (рис. 1), используя МКЭ. На рис. 1 λ обозначает длину условно показанной ПАВ; T_3 – период системы электродов (в частном случае электродов одинаковых размеров с чередующейся полярностью иногда в качестве геометрического периода структуры электродов рассматривают $p = T_3 / 2$).

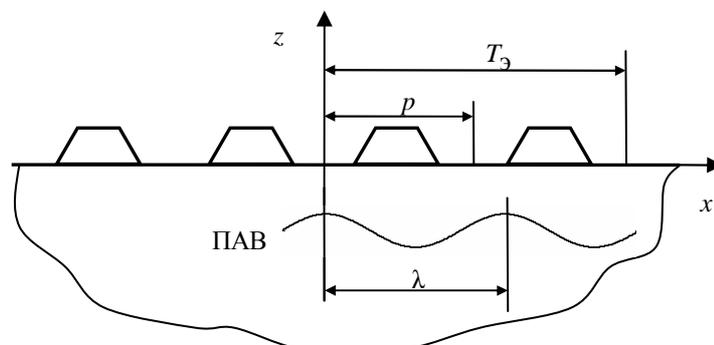


Рис. 1

Известен порядок решения такой задачи при совпадении периода ПАВ λ с периодом системы электродов T_3 [1]. Для этого частного случая достаточно рассмотреть один геометрический период (рис. 2) и решать задачу нахождения собственных частот такой области.

При решении МКЭ образуются две основные собственные частоты, соответствующие двум скоростям ПАВ, которые могут существовать без затухания в такой системе. Однако в реальных устройствах, работающих в определенном диапазоне частот, условие $\lambda = T_3$ нельзя считать всегда выполненным и требуется проанализировать поле ПАВ при $\lambda \neq T_3$. В [2] предложен способ решения подобной задачи, требующий значительных изменений стандартного МКЭ; это приводит к необходимости использования специализированного программного обеспечения. В данной статье сформулирован подход, позволяющий численно решать такую задачу с помощью широкодоступного программного обеспечения, использующего МКЭ. Для проведения расчетов использован пакет COMSOL.

Существенной особенностью решения рассматриваемой задачи является сведение бесконечной по протяженности системы (рис. 1) к конечной области, необходимой для использования МКЭ. При этом ключевым моментом является формулировка граничных условий, позволяющих выполнить такую трансформацию.

Вначале рассмотрим граничные условия при $\lambda = 2p$. При решении задаем область, равную одному пространственному периоду по координате x и величине, достаточной для затухания ПАВ по координате z (рис. 2), где w , h , θ – ширина, высота и угол наклона электродов соответственно (без принципиальных изменений для последующего решения можно вводить другую форму и/или расположение электродов); Ω_1 – область пьезоэлектрической подложки; Ω_2 и Ω_3 – области металлических электродов; $\Gamma_1, \dots, \Gamma_4$ – границы областей.

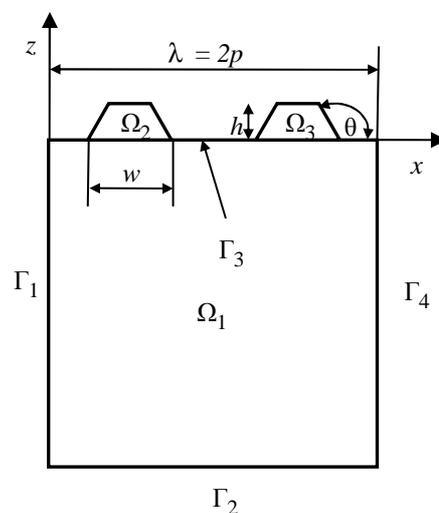


Рис. 2

При переходе к такой модели предполагается наличие двух ПАВ, распространяющихся в противоположных направлениях, взаимно подпитывающих друг друга за счет переотражения от электродов и совместно образующих стоячую волну. Согласно условию Брэгга [3] связь между этими двумя волнами наиболее сильна, когда выполняется условие: $n\lambda = 2p$, где n – натуральное число. Чаще всего рассматривается случай $n = 1$, т. е. $\lambda = 2p$.

Следует подчеркнуть, что ПАВ в пьезоэлектриках, использующихся в акустоэлектронике, обычно не обладают сагиттальной поляризацией. Возможность учета всех трех компонент механического смещения отсутствует в моде “*piezo plane strain application*” па-

кета COMSOL Multiphysics [1]. В [4] показано, как можно учесть все 3 ненулевые компоненты вектора смещения. В данной статье используется подход, предложенный в [4], при этом задача сведена к обобщенной системе дифференциальных уравнений, допускающей решение в моде PDE пакета COMSOL Multiphysics, имеющей следующий вид:

$$\mathbf{ea} \cdot \omega^2 \cdot \mathbf{u} - \nabla \cdot (\mathbf{c} \nabla \mathbf{u}) = 0 \quad \text{в } \Omega, \quad (1)$$

$$\mathbf{n}(\mathbf{c} \nabla \mathbf{u}) + \mathbf{qu} = \mathbf{g} \quad \text{на } \partial\Omega, \quad (2)$$

$$\mathbf{hu} = \mathbf{r} \quad \text{на } \partial\Omega, \quad (3)$$

где Ω – расчетная область вычисления (в данной задаче $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3$); $\partial\Omega$ – внешняя граница области Ω ; ∇ – оператор набла; $\mathbf{u} = (U_1, U_2, U_3, \varphi)^T$ – вектор переменных (U_i – компоненты механического смещения, φ – электрический потенциал); T – символ транспонирования; ω – угловая частота; \mathbf{g} , \mathbf{r} – векторы размерности N (N – число независимых переменных, для рассматриваемой задачи $N = 4$, что соответствует трем компонентам вектора механического смещения и электрическому потенциалу); \mathbf{ea} , \mathbf{q} , \mathbf{h} , \mathbf{c} – матрицы размера $N \times N$, причем элементы \mathbf{c}_{lk} есть матрицы размера $m \times m$ (m – число пространственных переменных); \mathbf{n} – внешняя нормаль границы области.

Уравнения (2) и (3) для внешних границ дополняются следующими уравнениями для внутренних границ между областями Ω_i и Ω_j :

$$\begin{cases} \mathbf{n} \left((\mathbf{c} \nabla \mathbf{u})|_{\Omega_i} - (\mathbf{c} \nabla \mathbf{u})|_{\Omega_j} \right) + \mathbf{qu} = \mathbf{g}, \\ \mathbf{hu} = \mathbf{r}. \end{cases} \quad (4)$$

Выражения для параметров, входящих в уравнение (1), полностью представлены в [4], поэтому здесь рассматриваются только граничные условия Неймана и Дирихле, описываемые уравнениями (2) и (3) для внешних границ соответственно и уравнениями (4) для внутренних границ.

Матрицы \mathbf{c} и \mathbf{ea} выбираются таким образом, чтобы уравнение (1) сводилось к уравнениям задачи распространения волн в пьезоэлектриках [4]:

$$\begin{cases} -\rho \omega^2 U_i = \frac{\partial T_{ik}}{\partial x_k} \quad (i, k = 1, 2, 3), \\ \frac{\partial D_i}{\partial x_i} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где \mathbf{T} – тензор напряжений; \mathbf{D} – вектор индукции электрического поля; ρ – плотность среды. Сопоставляя (1) и (5) получаем:

$$\mathbf{ea} = \begin{pmatrix} -\rho & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\rho & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\rho & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Выразим слагаемое $\nabla \cdot (\mathbf{c}\nabla\mathbf{u})$, входящее в (1). Последовательно подставляя (6) в (1) и учитывая (5) получаем:

$$\nabla \cdot (\mathbf{c}\nabla\mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_{ik}}{\partial x_k} \\ \frac{\partial D_i}{\partial x_i} \end{bmatrix}.$$

Следовательно, первое слагаемое в (2) можно представить в виде

$$\mathbf{n}(\mathbf{c}\nabla\mathbf{u}) = \begin{bmatrix} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} \\ \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Рассмотрим порядок формулирования граничных условий для различных границ, показанных на рис. 2.

- На границах Γ_1 и Γ_4 задаются периодические граничные условия:

$$\begin{cases} U_i|_{\Gamma_1} = U_i|_{\Gamma_4}, & i = 1, 2, 3, \\ \Phi|_{\Gamma_1} = \Phi|_{\Gamma_4}. \end{cases}$$

• На нижней границе Γ_2 , для того чтобы задать нулевые механическое смещение и электрический потенциал, нужно выбрать условие Дирихле $\mathbf{u} = 0$. Это обеспечивается, если задать \mathbf{h} в (3) единичной матрицей четвертого ранга и \mathbf{r} – нулевым вектором.

• На границах свободной поверхности $T_{ij}n_j|_{\Gamma_3} = 0$ ($i = 1, 2, 3$) и $D_j n_j|_{\Gamma_3} = 0$, или в матричной записи $\begin{bmatrix} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} \\ \mathbf{D} \cdot \mathbf{n} \end{bmatrix} = 0$. Для обеспечения этих соотношений выбираем граничное условие

Неймана (2), задавая коэффициенты \mathbf{q} и \mathbf{g} нулевыми, а \mathbf{c} – как для уравнения (1) (см. выражения, выведенные в [4]). Тогда последнее выражение непосредственно следует из (2) и (7).

• На общей границе раздела областей электродов Ω_2 , Ω_3 и подложки Ω_1 используется система граничных условий (4). Общая граница подложки и электродов одновременно является внутренней границей для механических граничных условий (что позволяет учесть механическую нагрузку электродов или так называемый *mass loading effect*) и внешней границей для электрических граничных условий (если задавать электрический потенциал для каждого из металлических электродов). Для этого зададим в (4) $\mathbf{q} = 0$; $\mathbf{g} = 0$ и

$$\mathbf{h} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{r} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ V_0 \end{pmatrix}.$$

Тогда из (4) и (7) получаем:

$$\mathbf{T}|_{\Omega_1} \cdot \mathbf{n}|_{\Omega_1} = -\mathbf{T}|_{\Omega_2} \cdot \mathbf{n}|_{\Omega_2}; \quad \Phi = V_0.$$

Возможность учета эффекта механической нагрузки электродов отсутствует в моде «piezo plane strain application» [1]. Таким образом, существующее в моде «piezo plane strain application» ограничение о неполном наборе граничных условий оказывается преодоленным в рассматриваемом подходе.

Задача нахождения собственных частот ПАВ в случае удовлетворения условия Брэгга с учетом всех трех компонент смещения решена в работе [4]. При этом существуют две собственные частоты, соответствующие двум ПАВ. В качестве иллюстрации на рис. 3 приведены результаты вычислений собственных частот для среза 128° YX- LiNbO_3 с геометрическими параметрами алюминиевых электродов (см. рис. 2): $h = 250$ нм, $p = 4$ мкм, $w/p = 0.5$ (коэффициент металлизации) и переменным углом θ ; материальные константы среза ниобата лития взяты из [5].

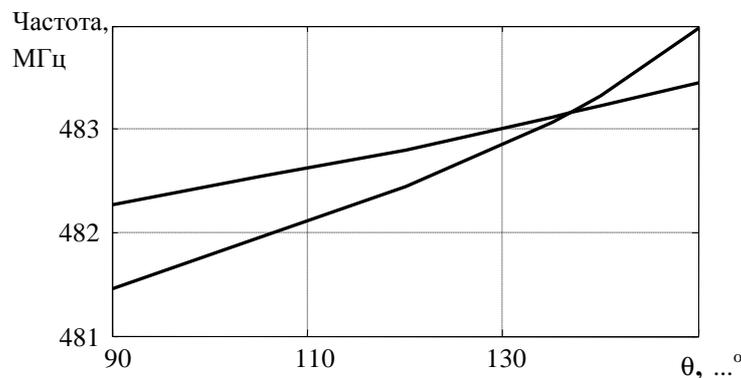


Рис. 3

Следует отметить, что коэффициент отражения ПАВ от системы электродов пропорционален модулю разности двух собственных частот $\Delta f = |f_1 - f_2|$ [6], [7]. Из рис. 3 видно, что при $\theta \approx 137^\circ$ кривые пересекаются, т. е. $\Delta f = 0$ и, следовательно, коэффициент отражения стремится к нулю.

Перейдем к рассмотрению задачи нахождения собственных частот в случае нарушения условия Брэгга, т. е. когда $\lambda \neq 2p$. Введем безразмерный параметр $b = \frac{T_3}{\lambda}$, описывающий отношение периода системы электродов к длине волны ПАВ, а саму ПАВ представим в виде

$$\mathbf{u}(x, z) = \mathbf{u}_0(z) e^{j(\omega t - \beta x)} e^{-\alpha x}, \quad (8)$$

где α – коэффициент затухания ПАВ в направлении распространения (вдоль оси x); β – волновое число ПАВ. Заметим, что в [2] предложено использовать такую же геометрическую модель, как и на рис. 2, но формулировать периодические граничные условия как $\mathbf{u}(x+p) = \mathbf{u}(x) e^{-\gamma p}$, где $\gamma = \alpha + j\beta$, что непосредственно следует из (8), если выбрать координату $x+p$. Однако данное граничное условие не удается совместить с уравнениями (1)–(3), «зашитыми» в COMSOL, поэтому в данной статье предлагается другой подход.

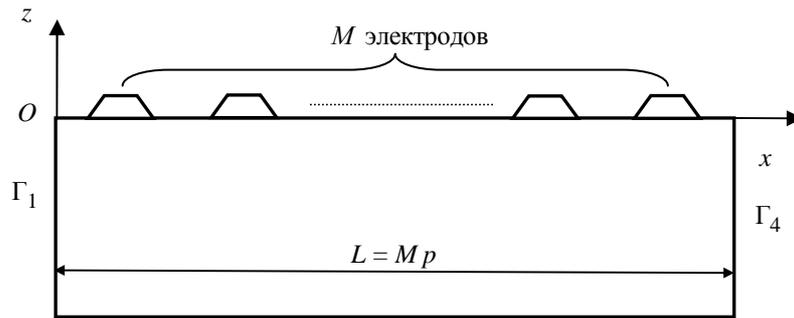


Рис. 4

Рассмотрим модель (рис. 4) пространственной протяженностью $L = Mp$, где M – целое число, определяющее число электродов, укладываемых на длине L (обобщающую модель, показанную на рис. 2, и соответствующую значениям $M = 2$ и $b = 1$). Для границ Γ_1 и Γ_4 задаем периодические граничные условия $\mathbf{u}|_{\Gamma_1} = \pm \mathbf{u}|_{\Gamma_4}$, где знак «+» соответствует случаю, когда длина структуры L кратна длине волны λ (т. е. $L = n\lambda$, n – целое число), а знак «-» соответствует случаю, когда $L = (n + 1/2)\lambda$. Все остальные граничные условия зададим аналогично модели для случая $b = 1$. Будем решать такую же задачу МКЭ с нахождением собственных частот, которых окажется тем больше, чем больше значение M . Для каждой собственной частоты, соответствующей ПАВ, по виду поля можно определить число полупериодов волны, укладываемых на длине L , т. е. целое число N , соответствующее условию $L = N\lambda/2$. Тогда значение b для данной собственной частоты определится по формуле: $b = N/M$. Выбирая разные собственные частоты можно найти конечный дискретный ряд значений b и построить дисперсионную кривую. Очевидно, что шаг дискретного ряда по параметру b будет определяться числом M .

В качестве примера рассмотрим случай $M = 10$ и $N = 8$, т. е. когда в системе из 10 электродов укладывается 4 длины волны ПАВ (рис. 5, на котором сплошной линией показан пример распределения поля третьей компоненты вектора смещения U_3 , а пунктирной линией условно изображена структура электродов); в этом случае $b = 0.8$.

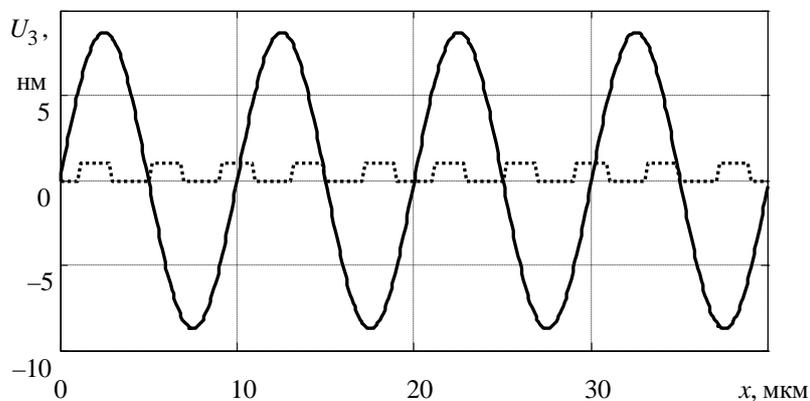


Рис. 5

Таким образом, выбирая решения с разным числом периодов ПАВ на расстоянии L можно рассчитать собственные частоты для всех значений b от 0.1 до 1.9 с шагом 0.1. При необходимости выбора меньшего значения шага следует изменить число M . Например, при $M = 100$ можно обеспечить шаг по b , равный 0.01.

Результаты вычислений для ST-Х-среза кварца (материальные константы взяты из [8]) показаны на рис. 6. При этом сплошная линия соответствует случаю наличия алюминиевых электродов с параметрами: $h = 250$ нм, $p = 4$ мкм, $\theta = 90^\circ$ и коэффициентом металлизации $w/p = 0.5$, а пунктирная линия – случаю без электродов (свободная поверхность).

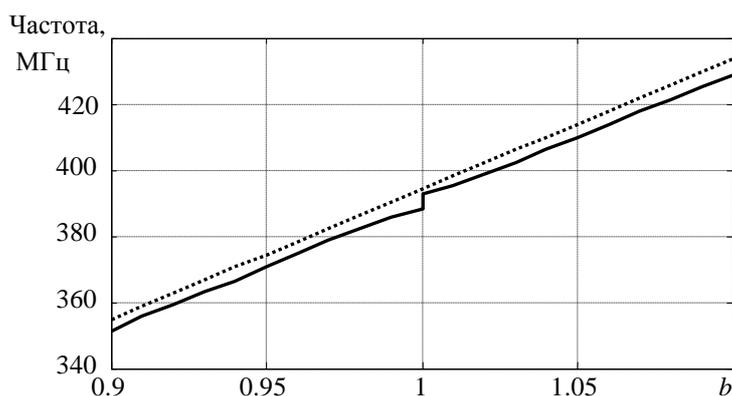


Рис. 6

Видно, что для свободной поверхности собственная частота решения линейно зависит от значения b , т. е. скорость ПАВ не изменяется, и дисперсия отсутствует. При наличии электродов дисперсия всегда существует, причем она максимальна в области, где b близко к единице. Когда $b = 1$, т. е. выполняется условие Брэгга, существуют две собственные частоты, соответствующие двум различным ПАВ с разными фазовыми скоростями. Если $b \neq 1$, существует только одна собственная частота, т. е. только ПАВ с одним значением фазовой скорости может распространяться вдоль поверхности пьезоэлектрика без затухания; фактически это означает, что дисперсионная кривая терпит конечный разрыв при $b = 1$. Это можно объяснить тем, что волна, распространяющаяся вдоль поверхности, не может полностью синфазно интерферировать со своей отраженной от электродов частью, поскольку условие Брэгга не выполняется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осетров А. В., Нгуен В. Ш. Анализ поверхностных акустических волн в области встречно-штыревого преобразователя // Изв. СПбГЭТУ "ЛЭТИ". 2011. Вып. 1. С. 81–88.
2. Finite-element simulation of wave propagation in periodic piezoelectric SAW structures / M. Hofer, N. Finger, G. Kovacs, et al. // IEEE Trans. UFFC. 2006. Vol. 53, № 6. P. 1192–1201.
3. Bragg W. L. The Diffraction of Short Electromagnetic Waves by a Crystal // Proc. of the Cambridge Philosophical Society. 1913. № 17. P. 43–57.
4. Осетров А. В., Нгуен В. Ш. Расчет параметров поверхностных акустических волн в пьезоэлектриках методом конечных элементов // Вычислительная механика сплошных сред. 2011. Т. 4, № 4. С. 71–80.
5. Improved material constants for LiNbO₃ and LiTaO₃ / G. Kovacs, M. Anhorn, H.E. Engan et al. // IEEE Ultras. Symp. 1990. P. 435–438.
6. Chen D. P., Haus H. A. Analysis of metal strip SAW gratings and transducers // IEEE SU. 1985. Vol. 32. P. 395–408.

7. Morgan D. Surface acoustic wave filters with applications to electronic communications and signal processing. Elsevier, 2007.
8. Auld B. A. Acoustic Fields and Waves in Solids. Vol. 1, 2nd ed. Melbourne, FL: Krieger, 1990.

A. V. Osetrov, Nguyen Van So

THE FEATURES OF BOUNDARY CONDITION FORMULATION FOR PROBLEM OF SURFACE ACOUSTIC WAVE PROPAGATION IN THE PRESENCE OF ELECTRODES

The problem of propagation of surface acoustic waves (SAW) in a semi-infinite piezoelectric medium in the presence of the electrodes using the finite element method is considered. The boundary conditions used in solving the problem with a periodic structure of electrodes are formulated. We proposed a method of setting periodic boundary conditions to obtain the dispersion curve. The physical phenomena occurring because of disagreement between the SAW-period and the period of system of electrodes are analyzed.

Surface acoustic wave, acoustoelectronics, finite element method

УДК 681.513.6:681:513.3

Б. Я. Авдеев

**ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА ОДНОГО КЛАССА
АДАПТИВНОЙ КОММУТАЦИИ
В ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМАХ
(АНАЛИЗ, ПРЕДЕЛЬНЫЕ ОЦЕНКИ)***

Рассматривается класс адаптивной коммутации сигналов в информационно-измерительных системах, основанный на оценке максимальной текущей погрешности аппроксимации. Предлагаются результаты анализа и предельные оценки характеристик.

Адаптивная и регулярная коммутация в информационно-измерительных системах, восстановление сигналов по дискретным отсчетам, погрешности аппроксимации

Как показано в [1], основные характеристики адаптивной коммутации по критерию текущей погрешности аппроксимации сигналов в многоканальных информационно-измерительных системах (ИИС) могут быть определены на основании решения нелинейных интегродифференциальных уравнений (см. формулы (6), (7) в [1]), описывающих стационарное состояние адаптивного коммутатора. В общем виде аналитического решения эти уравнения не имеют. Численные методы позволяют решить данные уравнения для конкретных совокупностей входных сигналов адаптивной ИИС. В силу адаптивного характера коммутации изменение текущих характеристик сигналов приводит к перераспределению частоты опроса между сигналами в соответствии с их «активностью» [1], [2], что, как вытекает из решений указанных уравнений, может в первую очередь сказаться на погрешности дискретного представления сигналов в ИИС.

В связи с этим представляется важным определить некоторые потенциальные свойства, позволяющие показать принципиальные возможности адаптивной коммутации и тем самым оценить целесообразность применения метода при практической реализации.

Прежде всего следует отметить важную для практики особенность адаптивных ИИС. В таких системах легко реализуется метрологическое сопровождение за счет передачи текущих значений погрешностей аппроксимации, имеющих по принципу работы

* Окончание. Начало см. в [1].

коммутатора в дискриминаторе самой системы (см. рис. 1 в [1]), путем выделения определенных позиций в структуре кадра ИИС или выделения отдельного канала для передачи текущей погрешности.

Оценку характеристик адаптивной коммутации удобно представить в относительных величинах, сравнивая рассматриваемые характеристики ИИС с адаптивной коммутацией и ИИС с регулярной коммутацией при одинаковом числе каналов N , частоте коммутации $F_{р.к} = F_{а.к}$ и одинаковой загрузке по входным сигналам. При таком представлении легко оценить достоинства и недостатки адаптивной коммутации относительно регулярной.

Возможны 2 крайних случая “загрузки” адаптивного коммутатора:

- Все N каналов максимально загружены; под такой загрузкой понимается одинаковая загрузка каналов системы с равномерной дискретизацией такими сигналами, при которых для $F_{р.к} = F_{а.к}$ в каждом канале наблюдается максимально допустимая погрешность аппроксимации, равная $\max \epsilon_p$.

- Активным является один из всех N каналов адаптивного коммутатора.

Рассмотрим оба случая подробно.

1. Максимальная загрузка адаптивного коммутатора. Для максимальной загрузки результаты решения уравнений (6), (7) представлены на рис. 3, 4 [1]. Кривые при $N = 1$ соответствуют распределению погрешности аппроксимации ϵ_p при равномерной дискретизации.

Поскольку на оси абсцисс отложено отношение $\epsilon_a / \max \epsilon_p$, то эти же кривые являются распределением погрешности аппроксимации ϵ_p для любого числа каналов N при регулярной коммутации с частотой $F_{а.к}$. Поэтому кривая $N = 1$ и любая другая рассматриваемая кривая ($N \neq 1$) дают картину относительного изменения погрешности ϵ_a при адаптивной коммутации по сравнению с равномерной при $F_{а.к} = F_{р.к}$. Анализ распределений $F_H(\epsilon)$ показывает, что законы распределения погрешности аппроксимации ϵ_a при адаптивной коммутации существенно отличаются от соответствующих законов при равномерной дискретизации.

С увеличением числа каналов N наблюдаются следующие тенденции изменения распределений погрешностей ϵ_a при адаптивной коммутации:

- уменьшается вероятность появления больших и малых погрешностей;
- дисперсия законов распределений с увеличением N уменьшается;
- математическое ожидание $m[\epsilon_a]$ практически остается на постоянном уровне.

На рис. 1, 2 приведены зависимости отношения среднеквадратических значений $\sigma[\epsilon_a] / \sigma[\epsilon_p]$ модулей погрешностей при адаптивной и регулярной коммутации от числа коммутируемых каналов для различных законов распределения $(n + 1)$ -й производной при нулевой ($n = 0$) и линейной ($n = 1$) аппроксимации сигналов, где НЗ – нормальный закон, ЗА – закон арксинуса, РЗ – равномерный закон, ЗС – закон Симпсона, ЭЗ – экспоненциальный закон.

Для практического расчета можно определить мажорирующую функцию отношения $\sigma[\epsilon_a] / \sigma[\epsilon_p]$ для рассматриваемого класса законов распределения производных:

$$\text{при } n = 0 \quad \sigma[\epsilon_a] \leq \sigma[\epsilon_p] \frac{5}{N + 4}, \quad \sigma[\epsilon_a] \leq \max \epsilon_p \frac{k_\sigma \cdot 5}{N + 4}; \quad (1)$$

$$\text{при } n = 1 \quad \sigma[\varepsilon_a] \leq \sigma[\varepsilon_p] \frac{10}{N+9}, \quad \sigma[\varepsilon_a] \leq \max \varepsilon_p \frac{k_\sigma \cdot 10}{N+9}, \quad (2)$$

где $k_\sigma = \sigma[\varepsilon_a] / \max \varepsilon_p$.

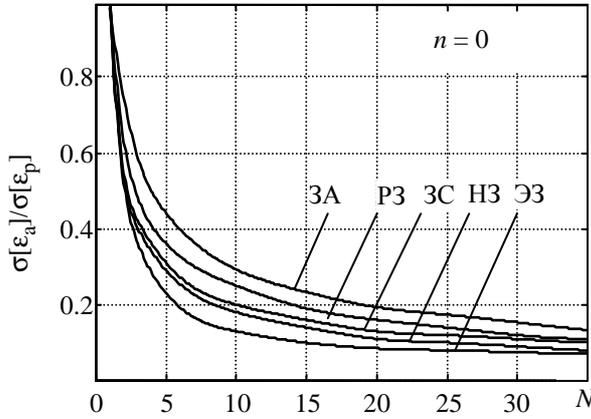


Рис. 1

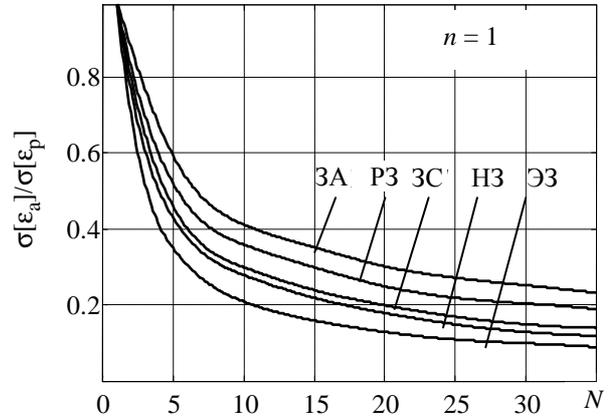


Рис. 2

Выражения (1) и (2) могут быть использованы для практической оценки дисперсии законов распределения погрешностей аппроксимации при адаптивной коммутации.

При увеличении числа каналов дисперсия погрешности достаточно быстро стремится к нулю:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \sigma[\varepsilon_a] = 0. \quad (3)$$

Теперь рассмотрим поведение математического ожидания относительной погрешности аппроксимации при адаптивной коммутации.

На каждом интервале дискретизации справедливо соотношение [3]

$$\varepsilon = M_{n+1} \Delta t^{n+1} / k = M_{n+1} / (k f^{n+1}), \quad (4)$$

где ε – погрешность аппроксимации кривой сигнала полиномом n -й степени; M_{n+1} – модуль производной на интервале Δt представления; $f = 1/\Delta t$ – мгновенная частота дискретизации; k – коэффициент, определяемый видом и порядком полинома представления.

Для равномерной дискретизации с частотой $f = f_p$ из (4) получим

$$m[\varepsilon_p] = m[M_{n+1}] / (k f_p^{n+1}), \quad f_p = {}^{n+1}\sqrt{\frac{m[M_{n+1}]}{k m[\varepsilon_p]}}. \quad (5)$$

Здесь и далее $m[\]$ – символ математического ожидания).

При адаптивной коммутации на уровне погрешности ε_a , считая ε_a и M_{n+1} для адаптивной коммутации независимыми, математическое ожидание частоты дискретизации в каждом канале

$$m[f_a] = m\left[{}^{n+1}\sqrt{M_{n+1}/(k\varepsilon_a)}\right], \quad m[f_a] = \frac{1}{\sqrt{k}} m\left[{}^{n+1}\sqrt{M_{n+1}}\right] m\left[\frac{1}{{}^{n+1}\sqrt{\varepsilon_a}}\right]. \quad (6)$$

При одинаковой загрузке всех каналов адаптивной системы

$$m[f_a] = F_{a.к} / N = f_p . \quad (7)$$

Как следует из (3), при увеличении числа каналов ($N \rightarrow \infty$) дисперсия погрешности $D[\varepsilon_a] \rightarrow 0$, т. е. ε_a в пределе является постоянной величиной. Следовательно,

$$\lim_{N \rightarrow \infty} m[f_a] = m[f_a] = \frac{m\left[\sqrt[n+1]{M_{n+1}}\right]}{n+1 \sqrt{km[\varepsilon_a]}} . \quad (8)$$

На основании (5)–(8) получим

$$\frac{m[\varepsilon_a]}{m[\varepsilon_p]} = \frac{\left\{m\left[\sqrt[n+1]{M_{n+1}}\right]\right\}^{n+1}}{m[M_{n+1}]} .$$

Тогда для $n = 0$

$$\frac{m[\varepsilon_a]}{m[\varepsilon_p]} = 1 ,$$

для $n = 1$

$$\frac{m[\varepsilon_a]}{m[\varepsilon_p]} = \frac{\left\{m\left[\sqrt{M_2}\right]\right\}^2}{m[M_2]} .$$

Так, для нормального закона при $n = 1$

$$\frac{m[\varepsilon_a]}{m[\varepsilon_p]} = 0,85 .$$

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы.

При неограниченном увеличении числа каналов N плотность распределения модуля максимальных на интервалах дискретизации погрешностей аппроксимации при адаптивной коммутации стремится к дельта-функции в точке, определяемой $m[\varepsilon_a]$:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} W(\varepsilon_a) \rightarrow \delta(m[\varepsilon_a]) .$$

Это означает, что при $N \rightarrow \infty$ адаптивная коммутация стремится к режиму адаптивной дискретизации на уровне погрешности, равной $m[\varepsilon_a]$.

Уменьшение погрешности аппроксимации является принципиальным отличием адаптивной коммутации от соответствующей по параметрам ($N_{a.к} = N_{p.к}$, $F_{a.к} = F_{p.к}$) регулярной коммутации.

В таблице приведены предельные ($N \rightarrow \infty$) оценки уменьшения погрешности аппроксимации при адаптивной коммутации по сравнению с регулярной для максимальной загрузки.

Порядок полинома аппроксимации	Вид закона				
	Нормальный	Экспоненциальный	Симпсона	Равномерный	Арксинуса
$n = 0$	3.75	5	3	2	1.57
$n = 1$	4.4	6.3	3.5	2.25	1.7

Режим максимальной загрузки системы в большей степени является теоретической абстракцией, чем отражением реально существующих ансамблей входных сигналов, кроме, возможно, аварийных или иных экстремальных ситуаций поведения исследуемых объектов.

При реальных сигналах и конечном числе каналов системы выигрыш по погрешности будет большим, но при этом необходимо учитывать увеличение дисперсии закона распределения погрешности аппроксимации по приведенной ранее оценочной методике или решая соответствующее интегродифференциальное уравнение [1].

«Выигрыш» в погрешности может быть использован для уменьшения частоты коммутации, расширения частотного диапазона входных сигналов и ряда других показателей работы адаптивной системы.

2. *Активным является один из всех N каналов адаптивного коммутатора.* При равномерной коммутации все каналы опрашиваются с постоянной, не зависящей от активности канала, частотой. Если частота равномерной коммутации $F_{р.к} = F_{а.к}$, то в каждом канале осуществляется равномерная дискретизация с частотой, равной $F_{р.к} / N$. При этом максимальная погрешность аппроксимации

$$\max \epsilon_p = \frac{\max M_{n+1} N^{n+1}}{k F_{р.к}^{n+1}} . \quad (9)$$

При адаптивной коммутации в рассматриваемом случае будет опрашиваться только один активный канал с частотой равномерной дискретизации f , равной частоте адаптивной коммутации в ИИС: $f = F_{а.к}$. Тогда максимальная погрешность аппроксимации кривой сигнала полиномом n -й степени

$$\max \epsilon_a = \frac{\max M_{n+1}}{k F_a^{n+1}} . \quad (10)$$

Из (9) и (10) следует

$$\frac{\max \epsilon_a}{\max \epsilon_p} = \frac{1}{N^{n+1}} . \quad (11)$$

Очевидно, что в этом случае при прочих равных условиях погрешность в адаптивной системе будет существенно меньше, чем в регулярной.

Представляет интерес возможность расширения частотного диапазона входных сигналов при максимально допустимой погрешности аппроксимации. Для этого оценим (по Бернштейну) максимум модуля соответствующей производной сигналов: $(\max M_{n+1})_a = \omega_a^{n+1} A$, $(\max M_{n+1})_p = \omega_p^{n+1} A$, где ω_a, ω_p – соответственно максимальная частота в спектре входного сигнала для адаптивной и регулярной коммутации; A – максимальная амплитуда сигналов. Подставляя эти оценки в (9) и (11), получаем

$$\frac{\omega_a}{\omega_p} = N \quad \text{при} \quad F_p = F_a, \quad \max \epsilon_a = \max \epsilon_p,$$

т. е. частотный диапазон расширяется в число каналов раз.

Подводя итог, можно отметить следующее. Предельные оценки характеристик адаптивной коммутации, в первую очередь погрешностей аппроксимации, определяют возможный диапазон их конкретной реализации, зависящей как от свойств входных сигналов, так и от параметров самих адаптивных коммутаторов. Предельные характеристики позволяют оценить целесообразность применения адаптивной коммутации в многоканальных ИИС.

Крайне важным для практики является возможность реализации метрологического сопровождения, поскольку реальная текущая погрешность аппроксимации является по определению критерием активности сигналов и аппаратно или алгоритмически определяется на каждом такте работы коммутатора. Значение этой погрешности достаточно легко встраивается в структуру кадра многоканальной ИИС.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авдеев Б. Я. Потенциальные свойства одного класса адаптивной коммутации в информационно-измерительных системах (общие положения и метод анализа) // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2012. Вып. 4. С. 80–85.
2. Цифровые адаптивные информационно-измерительные системы / Под ред. Б. Я. Авдеева, Е. А. Чернявского. СПб.: Энергоатомиздат, 1997.
3. Бахвалов Н. С. Численные методы. М.: Наука, 1975.

B. Ya. Avdeev

THE POTENTIAL PROPERTIES OF CLASS ADAPTIVE COMMUNICATION IN THE MEASUREMENT INFORMATION SYSTEMS (ANALYSIS, ASSESSMENTS OF LIMITING)

The class of adaptive commutation of signals in measurement information systems, be based on accuracy of maximal current approximation error, are be discussed. Offered an analysis and assessment of the limiting characteristics.

Adaptive and regular communication in measurement information systems, signal recovery from sampling discrete signal, approximation errors



УДК 621.37

А. А. Соколова

О РАСПРЕДЕЛЕНИИ ОТНОШЕНИЯ СОСЕДНИХ RR-ИНТЕРВАЛОВ В НОРМЕ И ПРИ ВОЗНИКНОВЕНИИ АРИТМИИ¹

Рассмотрено распределение отношения соседних RR-интервалов в случае норма–норма и норма–аритмия. Представлен аналитический вид выражения плотности вероятности распределения для отыскания порога обнаружения аритмии на фоне нормального синусового ритма.

Аритмия, желудочковые экстрасистолы, нормальное распределение, синусовый ритм, электрокардиограмма, RR-интервал

Под нарушениями ритма сердца, или аритмиями, понимают любой сердечный ритм, который не является регулярным синусовым ритмом нормальной частоты. Нарушения ритма могут быть обусловлены изменением основных функций сердца – автоматизма, возбудимости, проводимости или их сочетанными нарушениями [1].

Классификация аритмий достаточно обширна и включает в себя множество признаков изменения электрокардиосигнала (ЭКС). Однако ведущим признаком возникновения аритмии является изменение ритма, проявляющееся в скачкообразном изменении RR-интервала. Для классификации аритмий могут быть использованы показатели формы ЭКС [2]. Так, например, для определения эпизодов желудочковой экстрасистолии (ЖЭ) может быть использован факт уширения QRS-комплекса и изменения его формы [1]. Разность соседних RR-интервалов использовать для выявления аритмий не целесообразно, так как она будет определяться их величинами, зависящими от функционального состояния человека, его двигательной активности, эмоций и других факторов, и может значительно изменяться. В качестве показателя изменения ритма разумно выбрать отношение ξ_i/ξ_{i-1} , где $\xi_i = RR(i)$ – это длительность i -го RR-интервала. Так как RR-интервалы являются случайными величинами, то для отыскания распределения отношения необходимо знание совместной плот-

¹ Работа выполнена при поддержке гранта поисковых научно-исследовательских работ для государственных нужд в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (мероприятие 1.3.2 – III очередь), ГК № 14.740.11.1222 от 15 июня 2011 года.

ности вероятности (ПВ) соседних RR-интервалов. Пусть $\eta = \xi_i / \xi_{i-1}$, тогда для ПВ

$W_\eta(y)$ будем иметь $W_\eta(y) = \int_{-\infty}^{\infty} W_\xi(y y_1, y_1) |y_1| dy_1$, где $W_\xi(x, y)$ – совместная ПВ соседних

RR-интервалов, $\xi = (\xi_i, \xi_{i-1})$ [3].

Для выявления характеристик совместного распределения соседних RR-интервалов использовались записи ЭКГ сертифицированных баз данных MIT-BIH Normal Sinus Rhythm Database (NSRDB) и MIT-BIH Arrhythmia Database (ADB)¹. Первая база данных содержит 18 суточных записей нормального синусового ритма, вторая – 48 получасовых аритмических записей. В используемых базах данных уже существует временная разметка и классификация комплексов.

Известно, что распределение нормальных (при возбуждении в синусовом узле) RR-интервалов является гауссовым [4]. Рассмотрим совместную ПВ соседних RR-интервалов. На рис. 1 приведены выборки соседних RR-интервалов в случае норма–норма (NN) и норма–аритмия (NV) при разных коэффициентах корреляции для записей 119 (а), 223 (б) и 208 (в) (ADB), по которым видно, что области, соответствующие нормальным RR-интервалам (звездочки, N – от normal), представляют собой эллипс, вытянутый вдоль биссектрисы под углом α к оси ординат [5], что дает возможность предположить нормальность двумерного распределения.

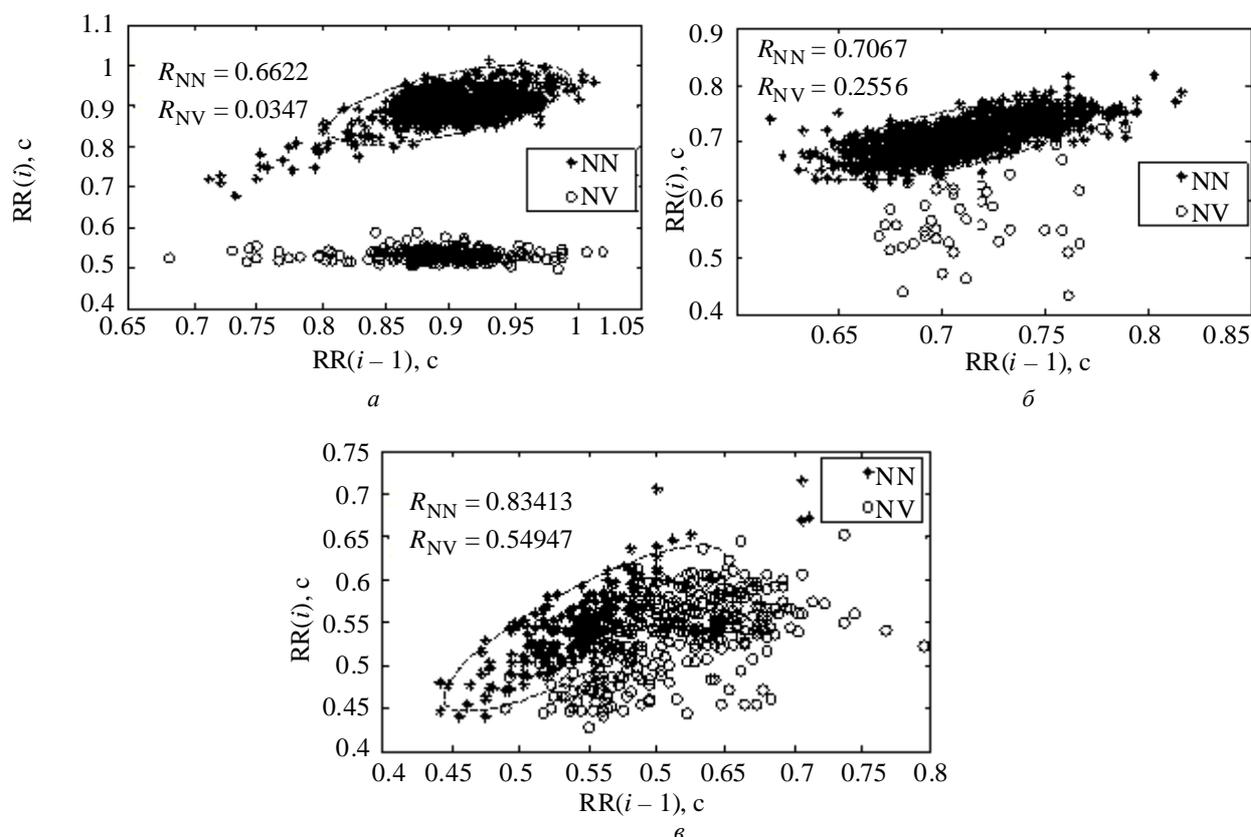


Рис. 1

¹ www.physionet.org

	x_{10}	x_{01}		
	x_{20}	x_{11}	x_{02}	
x_{30}	x_{21}	x_{12}	x_{03}	
x_{40}	x_{31}	x_{22}	x_{13}	x_{04}
.....				

Рис. 2

Проверить, является ли двумерное распределение гауссовым, можно с помощью совместных кумулянтов $x_{n,m}$, которые схематически располагаются в виде треугольной таблицы в соответствии с их порядком (рис. 2) [6].

Если в данном треугольнике кумулянты $x_{n,m} = 0$ при $n + m > 2$, где $n + m$ – порядок кумулянта, то соответствующее распределение является двумерным гауссовым распределением. Анализ записей показал, что для соседних RR-интервалов, вырабатываемых синусовым узлом, данные кумулянты составляют величины порядка 10^{-15} , что позволяет подтвердить предположение о совместной нормальности соседних RR-интервалов в норме.

По базе данных NSRDB¹ было проверено, что коэффициент корреляции двух соседних нормальных RR-интервалов варьируется в диапазоне 0.92...0.98. Однако при множественных аритмиях (получасовые записи 119, 223 и 208 базы данных ADB содержат 444, 473 и 992 аритмических комплекса соответственно) нижняя граница диапазона коэффициента корреляции R_{NN} опускается до 0.65 (см. рис. 1). Совместная ПВ соседних нормальных RR-интервалов со средними значениями $M\{y_1\} = a_1$ и $M\{y_2\} = a_2$, дисперсиями σ_1^2 и σ_2^2 и коэффициентом корреляции R имеет вид:

$$W_{\xi}(y_1, y_2) = \frac{1}{\sqrt{(2\pi)^2 \sigma_1^2 \sigma_2^2 (1 - R^2)}} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2(1 - R^2)} \left[\frac{(y_1 - a_1)^2}{\sigma_1^2} - \frac{2R(y_1 - a_1)(y_2 - a_2)}{\sigma_1 \sigma_2} + \frac{(y_2 - a_2)^2}{\sigma_2^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

а распределение отношения нормальных коррелированных величин:

$$W_{\eta}(y) = \frac{\sqrt{1 - R^2}}{\pi} \frac{\sigma_1 \sigma_2}{\sigma_1^2 - 2R\sigma_1 \sigma_2 y + \sigma_2^2 y^2} \times \exp \left\{ -\frac{1}{2(1 - R^2)\sigma_1^2 \sigma_2^2} [a_1^2 \sigma_2^2 - 2Ra_1 a_2 \sigma_1 \sigma_2 + a_2^2 \sigma_1^2] \right\} \left[1 + \sqrt{2\pi} z F_0(z) \exp \left(\frac{z^2}{2} \right) \right], \quad (2)$$

где $z = \frac{a_2 \sigma_1^2 - Ra_1 \sigma_1 \sigma_2 + a_1 \sigma_2^2 y - Ra_2 \sigma_1 \sigma_2 y}{\sigma_1 \sigma_2 \sqrt{(1 - R^2)(\sigma_2^2 y^2 - 2R\sigma_1 \sigma_2 y + \sigma_1^2)}}$, $F_0(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^z \exp \left(-\frac{x^2}{2} \right) dx = \Phi(z) - \frac{1}{2}$, а

$\Phi(z)$ – интеграл вероятности [3].

Оценка с помощью указанных баз данных $M\{y_1\}$ и $M\{y_2\}$, а также σ_1^2 и σ_2^2 показала, что можно считать $M\{y_1\} = M\{y_2\} = a$ и $\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma^2$. Ниже представлена ПВ отношения соседних нормальных RR-интервалов $W_{NN}(x)$:

¹ www.physionet.org

$$W_{\xi_1/\xi_2}(y) = \frac{\sqrt{1-R^2}}{\pi} \frac{1}{1-2Ry+y^2} \exp\left\{-\frac{a^2}{(1+R)\sigma^2}\right\} \left[1 + \sqrt{2\pi}zF_0(z) \exp\left(\frac{z^2}{2}\right)\right], \quad (3)$$

где $z = \frac{a}{\sigma} \sqrt{\frac{1-R}{1+R}} \frac{1+y}{\sqrt{(y^2-2Ry+1)}}$.

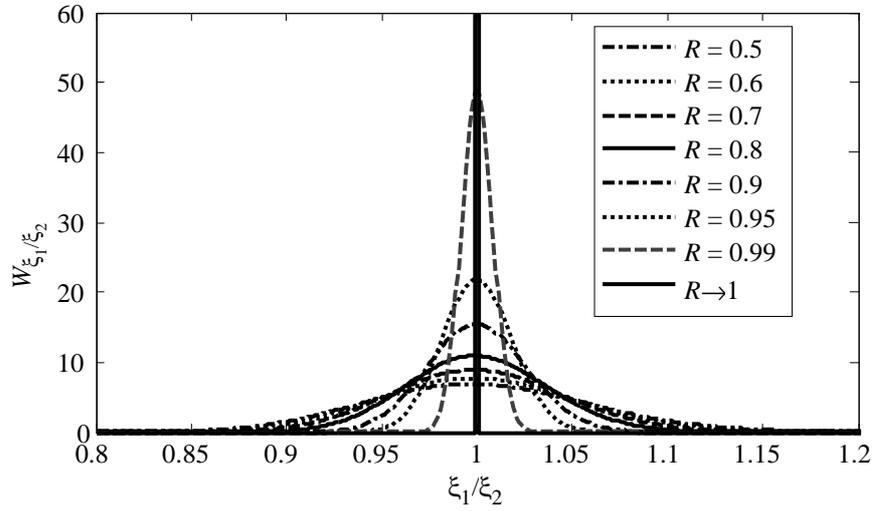


Рис. 3

На рис. 3 приведены графики функции (3) при фиксированных математическом ожидании и дисперсии ($a = 0.86$ с и $\sigma = 0.05$ с), а также различных значениях коэффициента корреляции R .

Полигон распределения отношения соседних нормальных RR-интервалов (сплошная линия), полученный по записи 103 MIT-BIH Arrhythmia Database, и плотность вероятности (3) (пунктирная линия) с оценками параметров a , σ и R той же записи представлены на рис. 4. Для различных записей базы данных ADB была проверена близость эмпирического $W_{NN}(x)$ и теоретического W_{ξ_1/ξ_2} распределений с помощью критерия χ^2 при уровне значимости 0.05. Данный результат подтверждает справедливость предположения о совместной нормальности отношения соседних RR-интервалов в норме.

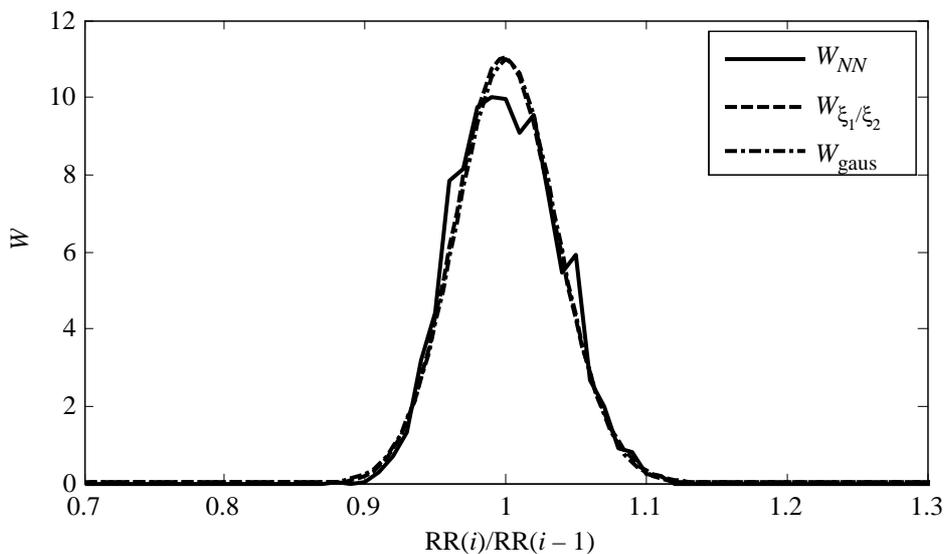


Рис. 4

При выявлении аритмий на фоне нормального синусового ритма, необходимо определить значение порога обнаружения нарушения ритма при фиксированном значении специфичности Sp . Сложность расчета интеграла от функции (3) обуславливает попытки ее упрощения. В качестве альтернативной кривой может быть использована функция распределения Гаусса. На рис. 4 штрих-пунктирной линией показана плотность вероятности нормального закона распределения W_{gaus} построенного по оценкам среднего и дисперсии отношения $RR(i)/RR(i-1)$. По графику видно, что распределения очень близки, и, зная оценки параметров распределения $W_{\text{NN}}(x)$, можно использовать гауссово распределение для определения значения порога отношения соседних RR-интервалов, при желаемом значении Sp .

Далее представлена попытка применения распределения (2) для пары интервалов норма–аритмия.

В пределах данной работы рассматривается только один тип аритмии – ЖЭ. Желудочковые экстрасистолы – это преждевременные сокращения под влиянием импульсов, которые исходят из различных участков внутрижелудочковой проводящей системы [1]. Ширина комплекса QRS экстрасистолы составляет 0.12 с или больше, в то время как ширина комплекса нормальной ЭКГ – 0.06...0.08 с. При экстрасистолии временное расстояние от комплекса соответствующего ЖЭ до предшествующего комплекса, образованного возбуждением из синусового узла, укорочено.

Для построения $W_{\text{NV}}(x)$ (V – от *ventricular*) необходимо оценить совместное распределение соседних RR-интервалов, где $RR(i-1)$ – RR-интервал перед комплексом, возбуждаемым из синусового узла, а $RR(i)$ – RR-интервал, предшествующий ЖЭ (интервал сцепления). При экстрасистолическом ритме преждевременные возбуждения желудочков (ПВЖ) некоторым образом зависят от основного ритма сердца или связаны с ним и, как правило, имеют фиксированный интервал сцепления с основным возбуждением, несмотря на это может наблюдаться и переменное сцепление, а также другие характерные его изменения (например, постепенное увеличение интервала сцепления в последовательных возбуждениях) [8]. Следует учитывать, что экстрасистолические ПВЖ могут быть обусловлены несколькими различными электрофизиологическими механизмами, хотя на основании клинических ЭКГ весьма трудно определить вовлечение того или иного из них. Анализ MIT-BIH Arrhythmia Database показал, что коэффициент корреляции интервала сцепления и предшествующего нормального RR-интервала (R_{NV}) варьируется от 0 до 0.6 (см. подписи на рис. 1 и 5). Убедившись, что значения совместных кумулянтов $x_{n,m}$ для пары RR-интервалов норма–ЖЭ также составляют величины порядка 10^{-15} , считаем совместную плотность распределения соседних RR-интервалов для данного случая гауссовой. Следовательно, для распределения $W_{\text{NV}}(x)$ можно использовать выражение (2).

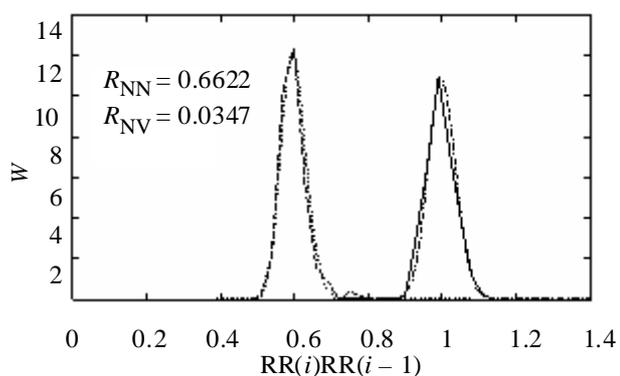
На рис. 5 представлены полигоны распределения отношения соседних RR-интервалов в случае норма–норма NN_{real} и норма–ЖЭ NV_{real} (сплошная и штриховая линии соответственно) и распределения W_{ξ_1/ξ_2} для нормы NN_{appr} (штрих-пунктирная линия) и патологии NV_{appr} (пунктирная линия) для записей 119 (а), 223 (б) и 208 (в) (ADB). Как уже

говорилось, при построении полигонов NV_{real} были использованы различные объемы выборок. Среднее значение и дисперсия интервалов сцепления, а также коэффициент корреляции пары норма–ЖЭ различны для каждого пациента.

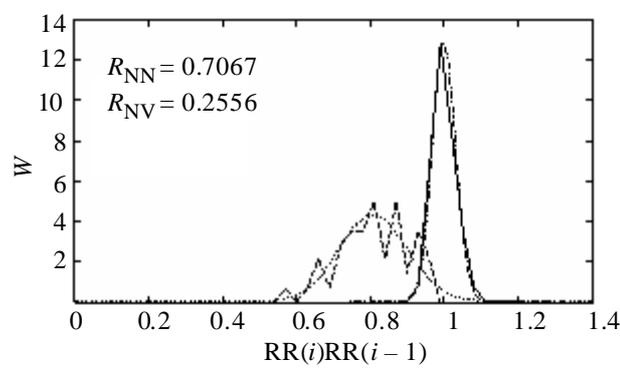
Применение показателя относительного изменения ритма дает большее разнесение полигонов по сравнению разностным, что позволяет повысить вероятность различения случаев нормы и аритмии. Использование данного показателя для диагностики в режиме реального времени требует предварительного анализа записи ЭКС с целью получения оценок значений математического ожидания, дисперсии и коэффициента корреляции нормального ритма. С помощью функции W_{ξ_1/ξ_2} (2) можно определить значение порога обнаружения аритмии при желаемом значении специфичности Sp . Надо отметить, что необходимо проводить периодическое обновление значений параметров используемой ПВ. Оценка параметров распределения NV затруднена, так как в предварительном анализе аритмии могут не возникнуть либо объем выборки будет слишком мал, аналогично ситуация обстоит с периодическим обновлением данных о распределении NV .

Результат исследования показал, что вследствие того, что нормальные соседние RR -интервалы являются коррелированными гауссовыми случайными величинами, то для отыскания порога обнаружения аритмии на фоне нормального синусового ритма правомочно использовать ПВ W_{ξ_1/ξ_2} (3). Для этого необходимо знать оценки среднего

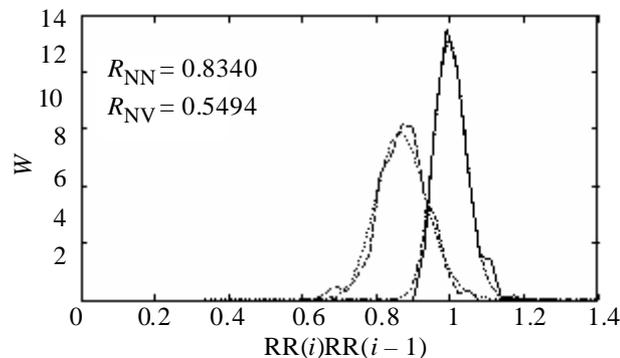
значения a , дисперсии σ^2 выборки RR -интервалов и коэффициента корреляции R соседних RR -интервалов. В силу того что при длительном мониторинге ЭКС необходимо переоценивать перечисленные параметры, возникает сложность пересчета порога. Анализ показал, что в качестве альтернативной кривой может быть использовано распределение Гаусса.



a



б



в

Рис. 5

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов В. Н. Руководство по электрокардиографии / ООО «Медицинское информационное агентство». М., 1997. 528 с.
2. Рангайян Р. М. Анализ биомедицинских сигналов. Практический подход / Пер. с англ. под ред. А. П. Немирко. М.: Физматлит, 2007. 440 с.

3. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. М.: Радио и связь, 1989.
4. Рябыкина Г. В., Соболев А. В. Вариабельность ритма сердца. М.: Стар'Ко, 1998. 200 с.
5. Сидоренко Г. И., Комиссарова С. М., Золотухина С. Ф. Вариабельность сердечного ритма и ее клиническое значение в определении риска послеоперационных осложнений при кардиохирургических вмешательствах // Мед. новости. 2005. № 8. С. 89–94.
6. Малахов А. Н. Кумулянтный анализ случайных негауссовых процессов и их преобразований. М.: Сов. радио, 1978. 376 с.
7. Эль-Шериф Н. Преждевременное возбуждение желудочков: современные представления о механизмах и клиническом значении // Аритмии сердца. Т. 2. М.: Медицина, 1996. 480 с.

A. A. Sokolova

ON THE DISTRIBUTION OF THE NEIGHBOURING RR-INTERVALS QUOTIENT UNDER NORMAL AND ARRHYTHMIC CONDITIONS

The distribution of normal-normal and normal-arrhythmic neighbouring RR-intervals quotient is considered. The analytical expression of the probability density function is given and used in threshold finding in arrhythmia detection under normal sinus rhythm.

Arrhythmia, premature ventricular beats, normal distribution, sinus rhythm, electrocardiogram, RR-interval



УДК 681.3.06 (075.8)

Е. С. Новикова

ПРОЕКТИРОВАНИЕ НОВОЙ ДИСЦИПЛИНЫ «КОМПЬЮТЕРНАЯ ВИРУСОЛОГИЯ И МЕТОДЫ НАРУШЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ» КАК ОБНОВЛЕНИЕ РАЗДЕЛА БАЗОВОГО КУРСА

Предлагается подход к проектированию дисциплины «Компьютерная вирусология и методы нарушения безопасности», учитывающий научные достижения в области компьютерной вирусологии. Сформирована теоретическая база для самостоятельного обновления методик и приемов решения современных практических задач обеспечения информационной безопасности.

Информационная безопасность, компьютерный вирус, машина Тьюринга, клеточные автоматы, технология обучения

При обучении студентов специальностям, требующим серьезной фундаментальной подготовки и знаний о современном состоянии науки и техники, важное место занимает проблема обновления базовых курсов. Зачастую заранее трудно предсказать, какие дисциплины и их разделы потребуют обновления, так как это связано не только с новыми достижениями, но и с выходящими публикациями по тематике обновления, а также со степенью их проработки, обобщения и подкрепления признанными в обществе результатами.

Вредоносное программное обеспечение (ПО) и программно-аппаратные решения по его обнаружению рассматриваются без детальной проработки в курсах «Защита ОС и СУБД», «Защита компьютерных сетей и телекоммуникаций», «Технические средства защиты информации». Современные курсы по методам нарушения безопасности в основном имеют прикладной характер и редко включают в себя темы, посвященные теоретическим исследованиям и их результатам, ограничиваясь лишь описанием практических решений в области обнаружения атак и антивирусных программ. Освоив данный курс, студент должен получить не только актуальную информацию, но и уметь ориентироваться в динамически развивающихся программных и аппаратных средствах. Последнее возможно только при наличии хорошо проработанной теоретической базы. В настоящей статье предлагается подход к проектированию дисциплины «Компьютерная вирусология и методы нарушения безопасности» (КВиМНБ), который учитывает теоретические достижения в области

компьютерной вирусологии и показывает их значимость для практики. Подача теоретического материала подкрепляется примерами из существующих программно-аппаратных решений, благодаря чему студенты лучше осознают важность результатов научных исследований и, как следствие, быстрее усваивают пройденный материал.

Структура лекционного курса. После изучения дисциплины КВиМНБ студент должен уметь выбрать и построить инфраструктуру обнаружения атак в зависимости от целей и задач политики безопасности, знать основные шаблоны атак и средства их реализации, поэтому в план лекций включаются следующие темы:

- информационная безопасность и основные понятия;
- теоретические основы компьютерной вирусологии;
- базовые понятия вредоносного ПО, существующие подходы к классификации и основные проблемы;
- компьютерные черви, компьютерная эпидемиология, основные понятия и модели;
- основные программные уязвимости, ошибки конфигурации информационных систем;
- средства обнаружения вредоносного программного обеспечения: виды, принципы функционирования и построения, методика использования;
- средства обнаружения атак: классификация, принципы функционирования и построения;
- существующие международные базы знаний программных уязвимостей, ошибок конфигураций, шаблонов атак и т. д.

Такая структура лекций позволяет студенту получить установочную теоретическую базу понятий, классификаций, приемов и стратегий, поддерживающих методологию предмета, открытую для обновления по современному состоянию компьютерной вирусологии, а также освоить новейшие практики в области защиты информации.

При выборе теоретической базы для дисциплины необходимо учитывать тот факт, что изучаемый предмет является динамически изменяющимся во времени: компьютерные вирусы постоянно развиваются и совершенствуются с появлением новых устройств, сред разработок, операционных систем и т. д. Меняются не только способы заражения и распространения, но и характер вирусных эпидемий. Так, в начале 90-х гг. прошлого столетия в основном были распространены вирусы, обладающие достаточно небольшой степенью «заразности», что объясняется тем, что в основном заражение компьютеров происходило через «инфицированные» дискеты, в начале XXI столетия вместе с массовым использованием средств коммуникаций и Internet-технологий началась эпоха сетевых червей, способных заразить до сотен тысяч компьютеров в течение нескольких первых часов появления «на свободе», но уже к 2006 г. характер атак вредоносного ПО вновь изменился, став более локальным и целенаправленным¹. Вместе с характером атак меняются описывающие их теоретические модели, математический аппарат, разрабатываются новые методики анализа и выявления вредоносного программного обеспечения.

¹ Common Malware Enumeration. Current Status. URL: <http://cme.mitre.org/>.

В качестве теоретической *базы* по основам компьютерной вирусологии выбрана работа Ф. Коэна «Компьютерные вирусы: теория и эксперименты» [1]. Эта работа обладает двумя важными методическими преимуществами. При построении формальной модели компьютерного вируса Ф. Коэн использует понятие *машины Тьюринга* (МТ), являющейся абстрактной моделью вычислителя, которая может быть применена для описания как современных компьютеров, так и вычислительных устройств будущего, следовательно, концепция компьютерного вируса Ф. Коэна не потеряет со временем свою значимость. Понятие МТ обычно раскрывается в курсе «Дискретная математика», который входит в цикл обязательных дисциплин по специальности «Компьютерная безопасность». Таким образом, студенты уже знакомы с тематикой лекций и для представления формальной модели компьютерных вирусов достаточно освежить их знания.

Ф. Коэн дополнил МТ функциями, позволяющими отслеживать изменение МТ во времени, с их помощью дал определение компьютерного вируса, описал механизмы копирования и эволюционирования (полиморфизма) компьютерного вируса, тем самым определив его основную особенность – способность к саморазмножению. Согласно Ф. Коэну, *компьютерный вирус* – это такая последовательность символов (программа), которая при ее интерпретации в подходящей вычислительной среде способна изменять другие последовательности символов (программы), включая в них свою, возможно измененную, копию. Поскольку в настоящий момент не существует устоявшегося определения компьютерного вируса, то определение, данное Ф. Коэном, может быть использовано в качестве базового. Такое решение имеет ряд достоинств. Во-первых, при таком определении компьютерного вируса его вредоносная нагрузка не является ключевой, что подтверждается тем, что существуют вирусы, не имеющие никакой вредоносной функциональности. Во-вторых, из определения следует, что вирус v – это программа, интерпретируемая некоторой машиной Тьюринга M , т. е. вирус неразрывно связан с определенной вычислительной средой, и если программу v подать на вход другой машине Тьюринга M' , то она уже может не быть вирусом. В качестве примера можно рассмотреть макровирус для пакета программ MS Office, который, в общем случае, не представляет опасности для пакета программ Open Office. В-третьих, вирус v определен как множество программ, что позволяет изучить его основные свойства, используя теорию множеств.

Курс построен таким образом, чтобы основные понятия уточнялись и усложнялись, выделялись их возможности и ограничения, акцентировались актуальные направления дальнейших исследований. Для целостного восприятия теоретического материала и возможностей его применения в качестве интересных конструктивных решений в лабораторных и практических занятиях предлагается решить задачи как ознакомительного характера, так и самостоятельного исследования.

Структура практических и лабораторных работ. Программа лекционного курса поддерживается подготовленными циклами практических и лабораторных работ. Математический аппарат дискретной математики, нейронных сетей рассматривается в применении к клеточным автоматам с моделями управляющих устройств, вычислителей и программами обработки символьной информации и машинных кодов. Теоретический матери-

ал по технологиям, методам и моделям обнаружения атак, нарушениям безопасности, компьютерной вирусологии осваивается и закрепляется в оболочке живых игровых сценариев, вовлекающих студентов в решение занимательных творческих задач.

Для закрепления знаний по теоретическим основам компьютерной вирусологии в качестве набора тем практических занятий предложено изучить и разработать программную модель самовоспроизводящегося клеточного автомата, который представляет собой модель искусственной жизни. Выбраны следующие варианты клеточных автоматов:

- 1) клеточный автомат Дж. Конвея [2];
- 2) клеточный автомат М. Людвига [3].
- 3) муравей К. Ленгтона [4];
- 4) петля К. Ленгтона [4].

Уровень сложности задания зависит от вида выбранного клеточного автомата, а вариативности заданий можно добиться, изменяя правила переходов. Так, наиболее простым и проработанным клеточным автоматом является автомат Дж. Конвея, который больше известен как игра «Жизнь».

Основная идея работы состоит в том, чтобы, начав с какого-нибудь простого расположения живых клеток, проследить за эволюцией исходной конфигурации. Некоторые исходные конфигурации переходят в устойчивые, неизменные конфигурации, другие – в колебательный режим или постепенно вымирают.

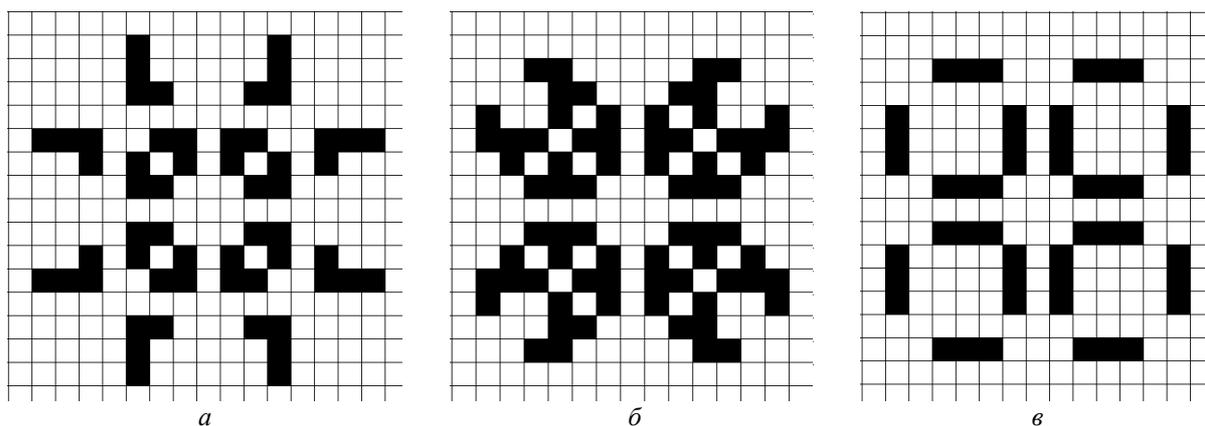


Рис. 1

Для выполнения этой работы студенты должны обладать базовыми навыками программирования. Жесткие требования к выбору среды разработки, языка программирования не предъявляются. На рис. 1 представлены конфигурации клеточного автомата Дж. Конвея, известного как «пульсар» и имеющего только три различные периодически повторяющиеся конфигурации (рис. 1, а, б, в). Результаты моделирования представляют собой красивые динамически меняющиеся картинки, поэтому студенты охотно выполняют поставленные задачи, проявляя творческие и исследовательские способности.

Для привнесения игрового духа и соревновательного характера (которые обычно привлекают студентов и стимулируют их учебную деятельность) в практические занятия можно предложить проведение соревнований, в основе которых лежит идея необычной игры «Дарвин», придуманной еще в 1960-х гг. и послужившей прототипом компьютерных вирусов [5]. Студентам предлагается разбиться на группы и разработать программы-

«организмы», которые должны бороться друг с другом за жизненное пространство. В качестве жизненного пространства можно использовать двухмерную матрицу, доступ к которой должен контролироваться некоторой программой-супервизором, определяющей также очередность ходов игроков-участников. Организм, который получает управление, может использовать три типа обращения к супервизору:

- запрос о содержании ячейки по заданному адресу, в ответ на запрос возвращается информация о содержимом ячейки: если ячейка не пуста, то возвращается вид организма, который ее занимает;
- уничтожение содержимого по заданному адресу, ячейка предварительно должна быть исследована организмом этого же вида;
- запись собственного организма на участок свободного пространства, включающий заданную ячейку, причем заданное число клеток в окрестности указанной должно быть свободно.

Правила, на усмотрение преподавателя, могут быть изменены и доработаны. Победителем считается та команда, чьи организмы захватили все жизненное пространство и получили наибольшее количество очков. Каждая команда должна продумать стратегию своей игры и реализовать ее программно. Такое задание поможет проявить способность к нестандартному мышлению и решению задач в качественно новой форме.

Многие специалисты в области информационной безопасности считают, что для выработки правильной стратегии по противодействию вредоносному ПО в первую очередь необходимо детально изучить существующие механизмы нарушения, опробовать их на практике [4], [6], поэтому в цикл практических занятий должен быть включен материал по изучению возможных моделей саморазвивающегося ПО. Для достижения поставленной цели предложены следующие типы заданий:

- 1) разработка саморазмножающегося ПО;
- 2) изучение образца саморазмножающегося ПО.

Для направленного противодействия вредоносному ПО исследуются все этапы разработки вируса и повторяется весь жизненный цикл его разработки, определяется модель самовоспроизводящегося программного обеспечения (системные требования, объект заражения, способ заражения, тип заражаемых файлов, алгоритм поиска заражаемых файлов) [6]. С учетом того, что разрабатываемое программное обеспечение носит учебный характер, следует *ограничить* степень «заразности» вирусного программного обеспечения. Можно выделить три основные стратегии заражения файлов: 1) перезаписывающие вирусы; 2) вирусы-паразиты; 3) вирусы-компаньоны. Эти стратегии применимы для заражения как исполняемых бинарных файлов, так и для скриптовых файлов, требующих наличия специальной интерпретирующей среды. В качестве защиты вредоносного ПО от обнаружения антивирусным программным обеспечением можно использовать: 1) стелс-технологии; 2) шифрование; 3) полиморфизм; 4) метаморфизм. Задание можно выполнять в два этапа: сначала реализовать простейший вирус, имеющий только функцию самовоспроизведения, затем усовершенствовать его, добавив специальные механизмы антивирусной защиты. Уровень сложности задания определяется в первую очередь выбранной моделью вредоносного ПО. Наиболее сложным вариантом задания является разработка вирусов-паразитов, заражающих исполняемые бинарные файлы, поскольку в этом случае

необходимы знание формата исполняемых файлов различных операционных систем и навыки системного программирования. Изучение формата исполняемых файлов может стать отдельной темой лабораторной работы.

Изучение саморазмножающегося ПО является актуальной и важной задачей при разработке антивирусных средств, поэтому при выполнении этого задания студенты получают востребованные на практике навыки. Для подкрепления интереса студентов к предмету в качестве исследуемых образцов можно использовать разработанные студентами вирусы или воспользоваться имеющимися в свободном доступе базами вирусов.

Часть практического материала выделена в блок закрепления материалов по обнаружению вторжений в информационную систему. Предложены следующие типы заданий: 1) обнаружение программных уязвимостей или ошибок конфигураций с помощью сканеров уязвимостей; 2) выявление атак с помощью систем управления событиями безопасности.

При выполнении первого задания студенты ознакомятся с имеющимися базами уязвимостей программного обеспечения, ошибок конфигурации информационных систем; освоят методики работы со сканерами уязвимостей и разработки сценариев выявления уязвимостей [7].

При выполнении второго задания студенты ознакомятся с методиками работы с системами управления событиями безопасности, которые в настоящее время считаются наиболее перспективными разработками в области защиты информации [8]. Системы управления безопасностью позволяют в удобной форме работать с логами различных источников событий безопасности, осуществлять аудит безопасности, оценивать уровень безопасности узлов, выявлять возможные атаки. В ходе выполнения этой работы студенты должны будут изучить шаблоны атак и разработать правила корреляции различных событий для их выявления, например, если в течение 20 секунд с одного и того же хоста было сделано более трех неудачных попыток войти в систему, а затем последовал успешный вход в систему, то следует выдать сигнал «возможный вход в систему путем перебора паролей».

Самостоятельная проработка разделов лекционного материала в рамках лабораторных и практических занятий является неотъемлемой составной частью программы нового курса КВиМНБ и показывает студентам методологические подходы и приемы обновления знаний по предмету своих профессиональных интересов.

При использовании предложенного подхода к проектированию дисциплины КВиМНБ в ее структуре можно выделить три основных логически взаимосвязанных между собой раздела:

- теоретические основы дисциплины;
- механизмы вторжения в информационную систему;
- методы обнаружения вторжений и противодействия им.

Материал курса структурирован таким образом, чтобы новые знания студентами приобретались не только в лекционной части курса, но и в лабораторной (на этапе личного исследования) и практической (при поиске подхода к решению поставленной задачи) частях. Представляется, что предложенное построение курса будет способствовать поддержанию интереса со стороны студентов к предмету, стимулировать творческое отношение к поиску новых практических решений и желание обновлять получаемые знания. Кроме того, практика обучения показала, что такой подход привлечет в равной степени

студентов двух типов: исследователей и разработчиков, так как в ходе изучения курса становится понятной как высокая значимость теоретических новшеств, так и эффективность практических решений вновь возникающих профессиональных задач.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cohen F. Computer Viruses – Theory and Experiments // Computers & Security. 1987. Vol. 6. P. 22–35.
2. Тоффли Т., Марголус Н. Машины клеточных автоматов. М.: Мир, 1991.
3. Ludwig M. A. Computer Viruses and Artificial Life and Evolution // American Eagle Press, 2007.
4. Filiol E. Computer viruses: from theory to application. Springer-Verlag France, 2005.
5. Dewdney A. Of worms, viruses and Core War // Scientific American. 1989. Vol. 260, № 3. P. 90–93.
6. Czor P. The art of computer research and defense. Addison Wesley Professional, 2005.
7. Данжани Н., Кларк Дж. Средства сетевой безопасности. М.: Кудиц-Пресс, 2007.
8. Security Information and Event Management (SIEM) / D. R. Miller, S. Harris, A. A. Harper et al. Implementation McGraw-Hill, 2010.

E. S. Novikova

THE DESIGN OF THE NEW COURSE «COMPUTER VIROLOGY AND INTRUSION METHODS DETECTION» AS RENOVATION OF THE BASIS COURSE

The approach to the design of the new course «Computer Virology and Intrusion Methods» based on theoretical achievements in computer virology is suggested. The aim of the course is to form theoretical basis for further independent study of the latest methods and procedures necessary for implementation modern practical tasks in information security.

Information security, computer virus, Turing machine, cell automata, education technology



УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ, ИННОВАЦИОННЫЙ И АНТИКРИЗИСНЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 378.1

Е. А. Вишнякова

ПРОЦЕСС «ПРИЕМ СТУДЕНТОВ» В СИСТЕМЕ МЕНЕДЖМЕНТА КАЧЕСТВА ВУЗА И ПОКАЗАТЕЛИ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА РЕАЛИЗАЦИИ ПРОЦЕССА

Рассматриваются вопросы, связанные с управлением процессом «Прием студентов» в системе качества образовательного учреждения. Предложены показатели оценки качества реализации процесса.

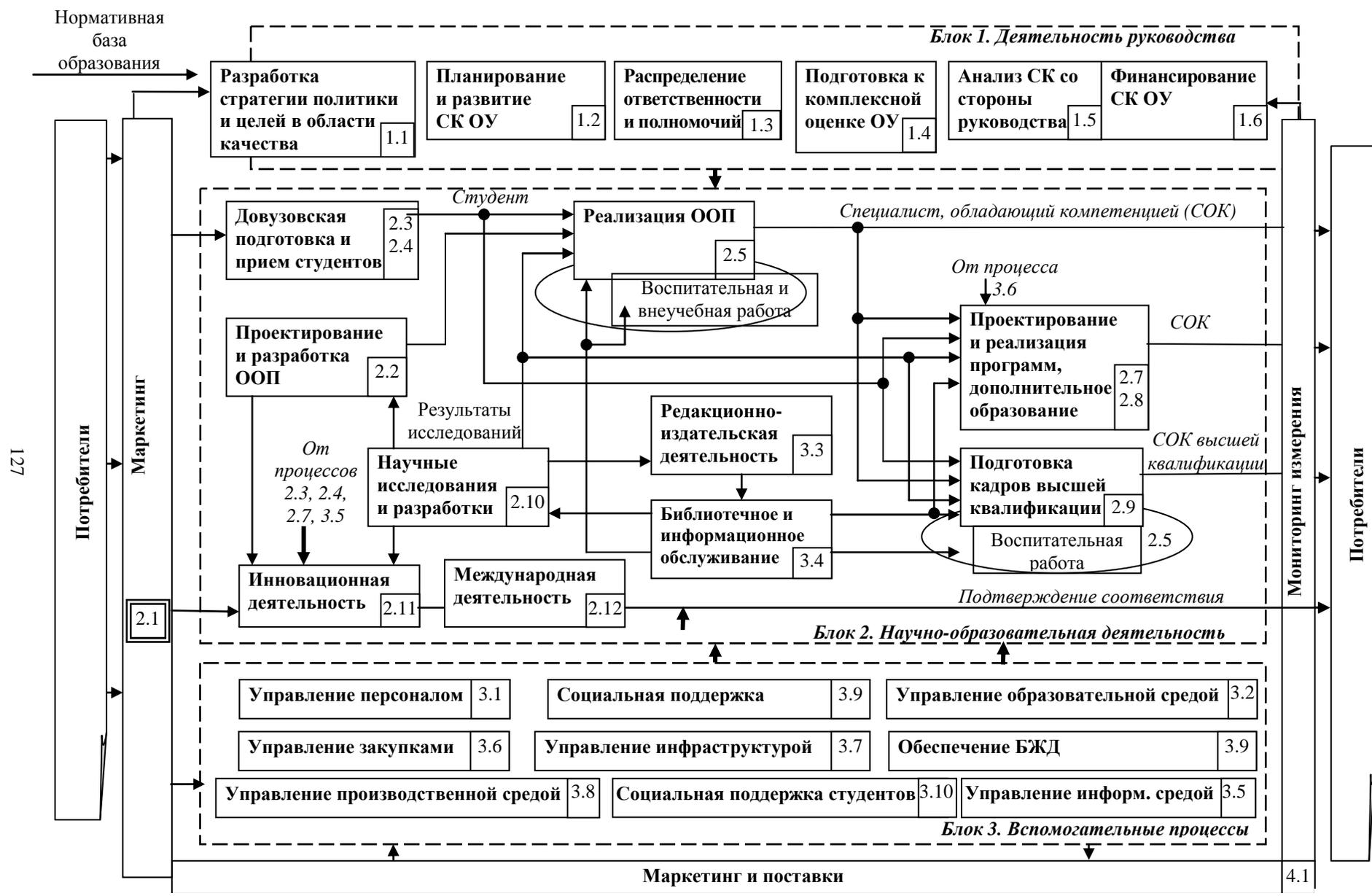
Прием в высшее учебное заведение, процесс, показатели процесса

Система качества вуза, построенная на основе Типовой модели системы качества образовательного учреждения¹ (СК ОУ), одобренной Советом по координации управления качеством высшего профессионального образования, рассматривается как совокупность 12 процессов, среди которых особый интерес представляет процесс «Прием студентов», так как в последние несколько лет по целому ряду причин сложилась непростая ситуация с приемом в ОУ высшего профессионального образования [1]. Причины разнообразны: начиная от неблагоприятных демографических условий и заканчивая постоянной коррекцией нормативной базы, регламентирующей прием в вузы. Несмотря на это вузы обязаны ежегодно выполнять установленные учредителем контрольные цифры приема (КЦП).

Согласно Типовой модели СК ОУ процесс «Прием студентов» относится к процессам создания ценности для потребителя, тесно связан с процессами «Маркетинг», «Довузовская подготовка» и «Реализация основных образовательных программ» (рис. 1, п. 2.4).

Прием студентов – это деятельность по отбору абитуриентов и зачислению студентов на образовательные программы высшего профессионального образования [2]. Входами процесса являются, во-первых, абитуриенты, обладающие определенным уровнем знаний, умений и навыков с необходимым для поступления комплектом документов, во-вторых, информация о требованиях потребителей и других заинтересованных сторон, заявки на целевой прием, план приема. Владельцем процесса является Председатель приемной комиссии.

¹ Степанов С. А. Типовая модель системы качества образовательного учреждения. Санкт-Петербург, 2009 г. <http://www.rusregister.ru/>



127

Рис. 1

Деятельность, реализуемая в рамках процесса «Прием студентов», включает следующие подпроцессы:

- подготовка и проведение олимпиад школьников;
- разработка документов, требуемых Минобрнауки в соответствии с Порядком приема (формирование КЦП, правил приема и пр.);
- организация и обеспечение приема документов от абитуриентов;
- проведение конкурса и зачисление;
- формирование личных дел абитуриентов (в последствии студентов);
- формирование приказов о зачислении, формирование учебных групп;
- реализация целевого приема (подготовка и заключение договоров о целевой подготовке студентов);
- формирование баз данных (БД) абитуриентов и студентов 1-го курса;
- подготовка отчета для ученого совета по результатам приема;
- отчетность перед учредителем и другими организациями;
- анализ эффективности, выявление недостатков и разработка мер по улучшению.

Целью рассматриваемого процесса является отбор и прием на обучение профессионально ориентированных и наиболее подготовленных к освоению образовательных программ высшего профессионального образования студентов-первокурсников. В настоящее время администрация вуза обращает особое внимание на управление процессом «Прием студентов» для привлечения абитуриентов, обеспечения выполнения КЦП и достойного конкурса в университет. Управление процессом приема и оценка его результативности в рамках СК ОУ осуществляются с помощью показателей этого процесса. Показатель результативности процесса – это качественный или количественный показатель, рассчитываемый по определенной методике и адекватно характеризующий результат и (или) динамические показатели (изменение) функционирования процесса.

Ежегодно администрации вуза представляется отчет о динамике приема, а позднее и о результатах приема в ОУ. Традиционно мониторинг ведется по ряду показателей, которые используются также при предоставлении отчетности в вышестоящие инстанции. Среди типовых показателей рассматриваются данные по абитуриентам, подавшим документы в вуз, а также по зачисленным студентам: количество по категориям (петербуржцы/иностранцы, победители и призеры олимпиад), средний балл ЕГЭ. В табл. 1 представлены типовые показатели, описаны методы расчета значений показателей, периодичность их измерения, установлены критерии оценки (или нормативные значения показателей). В качестве примера рассмотрены результаты приема 2009–2011 гг. одного из технических вузов России (по информации, опубликованной на официальном сайте университета).

Как видно из табл. 1 на основании типовых показателей не всегда можно составить представление о реализации процесса, оценить каждый подпроцесс и сопоставить с целями процесса, а также с политикой в области качества университета. Например, университет заявляет, что стремится принять профессионально ориентированных и наиболее подготовленных абитуриентов, как правило, ребят, принимавших участие в профориентационных мероприятиях (выход процесса «Довузовская подготовка»), но среди показателей нет ни одного, характеризующего процент подавших документы (или поступивших) профориенти-

рованных абитуриентов в общей структуре приема. Для управления процессом важно дать полную оценку на всех этапах проведения приемной кампании: от проведения олимпиад школьников и подачи документов, до зачисления и обучения первокурсников.

Таблица 1

№	Показатель	Метод расчета значения показателя	Периодичность измерения	Факт. значение показателя (2009)	Факт. значение показателя (2010)	Факт. значение показателя (2011)	Критерий оценки (нормативное значение) показателя
1	Количество поданных заявлений по вузу в целом по трем формам обучения	Метод прямого калькулирования, реализуемый в БД абитуриентов	Измерение проводится ежедневно (итоговое по результатам приема)	5120	4952	4426	Коэффициент* КЦП
2	Процент выполнения контрольных цифр приема по формам обучения	(Кол-во зачисленных абитуриентов по соответствующей форме обучения/ КЦП на соответствующую форму обучения) · 100 %	Расчет проводится по результатам приема	100 %	100 %	100 %	100 %
3	Процент зачисленных по результатам олимпиад абитуриентов на дневную форму обучения	(Кол-во зачисленных по результатам олимпиад на дневную форму обучения/ КЦП на дневную форму обучения) · 100 %		20 %	8.5 %	5 %	Коэффициент* КЦП
4	Количество зачисленных по договорам с оплатой стоимости обучения по формам обучения	Метод прямого калькулирования, реализуемый в БД абитуриентов		97	230	132	
5	Средний балл ЕГЭ по зачисленным абитуриентам	Сумма баллов ЕГЭ зачисленных по 3 предметам / кол-во зачисленных	Расчет проводится по результатам приема	190	212	209	Чем больше значение, тем лучше (max 300)
6	Процент иногородних, поступивших в КЦП	(Кол-во иногородних, зачисленных на дневную форму обучения / КЦП на дневную форму обучения) · 100 %		47 %	53 %	66 %	В пределах количества мест для проживания в общежитии
7	Процент зачисленных по результатам целевого приема	(Кол-во абитуриентов, зачисленных по целевому приему на дневную форму обучения / КЦП на дневную форму обучения) · 100 %		13 %	24 %	23 %	%, устанавливаемый документами Минобрнауки

* Коэффициенты задаются ежегодно администрацией вуза на основании сравнительного анализа с вузами-конкурентами.

В табл. 2 представлен перечень предлагаемых показателей, которые классифицированы на типовые, типовые с изменениями и нетиповые показатели. Типовые показатели – это стандартные количественные величины, используемые в формах отчетности перед Министерством образования и науки РФ, дают неполную структуру приема в цифрах. Типовые с изменениями – это типовые показатели, для которых усовершенствован способ представления данных. Нетиповые – новые, традиционно не используемые показатели, дающие качественную характеристику процесса, а также помогающие оценить качество абитуриента.

В табл. 2 типовые показатели № 1 и 4 доработаны с учетом удобства анализа не абсолютных, а относительных показателей; показатель № 5 «Средний балл ЕГЭ» предлагается анализировать не единым числовым значением, а с разделением на предметы, т. е. средний балл ЕГЭ, например, по физике. Средний балл ЕГЭ зачисленных, рассчитанный отдельно по каждому предмету, позволит выявить необходимость дополнительной подготовки студентов по тому или иному предмету. Кроме того администрацией вуза может быть принято решение об установлении минимального балла, например, по профильному предмету.

В табл. 2 предложены четыре нетиповых показателя:

1) «Своевременность предоставления документации» – позволяет оценить подпроцессы, связанные с разработкой документов, требуемых Минобрнауки, а также подпроцессы, связанные с предоставлением отчетности администрации вуза;

2) «Количество выявленных технических ошибок» – характеризует подпроцесс формирования базы данных абитуриентов и студентов 1-го курса;

3) «Количество зачисленных профориентированных абитуриентов» – дает возможность сопоставить результаты приема с основной целью данного процесса;

4) «Результаты первой сессии первокурсников отдельно по категориям» (иногородние, профориентированные поступившие, учащиеся по целевому приему) – позволяет оценить качество реализации процесса «Прием студентов» в связи с существующей проблемой «некачественного» абитуриента.

С помощью системы типовых и нетиповых показателей открывается новая возможность определения количественной и качественной оценки приема в вуз. С внедрением информационных технологий в вузе, в том числе и в приемной комиссии [3], появляются новые возможности мониторинга любых заданных параметров в базе данных абитуриентов-студентов.

Управление процессом «Прием студентов» и повышение его эффективности – это важнейшая задача для администрации вуза, которая требует формулировки цели процесса, установления целевых значений показателей, а также разработки плана мероприятий по достижению запланированного результата. Кроме того, важно четко понимать разделение функций системы управления по организации приема:

– планирование процесса «Прием студентов», установка целей процесса на текущий год, функция администрации ОУ (ректорат) при согласовании с Приемной комиссией, факультетами и кафедрами;

– организация процесса в соответствии с требованиями, контроль реализации процесса, функция Приемной комиссии при согласовании с администрацией ОУ (ректоратом);

– реализация процесса (обеспечение сотрудниками, мотивация сотрудников), функция кафедр и факультетов университета.

Таблица 2

№	Показатель	Классификация (тип показателя)	Метод расчета значения показателя	Периодичность измерения	Критерий оценки (нормативное значение) показателя	Способ реагирования на полученные значения показателя
1	<i>Конкурс по вузу в целом по трем формам обучения</i>	Типовой с изменениями	(Кол-во поданных заявлений по соответствующей форме обучения/ КЦП на соответствующую форму обучения) · 100 %	Расчет проводится ежедневно (итоговое по результатам приема)	Коэффициент* КЦП	При количестве поданных заявлений, меньше КЦП на 10 июля, необходимо принять меры по дополнительному привлечению абитуриентов (реклама в СМИ, рассылка писем по электронной почте и пр.)
2	Процент выполнения контрольных цифр приема по формам обучения	Типовой	(Кол-во зачисленных абитуриентов по соответствующей форме обучения/ КЦП на соответствующую форму обучения) · 100 %	Расчет проводится по результатам приема	100 %	При невыполнении контрольных цифр приема на 100 % необходимо провести анализ причин и разработать стратегию на следующий год
3	Процент зачисленных по результатам олимпиад абитуриентов на дневную форму обучения		(Кол-во зачисленных по результатам олимпиад на дневную форму обучения/ КЦП на дневную форму обучения) · 100 %		Коэффициент* КЦП	При значении меньше установленного необходимо предпринять дополнительные меры по привлечению участников олимпиад (реклама в СМИ, рассылка писем по электронной почте и пр.)
4	<i>Процент зачисленных по договорам с оплатой стоимости обучения по формам обучения</i>	Типовой с изменениями	(Кол-во зачисленных по договорам с оплатой стоимости обучения на соответствующую форму обучения/ КЦП на соответствующую форму обучения) · 100 %	Измерение проводится по результатам приема	Коэффициент* КЦП	При значении меньше установленного необходимо предпринять дополнительные меры по привлечению контрактных абитуриентов (реклама в СМИ и пр.)
5	<i>Средний балл ЕГЭ зачисленных по каждому предмету</i>		Сумма баллов ЕГЭ зачисленных по каждому из 3 предметов отдельно / кол-во зачисленных	Расчет проводится по результатам приема	Чем больше значение, тем лучше (max 300)	При среднем балле ЕГЭ по профильному предмету меньше 60 необходимо принять меры (например, дополнительные занятия по предмету для студентов первого курса)
6	Процент иногородних, поступивших в КЦП	Типовой	(Кол-во иногородних, зачисленных на дневную форму обучения / КЦП на дневную форму обучения) · 100 %		В пределах количества мест для проживания в общежитии	При количестве иногородних абитуриентов, выше количества мест в общежитии, необходимо изменить условия поселения в общежития университета

№	Показатель	Классификация (тип показателя)	Метод расчета значения показателя	Периодичность измерения	Критерий оценки (нормативное значение) показателя	Способ реагирования на полученные значения показателя
7	Процент зачисленных по результатам целевого приема	Типовой	(Кол-во абитуриентов, зачисленных по целевому приему на дневную форму обучения / КЦП на дневную форму обучения) · 100 %	Расчет проводится по результатам приема	% , устанавливаемый документами Минобрнауки	При значении меньше установленного % необходимо провести анализ причин и разработать меры по привлечению целевых студентов (рассылка писем в организации, обеспечивающие целевой прием)
8	<i>Кол-во не своевременно оформленных документов (поданных форм отчетности, разработанных Правил приема и пр.)</i>	Нетиповой	Сравнение требуемой и реальной даты предоставления документа	Измерение проводится в даты, предусмотренные Порядком приема [4]	0	При количестве несвоевременно оформленных документов больше 5 необходимо разработать меры по предотвращению несоблюдения сроков
9	<i>Кол-во выявленных технических ошибок в базе данных абитуриентов</i>		Метод прямого калькулирования	Измерение проводится по результатам приема		При количестве ошибок больше 5 необходимо разработать меры по их дальнейшему предотвращению (провести дополнительное обучение сотрудников)
10	<i>Количество зачисленных профорientированных абитуриентов</i>		(Кол-во профорientированных абитуриентов, зачисленных на дневную форму обучения / КЦП на дневную форму обучения) · 100 %	Расчет проводится по результатам приема	Коэффициент* КЦП	При значении меньше установленного необходимо разработать меры по привлечению профорientированных абитуриентов (рассылка писем по электронной почте и пр.)
11	<i>Результаты первой сессии первокурсников (количество отчисленных) отдельно по категориям</i>		(Кол-во отчисленных студентов 1-го курса дневной формы обучения/ КЦП на дневную форму обучения) · 100 %	Расчет проводится по результатам первой сессии		При значении больше установленного необходимо провести анализ и разработать меры по мотивации студентов

* Коэффициенты задаются ежегодно администрацией вуза на основании сравнительного анализа с вузами-конкурентами.

Таким образом, в результате проведенного анализа обоснована необходимость введения нескольких нетиповых показателей для управления процессом «Прием студентов», распределены функции системы управления процессом, возможности мониторинга системы показателей и принятия обоснованных решений администрацией ОУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вишнякова Е. А., Комаров Б. Г. Организация приема // Материалы докл. 64-й науч.-практ. конф. ППС СПбГЭТУ «ЛЭТИ». СПб., 2011.
2. Методические рекомендации по внедрению типовой модели системы качества образовательного учреждения. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006.
3. Вишнякова Е. А. Повышение эффективности приемной кампании за счет внедрения информационных систем управления вузом // Проблемы современной экономики. СПб., 2011. № 4.
4. Порядок приема граждан в имеющие государственную аккредитацию образовательные учреждения высшего профессионального образования (с изменениями) / Утв. приказ. Минобрнауки РФ от 21 окт. 2009 г. № 442.

E. A. Vishnyakova

PROCESS “SELECTION OF STUDENTS” IN QUALITY MANAGEMENT SYSTEM IN THE INSTITUTE OF HIGHER EDUCATION AND QUALITY MEASURING INDICATORS OF THE PROCESS IMPLEMENTATION

In the article the author considered management of process “Selection of Students” in quality management system of the institute of higher education. Quality measuring indicators of the process implementation were offered.

Institute of higher education, process, indicators of the process



УДК 81'42

Н. В. Степанова

КОГНИТИВНО-ДИСКУРСИВНЫЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПРЕССЫ В ПЕРИОД КРИЗИСА (НА МАТЕРИАЛЕ АНГЛОЯЗЫЧНОЙ ПЕРИОДИКИ 2008–2009 гг.)

Проводится когнитивно-дискурсивный анализ англоязычной экономической прессы в кризисные периоды. Проведенное исследование позволило выявить концепты, функционирующие в дискурсе экономической прессы во время кризиса, эксплицировать содержание концептов НЕУДАЧА/FAILURE и СТРАХ/FEAR, а также обозначить особенности использования и вербализации этих концептов и их репрезентантов на страницах англоязычной прессы.

Дискурс, масс-медиадискурс, концепт, когнитивно-дискурсивный анализ, экономический кризис, экономическая пресса

Изучение масс-медийного дискурса – сравнительно новая область исследований, открывающая широкое разнообразие направлений деятельности как для лингвистов, так и для ученых смежных с языкознанием областей.

Проблемами дискурса занимаются многие исследователи, в частности, необходимо отметить работы Т. А. ван Дейка, В. И. Карасика, М. Л. Макарова, Ю. Е. Прохорова, С. П. Сметаниной, В. Е. Чернявской.

П. Д. Арутюнова, М. М. Бахтин, П. Р. Гальперин, В. Г. Костомаров, Ю. С. Степанов исследуют дискурс в рамках стилистики; Д. Б. Гудков, С. В. Иванова, В. В. Красных, Ю. М. Лотман – в области лингвокультурологии. С позиций когнитологии дискурс изучают Ч. Филмор, Н. П. Болдырев, А. Кибрик и др. Существуют исследования, посвященные критическому анализу дискурса СМИ. Среди них работы Р. Фоулера, Л. Бархо, А. Карвальо.

Дискурс масс-медиа периода экономического кризиса – новая тема для изучения. Насколько нам известно, дискурс СМИ в условиях кризиса анализу не подвергался. Поставленная проблема представляется актуальной, поскольку кризисы в мировой экономике происходят с определенной степенью регулярности.

Кризис постоянно сопровождает общество и представляет собой переломный момент, когда многое в жизни социума и отдельных людей меняется. Изменениям подвергается не только сфера, в которой происходит кризис, но и смежные с ней области, а также

язык, фиксирующий происходящее на различных уровнях. Дискурс кризисного периода значительно отличается от дискурса относительно спокойной, некризисной эпохи и в связи с этим требует отдельного исследования.

Подтверждение этому тезису находим в книге Дж. Лакоффа и М. Джонсона «Метафоры, которыми мы живем»: «Если метафора влияет на процесс принятия решений в проблемных ситуациях, то количество метафор должно возрастать в периоды общественно-политических и экономических кризисов» [1]. Авторы пишут о функционировании метафоры, однако идея может быть экстраполирована на язык кризисной эпохи в целом, ведь «именно в период кризисов общество нуждается в интенсивном поиске решений существующих проблем» [1].

Все изменения и процессы, происходящие в общественной жизни, в политике и в экономике, находят непосредственное отражение в языке. Рецессия определенным образом влияет на функционирование языка, которое, в свою очередь, наиболее ярко прослеживается в деятельности СМИ. Различные медиа постоянно затрагивают тему экономического спада, в деталях описывая проблемы и перспективы, предлагая способы выхода из кризиса. Не является исключением и язык экономической прессы, который существенно меняется под воздействием мирового кризиса.

Исследование проводилось на материале англоязычной экономической периодики. Были использованы методы когнитивно-дискурсивного подхода, которые связаны с концептуальным и дискурсивным анализом; дефиниционный анализ, а также метод анализа синонимических рядов.

Проведенное на основе когнитивно-дискурсивного анализа исследование позволяет доказать возможность экспликации содержания концептов, выявить основные когнитивные признаки изучаемых концептов, а также наиболее типичные и специфические случаи функционирования каждого из них в английском финансово-экономическом дискурсе.

Экономическая пресса представляет собой особый, напрямую связанный с экстралингвистическими факторами тип дискурса. Обращение когнитивной лингвистики к дискурсу масс-медиа помогает обнаружить новые особенности восприятия и переработки информации обществом в целом и его отдельными группами в частности.

Важная роль в процессе дискурсивного анализа принадлежит базовому понятию когнитивной лингвистики – понятию «концепт». Дискурсивный анализ масс-медиа удобно проводить с помощью концептов, поскольку когнитивный подход к исследованию помогает описать функционирование отдельных концептов в дискурсе СМИ [2].

Когнитивный анализ неразрывно связан с дискурсивным анализом. Дискурс выступает как концептуализатор и одновременно как средство идентификации концептов.

Когнитивный подход к исследованию предполагает изучение того, как концепт существует в дискурсе, что позволяет не только рассмотреть происходящие процессы в системе языка, но и выявить изменения в современной языковой картине мира [2].

Е. С. Кубрякова отмечает формирование новой когнитивно-дискурсивной парадигмы лингвистического знания: «...Каждое языковое явление может считаться адекватно описанным и разъясненным только в тех случаях, если оно рассмотрено на перекрестке когниции и коммуникации» [3].

Экономический дискурс представляет собой динамичное, контекстуальное явление и определяет особые условия функционирования в нем концептов. К основным концептам, функционирующим в сознании носителей языка во время рецессии, относятся, с нашей точки зрения, концепты НЕУДАЧА/FAILURE и СТРАХ/FEAR.

Содержание концептов СТРАХ/FEAR и НЕУДАЧА/FAILURE во многом определяется ситуативным характером экономического дискурса, его зависимостью от конкретного контекста, а также способностью сочетать языковые и экстралингвистические аспекты. Изучение концептов СТРАХ/FEAR и НЕУДАЧА/FAILURE в пространстве дискурса экономической прессы дает возможность выявить четкую структуру этих концептов; понять, каким образом сложившаяся ситуация влияет на содержание концептов, на принадлежность тех или иных компонентов концепта его ядру или периферии. Иными словами, дискурс-анализ экономической прессы позволяет определить место отдельных составляющих концептов СТРАХ/FEAR и НЕУДАЧА/FAILURE в концептосфере, т. е. их значимость для носителей языка в ходе кризиса.

Концепт СТРАХ/FEAR относится к эмотивной сфере. В ходе кризиса существует страх перед опасностью и, в особенности, – перед неопределенностью. Концепт СТРАХ/FEAR передает ощущение тревоги, беспокойства, внутренних и внешних изменений, происходящих в человеке. Он может быть связан с олицетворением, когда носитель языка отождествляет страх с каким-либо живым существом [4].

НЕУДАЧА/FAILURE обычно понимается как отрицательный результат, неблагоприятный исход какого-либо дела, замысла и концептуализируется как потеря (здоровья, собственности, свободы, власти и т. д.) или нарушение принятой нормы [5].

В составе выбранных концептов выделяются три слоя: понятийный, образный и ценностный. Каждый из этих слоев изучается отдельно. Понятийный компонент представляет собой базовую часть концепта, хранится в сознании в вербальной форме и может воспроизводиться в речи непосредственно. Понятийная часть концепта отражена в лексическом значении репрезентирующих его слов, она выявляется на основании исследования словарных дефиниций, а также синонимических рядов лексем СТРАХ/FEAR и НЕУДАЧА/FAILURE. Таким образом, анализ понятийного компонента происходит на лексическом уровне.

Образный и ценностный слои изучаются на основе анализа функционирования концептов в дискурсе СМИ, в данном случае на страницах экономической прессы. В ходе анализа образного и ценностного компонентов концептов СТРАХ/FEAR и НЕУДАЧА/FAILURE осуществляется работа на лексико-фразеологическом и семасиологическом уровнях, т. е. на данной стадии исследования основное внимание уделяется лексическим и фразеологическим единицам (включая паремии) и стилистическим приемам различного характера.

При обращении к понятийному слою концептов применяется дефиниционный анализ и анализ синонимов. Образный слой изучается при помощи концептуального и дискурсивного анализов.

Лексический анализ концептов НЕУДАЧА/FAILURE и СТРАХ/FEAR проводился на материале статей «The Financial Times», «The Wall Street Journal», а также журнала «The Economist» (2008–2009). Была выявлена общность трактовки кризиса всеми тремя изданиями. Так, в каждом из них говорится о том, что настоящий кризис – это сильнейшее потрясение со времен 1930-х гг., в связи с чем часто производится сравнение с Великой депрессией. Упадок в экономике отражает использование таких лексических единиц, как *crisis*, *recession*, *debt*, *fall*, *bail-out*, *cuts*. Часто кризис сравнивается с плохой погодой (*storm*, *clouds*, *eclipse*).

Большая часть выявленной лексики связана непосредственно с упадком, неудачами, провалами в экономике, вредным воздействием рецессии (*crisis, inflation, unstable, failure, fail, recession, disaster, disastrous, collapse, tough, exposure to the collapse, shrinkage, shock-wave, deterioration*).

Основными тематическими группами лексики, вербализующей концепт НЕУДАЧА/FILURE, являются: кризис (*crisis, recession, collapse, imbalance, stress, default, failure, disaster, confusion, shockwave, deficit, debt*); упадок, сокращение (*drop, decline, plummet, plunge, tumble, contract, sink, reduce, slump, reduce, shrink, lower, cut, fall, downgrade, downturn*); увольнения (*fire, redundant, dismiss*); понесенный ущерб (*losses, lose, damage, undermine, scars, poverty, unemployment, pain, trouble*).

Результаты исследования подтверждают, что специфика концепта НЕУДАЧА/FAILURE в полной мере проявляется на лексическом уровне. Лексика, репрезентирующая рассматриваемый концепт, – это, прежде всего, длинный синонимический ряд, связанный с такими понятиями, как «кризис» и «неудача»: *crisis, failure, recession, disaster, collapse, confusion, trouble, default*. Соответствующим образом, не менее ярко в ней отображается лексико-семантическая группа (ЛСГ) «упадок» (*fall, drop, decline, plummet, plunge, tumble, contract, sink, reduce, plunge, slump*).

Еще большим разнообразием отличается ЛСГ «вред, потери», включающая в себя всевозможные проявления кризиса, выраженные словами: *damage, pain, trouble, scars, unemployment, poverty, hunger, death, suicide* и т. д.

В журнале «The Economist» финансовый коллапс метафорически сопоставляется с непогодой, штормом, ураганами, облачностью, бурями и дождями. В этом русле был написан целый выпуск издания под соответствующим названием «Into the Storm».

Лексический анализ показал, что в этом издании концепт НЕУДАЧА/FAILURE представлен единицами, связанными с собственно рецессией (*crisis, debt, collapse, recession, default, deficit, crunch, depression, financial crash, devaluation, inflation, bankruptcy, imbalance, swathe*) и ее отрицательным воздействием (*tension, woe, shock, pain, hurt, turmoil, suffer, hesitation, confusion, loss, damage, regret, wound, misfortune, destroy, danger, pessimistic, harm, unemployment, slow, deep, sharp, risky, alarming, scary, unstable, hungry, distressed, poor, panicky*), с падением производства (*slash, dive, abate, contract, downturn, decline, sink, fall, drop, tumble, shrink, plunge, low, cut, slow, down, short, diminish, shortfall, decay, plummet, slump, shut down, depth, lack*), с займами (*lend, borrowing costs, loan, mortgage*), с ошибками, допускаемыми в ходе кризиса (*mistake, devalue, mismanagement, inaction, undermine, frustrate*).

Результаты анализа концепта НЕУДАЧА/FAILURE на семасиологическом уровне свидетельствуют о том, что среди выразительно-изобразительных средств языка, участвующих в вербализации концепта, преобладают гипербола, эпитет и метафора.

С помощью гиперболы журналисты предпринимают попытку передать эмоциональную оценку экономических неудач, а также преувеличить их значимость в глазах читателя [2, с. 102]. Например: *It was like having a motor-way without speed limits¹, the issue is the potentially huge losses down the road², a loss of wealth & opportunities is universal after the deepest & the longest recession for several generations³*.

¹ Hill A. Today's crisis and the Great Depression // The Financial Times. 2009. October 30. URL: <http://www.ft.com>.

² Van Duyn A. On Wall Street: Credit crisis is far from over by // The Financial Times. 2009. July 10. URL: <http://www.ft.com>.

³ Giles C. Economic cost: Crisis leaves lasting scars // The Financial Times. 2009. October 5. URL: <http://www.ft.com>.

Эпитет содержит в себе эмотивные, экспрессивные и оценочные коннотации, благодаря которым выражается отношение автора к кризисной ситуации (*disastrous collapse, staggering proportions, buoyant levels, anaemic growth, increasing stress, heavy investments, tumbling oil prices, sharp economic deterioration, reviving growth, full-blown debt crisis*).

Метафора привлекает внимание читателя, ярко и наглядно передавая провал в экономике и его последствия за счет скрытого сравнения (*crisis leaves lasting scars, the distribution of this pain varies widely, there is more pain to come in the financial sector, suffered losses in the recession, felt severe pain, the scars will be permanent, Spanish recession tightens its grip*⁴).

Также довольно часто в рассматриваемых статьях и новостных сообщениях используется ирония (*the music stopped & so did the dancing*⁵, *the notion that the US was an open & fluid society had always been as much myth as reality*⁶), применение которой отражает критический взгляд автора на проблему и ее источники [2, с. 119].

На семасиологическом уровне исследуемый концепт представлен не только тропами, но и стилистически используемыми идиоматическими выражениями (*China is caught in a «dollar trap»*⁷, *we blow a hole in a dollar*), литературно-разговорной лексикой и сленгом (*global capitals dried up, stable interest rate causes people to go a little bit crazy, I think the whole system went crazy, people hunkered down behind high tariff barriers*⁸, *a plan has been iced*⁹), экспрессивными лексическими единицами (*a fact that is starting to down on many investors, disappointed expectations, escape, repayments have jumped around 50 %*¹⁰).

Среди фигур речи встречается инверсия, тесно переплетенная с иронией автора статьи (*So low has its stock fallen, the music stopped & so did the dancing*¹¹).

Исследование концепта СТРАХ/FEAR проводилось на лексическом уровне. В языке экономической периодики на фоне кризиса было выявлено беспокойство, предвидение возможной опасности дальнейшего углубления кризиса. Такие лексические единицы, как *risk, risky, threaten, warn, panic, fear, challenge, unstable, worried, vulnerable* встречаются здесь постоянно. Особое место в такого рода лексике отводится теме увольнения, потери работы (*unemployment, job loss*). Весь синонимический ряд слов такого типа в английском языке представлен в исследуемых нами англоязычных изданиях.

Тематическая группа «опасность» в исследованных статьях отличается большим разнообразием: *risk, risky, danger, threaten, panic, fear, challenge, warn, unstable, concerns, worry, exposure, unstable, disastrous*.

В каждой статье ощущается неуверенность в будущем, неопределенность (например, встречается очень большое количество вопросительных конструкций и условных предложений).

⁴ Mallet V. Spanish recession tightens its grip // The Financial Times. 2009. August 15. URL: <http://www.ft.com>.

⁵ Roche D. Eastern Europe and the Financial Crisis // The Wall Street Journal. 2009. March 28. URL: <http://europe.wsj.com>.

⁶ Giles C. Crisis leaves G7 on its last legs // The Financial Times. 2009. October 2. URL: <http://www.ft.com>.

⁷ Harris J. The Last Great Dollar Crisis // The Wall Street Journal. 2009. December 1. URL: <http://europe.wsj.com>.

⁸ Hill A. Today's crisis and the Great Depression // The Financial Times. 2009. October 30. URL: <http://www.ft.com>.

⁹ Van Duyn A. On Wall Street: Credit Crisis is far from over // The Financial Times. 2009. July 10. URL: <http://www.ft.com>.

¹⁰ Meltzer A. H. Preveting the Next Financial Crizis // The wall Street Journal. 2009. October 22. URL: <http://europe.wsj.com>.

¹¹ Giles C. Crisis leaves G7 on its last legs // The Financial Times. 2009. October 2. URL: <http://www.ft.com>.

Проведенное исследование позволяет утверждать, что дискурс кризисного периода действительно отличается от дискурса прессы в отсутствие рецессии. Устойчивое функционирование концептов СТРАХ/FEAR и НЕУДАЧА/FAILURE в дискурсе англоязычных периодических изданий экономического характера подтверждает прямую связь языка финансово-экономической прессы с экстралингвистическими факторами.

В данной статье был сделан акцент на лексическом и семасиологическом исследовании концептов кризисного периода. В период глобального кризиса общественное внимание приковано к дальнейшему развитию экономики, с одной стороны, и к причинам возникновения существующих проблем во избежание их повторения в будущем, с другой.

НЕУДАЧА/FAILURE представляет собой концепт, непосредственно связанный с наступлением кризиса, его причинами, последствиями и существованием в реальном времени. В отличие от концепта СТРАХ/FEAR он обращен в прошлое и побуждает к постоянному анализу произошедшего. В этом смысле НЕУДАЧА/FAILURE является первоисточником, провоцирующим зарождение концепта СТРАХ/FEAR, ориентированного на то, чему еще предстоит случиться. Концепт СТРАХ/FEAR имеет отношение к будущему, к предстоящим изменениям, к ожиданиям и перспективам.

НЕУДАЧА/FAILURE в период финансового коллапса концептуализируется главным образом как потеря (работы, статуса, денег); как сильное потрясение (сравнимое только с Великой депрессией); как плохая погода в любых проявлениях; как упадок, провал, вредное воздействие. Концепт СТРАХ/FEAR связан, прежде всего, с неуверенностью в будущем, с опасностью и трудностью задач, которые предстоит решить.

Специфика концепта НЕУДАЧА/FAILURE во многом прослеживается уже на уровне лексики, репрезентирующей его. Длинные ряды синонимов лексической единицы FAILURE, составляющей ядро концепта (*crisis, failure, recession, disaster, collapse, confusion, trouble, default*), служат подтверждением тому, что экономический дискурс кризисной эпохи тесно связан с прошедшими событиями и их результатами, с анализом ошибок и неудовлетворенностью многочисленными финансовыми неудачами.

Лексико-семантическая группа «упадок», имеющая непосредственное отношение к понятию «неудача» и примыкающая к ядру концепта, также отличается разнообразием в большинстве проанализированных статей (*fall, drop, decline, plummet, plunge, tumble, contract, sink, reduce, plunge, slump*). Наконец, группы «вред, потери» и «ошибки, допускаемые в ходе кризиса или послужившие причиной его возникновения», находящиеся на периферии концепта, в свою очередь, заслуживают упоминания. К первой ЛСГ относятся следующие примеры: *damage, pain, trouble, scars, unemployment, poverty, hunger, death, suicide* и т. д. Вторая ЛСГ включает в себя слова типа *mistake, devalue, mismanagement, inaction, undermine, frustrate*.

Резюмируя анализ семасиологии, необходимо упомянуть о тех стилистических приемах, которые преобладают в рассмотренных статьях и раскрывают содержание концептов НЕУДАЧА/FAILURE и СТРАХ/FEAR. К таким приемам относятся главным образом гипербола, эпитет и метафора. В ряде случаев можно говорить об иронии, а также стилистически используемых идиоматических выражениях. Среди фигур речи доминирует инверсия.

Многочисленные апеллирование к выразительным средствам языка и к фразеологии наглядно демонстрирует связь кризисной ситуации с эмоциональной реакцией на нее. Пре-

увеличения, экспрессивные и оценочные коннотации помогают раскрыть суть концептов НЕУДАЧА/FAILURE и СТРАХ/FEAR. Использование идиом и тропов привлекает внимание читателя, предлагая критически оценить финансовый коллапс и его причины.

Работа с концептами СТРАХ/FEAR и НЕУДАЧА/FAILURE дает возможность описать и объяснить особенности восприятия рецессии авторами статьи. Возможность экспликации возникает благодаря тому, что именно анализ концепта как целостного, многослойного образования выявляет чисто языковые, а через них и менее явные психологические нюансы отношения человека к миру.

Концепты НЕУДАЧА/FAILURE и СТРАХ/FEAR являются неотъемлемой частью кризисного мировосприятия представителей лингвокультурного сообщества, вынужденного бороться с рецессией любого рода. Их изучение дает возможность на разных уровнях рассмотреть особенности дискурса, в котором они функционируют. В период финансовых потрясений особого внимания к себе требует экономический дискурс, следовательно, названные концепты представляют наибольший интерес, будучи вербализованными на страницах финансово-экономической периодики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лакофф Дж., Джонсон М. Метафоры, которыми мы живем: пер. с англ. / Под ред. и с предисл. А. Н. Баранова. М.: Эдиториал УРСС, 2004. 256 с.
2. Прокофьева Т. А. Концепт «кризис» в современном политическом дискурсе: автореф. дис. ... канд. филол. наук / РГПУ им. А. И. Герцена. 2006.
3. Прохоров Ю. Е. Концепт, текст, дискурс в структуре и содержании коммуникации: автореф. дис. ... д-ра филол. наук / Гос. инст. рус. языка им. А. С. Пушкина. 2006.
4. Солошенко А. В. Концепты РИСК/RISK и ПУТЕШЕСТВИЕ/TRAVEL в англоязычной и русскоязычной лингвокультурах: проблемы перевода: автореф. дис. ... канд. филол. наук / Кубанский гос. ун-т. 2007.
5. Хомкова Л. Р. Структурно-семантическая характеристика метафорического фрейма «Работа – успех – неудача». На материале немецкого языка: автореф. дис. ... канд. филол. наук / Иркутский гос. лингв. ун-т. 2002.

N. Stepanova

*COGNITIVE DISCOURSE ANALYSIS OF ECONOMIC PRESS IN TIMES OF CRISIS
(BASED ON ENGLISH NEWSPAPERS AND MAGAZINES 2008–2009)*

The article presents cognitive discourse analysis of English and American economic press during the period of the crisis 2008–2009. The research based on the economic periodicals enables to reveal concepts typical for the economic discourse of recessionary periods, explain the entity of concepts FAILURE and FEAR, emphasize main features of these concepts use and verbalization.

Discourse, mass media discourse, concept, cognitive discourse analysis, economic crisis, economic press



УДК 615. 471:617. 7

Е. П. Попечителев, В. В. Шаповалов

50-ЛЕТИЕ БИОТЕХНИЧЕСКОГО ОБРАЗОВАНИЯ

Проведен анализ основных событий и достижений биотехнического образования в России вообще и в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в частности за 50 лет существования данного направления.

Биомедико-техническое образование, биотехнические системы, кафедра электронной медицинской аппаратуры, кафедра биомедицинской электроники и охраны среды, кафедра биотехнических систем, учебно-методический совет, образование и научные исследования

Пятьдесят лет назад в начале 1960-х гг. акад. РАН Аксель Иванович Берг произнес на заседании отделения биологии АН СССР свою историческую речь, в которой призвал к объединению ученых и специалистов наук биологического направления с инженерами, физиками и математиками для взаимного обогащения идеями и знаниями. Его поддержал другой выдающийся ученый – хирург с мировым именем, акад. РАМН Петр Андреевич Куприянов. Этот призыв был активно подхвачен во многих ведомствах и организациях Москвы, Ленинграда, Киева, Томска и других городах страны. В научном совете по Комплексной проблеме «Кибернетика» была организована специальная секция биологической кибернетики и бионики. Однако этого было мало для коренного решения поставленной задачи. Необходимо было думать о будущем такого сотрудничества и начать подготовку технических специалистов – инженеров совершенно нового типа, с особыми требованиями к их профессиональной подготовке. Они должны хорошо понимать врачей, знать особенности живого организма, уметь создавать принципиально новую медицинскую технику на базе самых современных достижений физики, химии, электроники и конструкционных материалов, а также по-новому подойти к технологиям применения этой техники на живом объекте, к обработке и интерпретации медицинской информации.

Выбор академика А. И. Берга остановился на его родном Ленинградском электротехническом институте (ЛЭТИ), профессором которого он был многие годы. После его выступления ученый совет ЛЭТИ (апрель 1962 г.) принял решение об организации в институте новой кафедры – кафедры электронной медицинской аппаратуры (ЭМА). Ректором ЛЭТИ в то время был известный ученый д-р техн. наук, проф. Н. П. Богородицкий, без поддержки и внимания которого организовать новую кафедру было бы очень трудно.



Н. П. Богородицкий

Примерно к этому же времени относится официальное начало подготовки подобных специалистов в наиболее развитых странах мира: США, Англии, Франции, Германии и др. Уже в 1990 г. только в США выпуск таких специалистов составил 1500 человек в год, а в их подготовке участвовали 192 университета. Программа «Bioengineering», включающая организацию и медико-технического образования, получила статус национальной. В России годовой выпуск инженеров медико-технического профиля достиг 300 человек только к 2002 г. при потребности в таких специалистах в несколько тысяч.

Сегодня, отмечая 50-летний юбилей этого направления науки и образования, можно зафиксировать смелость и своевременность его открытия. ЛЭТИ не только сформировал это перспективное направление образования для всей России, но и раскрыл его большой потенциал для решения многих задач биологии, медицины и здравоохранения. ЛЭТИ – головной технический университет России, в котором на разных кафедрах и факультетах успешно реализуются образовательные программы по разным направлениям не только непосредственно медицинской техники, но и широкого класса биотехнических систем, предназначенных для поддержания работоспособности и здоровья человека во всех сферах его деятельности. Тематика научных исследований в этом направлении привлекла внимание многих кафедр университета, превратив его в одно из стратегических направлений.

В статье проведен анализ основных достижений университета и кафедры биотехнических систем (БТС), которыми, без сомнения, университет может гордиться.



О. Б. Лурье

Образовательная деятельность. Первым заведующим кафедрой ЭМА стал д-р техн. наук, проф. Ошер Бениаминович Лурье. Это был крупный специалист в области усилительной техники, особенно в разработке видеоусилителей, автор методов расчета линейных систем в области низких частот, в частности, ему принадлежит метод исследования переходных процессов. Его монография «Усилители видеочастоты» переиздавалась несколько раз в России и за рубежом.

В то время основной проблемой медицинской техники считалась проблема усиления малоамплитудных низкочастотных (от 0,1 Гц до 1 кГц) биологических сигналов. Проф. О. Б. Лурье был наиболее подготовленным специалистом в этой области. Он сумел собрать вокруг себя молодой талантливый коллектив преподавателей и сотрудников (выпускников ЛЭТИ радиотехнического факультета), который практически с нуля начал новую в системе высшего образования страны образовательную программу.

Первый выпуск таких специалистов состоялся в 1964 г., так как в 1962 г. в первую группу были приглашены студенты нескольких факультетов вуза, которые успешно освоили учебную программу и защитили дипломные проекты. Так начала закладываться российская школа по подготовке специалистов, способных разрабатывать и эксплуатировать биомедицинскую технику. Впоследствии она преобразовалась в школу по биотехническим системам и технологиям, но в то время до полного завершения формирования этой школы было еще очень далеко.

В разные годы кафедрой руководили д-р техн. наук, проф. Вадим Константинович Лабу-тин (1972–1974), кандидаты техн. наук, доценты Константин Семенович Рожнов (1974–1975), Роберт Евгеньевич Быков (работал на кафедре ЭМА с 1962 г., а исполнял обязанности заведующего кафедрой в 1972 и 1974 гг.) и один из авторов этой статьи – Е. П. Попечителей (исполнял обязанности заведующего кафедрой в 1975–1976 гг.). Впоследствии Р. Е. Быков в 1975 г. после защиты докторской диссертации возглавил радиотехнический факультет и кафедру телевидения нашего университета, но всегда поддерживал тесные связи с кафедрой ЭМА.



В. К. Лабу-тин



К. С. Рожнов



Р. Е. Быков



Е. П. Попечителей

Каждый из руководителей кафедры вносил свой вклад в понимание и развитие кафедры и направления в целом. По инициативе К. С. Рожнова в 1975 г. кафедра получила новое название – кафедра биомедицинской электроники и охраны среды (БМЭ и ОС), которое сохранилось до марта 2008 г., когда она стала кафедрой биотехнических систем.

В 1976 г. кафедру БМЭ и ОС возглавил известный ученый и организатор науки, участник Отечественной войны, капитан первого ранга, проф., д-р техн. наук Владимир Михайлович Ахутин.

К моменту прихода проф. В. М. Ахутина кафедра уже имела «за плечами» опыт 14-летней работы по подготовке специалистов в области электронной медицинской техники и проведению научных исследований. Уже был накоплен определенный опыт, который позволял считать всех, кто работал на кафедре, зрелыми учеными, понимающими проблемы, задачи и трудности развития инженерной специальности,



В. М. Ахутин

связанной с разработкой и обслуживанием медицинской техники. Однако через несколько лет после прихода Владимира Михайловича многое изменилось во взглядах на сущность нового образовательного направления, что привело к новому пониманию и задач научных исследований в этой области. И это понимание было связано прежде всего с необходимостью развития системных взглядов на медико-биологические исследования как на *особые, обладающие специфическими особенностями технологии изучения живых систем*, в которых техническим средствам отводится вполне определенная роль. Осознание возможностей подключения технических систем к различным функциональным системам живого организма привело к осознанию фундаментальности проблем связи живого с неживым. Понимание взаимовлияния технических и биологических элементов друг на друга при работе в единой системе привело к пересмотру основных принципов разработки таких технических систем и технологий их использования.

Это не означает, что до прихода проф. В. М. Ахутина сотрудники кафедры не были знакомы с достижениями быстро развивающейся в то время теории систем, с проблемами управления состоянием организма человека и результатами исследований, которые были получены в организациях разного профиля по изучению биологических объектов разного типа. В учебном плане были предусмотрены специальные курсы, проводились семинары, посвященные обсуждению этих и смежных с ними вопросов. Однако глубокое понимание роли системных исследований и их влияния на решение практических задач не только медицины и биологии, но и других прикладных областей стало проявляться после того, как было сформулировано представление о новом классе *«технических систем, представляющих собой совокупность биологических и технических элементов, связанных между собой в едином контуре управления»* [1]. Это представление затем было развито и дополнено в коллективной монографии (1982), подготовленной сотрудниками кафедры БМЭ и ОС, которая долгие годы оставалось единственным учебным пособием по этому направлению [2]. Такие системы были определены как «биотехнические системы» (В. М. Ахутин, 1975). Принципиальные отличия этого класса систем от других технических систем связаны с включением в их структуру специальных «каналов информационного обмена» (КИО) технических и биологических элементов [3]. Отличительной особенностью КИО являлось обеспечение взаимной адаптации биологических и технических звеньев, без которой создать единую систему разнородных элементов невозможно. Эти каналы обеспечивают такие конструктивные решения и режимы функционирования технических элементов, чтобы максимально соответствовать морфологическим и психофизиологическим особенностям сопрягаемых с ними биологических элементов.

Работы кафедры БМЭ и ОС получили признание в стране. Оказалось, что многие вузы занимаются подобными проблемами, выполняют заказы по созданию новой медицинской техники и готовы к тесному сотрудничеству и в учебном процессе. С 1962 по 1982 гг.



В. И. Лоцилов



Л. М. Ананьев

в СССР были созданы еще несколько кафедр этого направления. Кроме Ленинграда они были организованы в Москве (МГТУ им. Н. Э. Баумана, заведующий кафедрой д-р техн. наук, проф. Владимир Иванович Лоцилов) и в Томске (Томский политехнический институт, заведующий кафедрой проф. Лев Мартемьянович Ананьев), а также в ряде союзных республик: на Украине, в Грузии, Белоруссии и др. Но только через 10 лет подобные кафедры стали появляться в разных регионах страны, их число быстро росло, формировались новые научно-образовательные школы в Курске, Самаре, Таганроге, Новгороде, Твери, во многих городах, в которых сохранился высокий научный и производственный потенциал, освободившийся в период перестройки.

Однако сразу возникли проблемы формирования учебных программ в технических вузах, которые открылись в разных регионах страны, имеющих специфические требования к медицинскому, а следовательно, и к медико-техническому обеспечению. С учетом большого разнообразия медицинской и биологической техники, для разработки и обслуживания которой требуется специальная подготовка инженеров, в рамках одной специальности – 1905 «Биотехнические и медицинские аппараты, системы и комплек-

сы» – уже в 1990-х гг. стали формироваться различные специализации. Они позволяли подготовить специалиста по определенному классу технических средств и конкретным условиям деятельности такого инженера.

Чтобы разобраться в том, что является главным в подготовке специалистов по медицинской технике, а что можно отнести к профилизации такого образования, были организованы семинары заведующих кафедрами, в которых принимали участие и ведущие доценты этих кафедр, а также представители промышленных предприятий. На рис. 1 приведена фотография с одного из таких семинаров, проводимого на базе МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва) в 1978 г. под руководством проф. В. И. Ложилова. Это был прообраз будущего учебно-методического совета (УМС).

Семинары проводились в вузах, заинтересованных в постановке образования этого направления, а их руководителями являлись заведующие принимающих кафедр, часто эти семинары совмещались с научно-техническими конференциями «Применение техники в медицине», на которых обсуждались новые предложения по разработке и производству медицинской техники. Работой по организации таких семинаров в разных городах страны руководил проф. В. М. Ахутин, многие сотрудники кафедры БМЭ и ОС выступали там с докладами об опыте учебной работы кафедры и имели возможность завязать творческие контакты со специалистами других кафедр, а работой по организации конференций занимался проф. В. И. Ложилов. Большое значение имели и международные конференции, одна из которых «Бионика-78» (председатель оргкомитета проф. В. М. Ахутин) стала определенной вехой в становлении нового образовательно-научного направления. Она собрала ученых из разных стран мира и многих союзных республик и способствовала объединению научных сил вокруг нового направления.



Рис. 1

Большую роль в распространении биотехнических идей сыграла еще одна инициатива В. М. Ахутина – организация Зимней научной школы для молодых ученых и выпускников вузов.

С момента организации кафедры ЭМА в Ленинграде существовала секция «Применение радиоэлектроники в биологии и медицине» при НТОРЭС им А. С. Попова. Ею руководил проф. О. Б. Лурье, и в нее входили несколько сотрудников кафедры. В 1976 г. проф. В. М. Ахутин организовал Совет директоров предприятий, занимающихся разработкой и выпуском медицинской техники, а следующим шагом была организация молодежной секции «Биомедицинская кибернетика» при Совете молодых ученых и специалистов ОК ВЛКСМ, объединившая молодых сотрудников этих предприятий. В разные годы этой секцией руководили Г. Н. Пахарьков, Е. П. Попечителей, А. П. Немирко, а потом и выпускники кафедры. Научным руководителем молодежной секции всегда оставался В. М. Ахутин. С активным участием этой секции и при поддержке Совета директоров в Ленинграде с целью привлечения к этой тематике выпускников вузов была организована Всесоюзная зимняя школа «БИМК», вдохновителем и научным руководителем которой был В. М. Ахутин.

Зимние школы проводились в феврале-апреле за городом, на базе известных пансионатов или домов отдыха, на берегу Финского залива или около крупных рек в области, в отрыве от всех городских развлечений и при поддержке научного совета АН по КП «Кибернетика» и предприятий города. На нее приезжали от 100 до 150 слушателей из разных городов страны, а в качестве лекторов приглашались ведущие ученые из разных научных центров. Эта школа просуществовала до 1995 г., когда она отметила свое 25-летие. Многие выпускники этой школы стали известными учеными, руководителями крупных организаций медико-технического профиля, профессорами ведущих технических университетов.

Последующие годы показали важность произошедших изменений в понимании общих проблем и задач нового научного направления. Характерной особенностью этого периода было возрастание научного интереса к проблемам человеческого фактора и его обеспечению, что не могло не повлиять на содержание учебной подготовки и на тематику научных исследований, развиваемых в ЛЭТИ и в других вузах России. Новые задачи биомедицинской науки, новые материалы и принципы построения техники для диагностики и лечения, поддержки состояния не только человека, но и других живых систем-организмов значительно расширили область профессиональных интересов технических специалистов. Формирование единого «образовательного пространства» в России по медико-техническому направлению начинается в 1979 г. И естественным шагом в этом направлении было преобразование семинаров в учебно-методический совет (УМС), объединивший вначале только 4 кафедры России – к трем отмеченным выше кафедрам добавилась кафедра в СЗПИ (Ленинград). Заведующим этой кафедрой до перехода в ЛЭТИ был В. М. Ахутин, а после него – выпускник кафедры д-р биол. наук, проф. Владимир Ильич Гуткин, работавший в свое время доцентом кафедры ЭМА в ЛЭТИ.

Председателем УМС был назначен проф. В. М. Ахутин, а в состав УМС входили ведущие сотрудники кафедры БМЭ и ОС. В 1979 г. создается первый «примерный» учебный план, который становится основой для разработки индивидуальных учебных планов для других вузов, разрабатываются программы учебных дисциплин на общей методологической основе – теории синтеза биотехнических систем, перестраиваются учебные лаборатории, меняется тематика курсовых и дипломных проектов.

После 1992 г. практически все кафедры в России были организованы при активном участии сотрудников кафедры БМЭ и ОС СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Встречи в разные годы и обсуждения научных достижений на одновременно проходящих конференциях были очень эффективны для распространения по стране передовых идей в образовании и достижений в области разработок новой медицинской техники. Такие мероприятия прошли в крупных центрах, таких как Ленинград, Москва, Тольятти, Ташкент, Томск и др. На них присутствовали представители здравоохранения, медицинских учреждений, промышленных предприятий, что способствовало формированию рабочих контактов и объединению и приводило к открытию подготовки специалистов по этому направлению.

Необходимо отметить роль ученых секретарей УМС, которыми в основном были выпускники кафедры; они хорошо понимали трудности организации медико-технического образования в техническом вузе и вместе с другими сотрудниками кафедры выезжали в те вузы, которые стремились организовать у себя подготовку инженеров по этому направлению.

Первым ученым секретарем УМС был назначен доцент кафедры БМЭ и ОС Сергей Владимирович Романов. В разное время секретарями УМС были доценты кафедры БМЭ и ОС Геннадий Николаевич Пахарьков, Константин Николаевич Болсунов, Борис Иванович Чигирев, Владимир Анатольевич Куземкин. От секретаря совета многое зависит, и каждый из названных здесь специалистов внес в дело развития УМС существенный вклад.

С 1992 г. работа по управлению УМС была поручена проф. Е. П. Попечителю, который в это время возглавил кафедру БМЭ и ОС, став ее заведующим. К 1994 г. состав УМС увеличился до 12 кафедр за счет открытия медико-технической подготовки в союзных республиках, а к 2007 г. только в России уже 65 кафедр из 57 технических университетов вели подготовку специалистов по разным специальностям и магистерским специализациям (рис. 2).

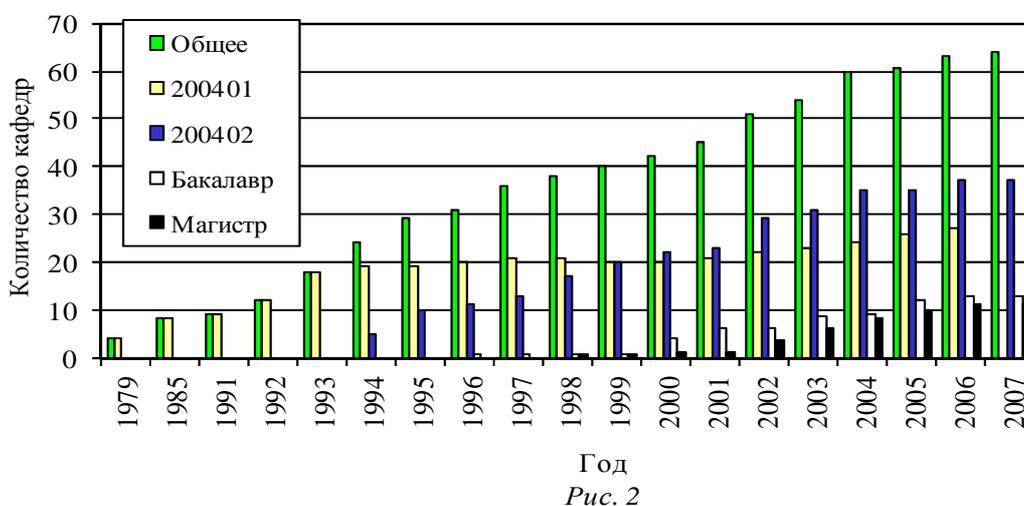


Рис. 2

В 1994 г. по инициативе кафедры БМЭ и ОС и УМС был поставлен вопрос о выделении отдельной специальности по подготовке так называемых «клинических» инженеров, основным полем деятельности которых определялись медицинские организации и учреждения; им поручалось обслуживание техники, участие в проведении медицинских мероприятий, а также обработка врачебной информации и разработка нестандартного оборудования. Условия работы клинических инженеров существенно отличаются от работы инженера промышленного предприятия, поэтому и подготовка их должна осуществляться по иным учебным планам. Так появились две специальности – одна, ориентированная на разработку и производство медицинской техники (200401), а другая (200402) – на эксплуатацию, обслуживание и ремонт этой техники в условиях медицинских учреждений. Конечно, это были только основные их обязанности; на первых порах таким инженерам приходилось заниматься поддержкой всех инженерных задач медицинских центров, так как инженерные службы этих центров были развиты плохо. Для системы среднего профессионального образования предусмотрены еще две специальности: 200403 – монтаж, техническое обслуживание и ремонт медицинской техники и 200404 – протезно-ортопедическая и реабилитационная техника. Однако инженерная подготовка по ним в существовавшем стандарте не предусматривалась. Впоследствии эти специальности также были включены в учебные планы подготовки инженеров.

После обсуждения на нескольких заседаниях УМС было принято решение о поддержке подготовки бакалавров и магистров техники и технологий, и в 1996 г. в СПбГЭТУ состоялся первый выпуск бакалавров по направлению «Биомедицинская инженерия». Началась подготовка нового типа технических специалистов для работы в научных и учебных заведениях. Такой стиль работы УМС – детальное обсуждение всех предложений по совершенствованию программ медико-технического образования и принятие согласованных решений – характерен для него и сегодня.

В связи с быстрой сменой технологических баз проектирования, элементной базы и конструкционных материалов; изменением организационных и технологических подходов к решению медико-биологических задач усиливается роль программ непрерывной подготовки, переподготовки, повышения квалификации и сертификации инженерных кадров, работающих с биомедицинской техникой. При СПбГЭТУ «ЛЭТИ» в 1998 г. впервые в стране была сформирована новая программа переподготовки и повышения квалификации технических специалистов, работающих в системе здравоохранения, и для этого был открыт Региональный центр интегрированного медико-технического образования (РЦ ИМТО). Сегодня этот центр (директор – доцент кафедры БТС Г. Н. Пахарьков) – известная в России организация, получившая лицензию на повышение квалификации инженерных кадров по медицинской технике от Росздравнадзора Минздрава России. За последние 5 лет обучение прошли более 1000 слушателей из 123 городов России.

Другой особенностью работы УМС можно назвать пристальное внимание к разработке учебно-методических пособий. Так сложилась ситуация, что по данному направлению подготовки отсутствовали учебники и учебные пособия по всем основным дисциплинам учебного плана. Перед УМС была поставлена задача ликвидации этого пробела, и за период с 2000 по 2007 гг. кафедрами выпущено более 250 так необходимых для учебного процесса пособий, появились первые учебники по медицинской технике¹, практически обеспечившие учебно-методическими изданиями весь цикл подготовки. Практически все издания имеют гриф учебно-методического объединения, причем ряд из них был выпущен через центральные издательства «Высшая Школа», «Радио и связь» и др.

Наш университет определен как головной в направлении высшего профессионального биомедико-технического образования, его ведущая роль подтверждается тем, что в названии учебно-методического объединения – УМО по образованию в области радиотехники, электроники, биомедицинской техники и автоматизации – отражено и это направление. И сегодня университет и кафедра БТС остаются авторами многих инициатив, связанных с совершенствованием биотехнического образования. В 2005 г. кафедра выступила инициатором открытия нового направления подготовки технических специалистов по двухступенчатой структуре высшего профессионального образования – направления «Биотехнические системы и технологии». Это направление наилучшим образом отражает современное понимание проблемы технического обеспечения «биологического фактора», существенно рас-

¹ Например: Биотехнические системы. Теория и проектирование / В. М. Ахутин, А. П. Немирко, Е. П. Попечителей и др. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. 220 с.; Падерно П. И., Попечителей Е. П. Надежность и эргономика биотехнических систем. СПб.: Элмор, 2007. 264 с.; Корневский Н. А., Попечителей Е. П., Серегин С. П. Медицинские приборы, аппараты, системы и комплексы. Курск: ОАО «ИПП “Курск”», 2009. 986 с.

ширяет область приложения технических знаний для исследования разнообразных биологических объектов и материалов, прежде всего, для поддержки жизнедеятельности и трудовой деятельности человека в разных условиях его существования.

Пристальное внимание руководства университета к этому направлению образования привело к формированию нового факультета в его структуре – факультета приборостроения, биомедицинской и экологической инженерии (ФПБЭИ), который объединил кафедры, связанные с этой тематикой. Первым деканом нового факультета был избран заведующий кафедрой БМЭ и ОС, к тому времени заслуженный деятель науки РФ, проф. Е. П. Попечителей. Сегодня этот факультет называется по-новому – факультет измерительных и биотехнических систем (ФИБС).

С 2010 г. председателем УМС назначен д-р техн. наук, проф. Валентин Викторович Шаповалов, ставший с 2008 г. заведующим кафедрой БТС. За последние годы кафедра полностью перешла на подготовку бакалавров и магистров по новому направлению «Биотехнические системы и технологии». Появились новые программы подготовки, существенно изменилось содержание учебного плана и учебных программ дисциплин, были включены новые дисциплины, изменился преподавательский состав кафедры за счет привлечения специалистов из промышленности и научных организаций. В связи с появлением новых образовательных программ произошла перестройка учебных лабораторий.



В. В. Шаповалов

Научные исследования. Научные исследования на кафедре всегда были в центре внимания ее сотрудников, и каждый ее руководитель вносил новую тематику. Так, доц. Р. Е. Быков развивал на кафедре научное направление, связанное с применением телевизионных методов для анализа биологических микроструктур. Под его руководством были разработаны первый телевизионный микроскоп; методы анализа окрашенных препаратов крови, изображений, полученных при ультразвуковой и рентгеновской интроскопии. Проф. В. К. Лабутин внес в программы работы кафедры идеи моделирования, автоматизации обработки информации, теории управления. Доц. К. С. Рожнов увидел общие проблемы биомедицинской техники и экологии, расширив круг интересов специалистов кафедры на эту область применения технических методов.

В 1975 г. Р. Е. Быков первым в стране защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук, и это побудило других сотрудников кафедры к активной научной работе. За прошедший период 6 сотрудников кафедры (Е. П. Попечителей, А. П. Немирко, З. М. Юлдашев, В. В. Шаповалов, А. Н. Калиниченко, Л. А. Манило) в разные годы защитили докторские диссертации. Кроме того, несколько сотрудников университета из других кафедр также нашли свои научные интересы в этой области техники (В. М. Сидоренко, заведующий кафедрой инженерной защиты окружающей среды; А. М. Василевский, проф. кафедры квантовой электроники опико-электронных приборов; П. И. Бегун, проф. кафедры прикладной механики; Н. В. Лысенко, проректор университета, заведующий кафедрой телевизионной и видеотехники). За прошедшие годы кафедра выпустила более сотни докторов и кандидатов наук для России и зарубежных стран – Болгарии, Венгрии, Германии, Польши, Иордании, Китая и др.

Традиционные направления научных исследований на кафедре были связаны с системами анализа медико-биологических данных и изображений, фотометрическими системами, комплексами для проведения офтальмологических и психологических исследований, оценкой состояния человека-оператора (ЧО) и малых групп операторов в реальных условиях и рядом других. За прошедшее время сотрудниками кафедры получено более 140 авторских свидетельств и патентов, выполнено более 300 научно-исследовательских работ по разным государственным и отраслевым программам.

Значительные изменения в тематике научных исследований произошли после прихода на кафедру проф. В. М. Ахутина. История биотехнического образования в России, а с 1976 г. и кафедры БМЭ и ОС тесно связана с жизнью и деятельностью этого замечательного ученого, основоположника теории биотехнических систем, человека, который обладал многими талантами и прожил яркую, красивую жизнь.

В 1963 г. он организовал и возглавил первую в стране научно-исследовательскую Лабораторию биомедицинской кибернетики, которая в 1966 г. была преобразована в Особое конструкторское бюро биологической и медицинской кибернетики (ОКБ БИМК). При этом председателем комиссии по оценке целесообразности открытия этого ОКБ был проф. О. Б. Лурье, в то время заведующий кафедрой ЭМА.

После 1976 г. В. М. Ахутин возглавил кафедру БМЭ и ОС ЛЭТИ. С этого времени деятельность ОКБ БИМК и кафедры БМЭ и ОС была тесно связана. В ОКБ работало много выпускников кафедры, а молодые сотрудники этих двух организаций стали основой для создания молодежного содружества – известной всей стране молодежной школы «БИМК», о которой говорилось ранее.

Работы ОКБ БИМК получили широкую известность в стране и за рубежом по уникальным разработкам в различных областях техники, связанной с человеком. Они были связаны с разработкой биотехнических систем эргатического типа, в которых функции управления сложными техническими комплексами поручались ЧО. При этом одними из принципиальных проблем, с которыми столкнулись специалисты ОКБ и кафедры, стали проблемы жизнеобеспечения ЧО, организации его рабочего места, контроля и управления его состоянием в реальном масштабе времени и другие проблемы обеспечения так называемого «человеческого фактора». Все перечисленные задачи решались с помощью технических средств, которые нужны были и медицинским организациям, так как оказалось, что принципы построения таких средств общие. Поэтому среди разработок широко была представлена и медицинская техника: аппараты искусственного кровообращения, искусственной вентиляции легких, контроля состояния сердечно-сосудистой системы, общего состояния человека и др.

В ряде вузов России появились и другие проектно-конструкторские организации, занимающиеся разработкой медицинской техники. Был организован Совет директоров таких организаций по России, позволивший согласовывать программы разработок, организовать обмен опытом. Конечно же, это повлияло и на формирование программ подготовки специалистов для этой области техники. В. М. Ахутин вошел в этот Совет как заместитель председателя, а председателем стал известный ученый и организатор науки д-р техн. наук, проф. В. Г. Захаревич, сегодня он ректор одного из крупнейших университетов России – Южного федерального университета, с которым у СПбГЭТУ «ЛЭТИ» всегда были особые дружеские отношения.

Произошедшие в стране изменения в организации научных исследований привели к реорганизации конструкторских бюро при вузах, и в 1989 г. ОКБ БИМК преобразовался в Научно-исследовательский конструкторско-технологический институт биотехнических систем (НИКТИ БТС). В. М. Ахутин – основатель и директор, главный конструктор НИКТИ БТС; директором он был до 2004 г. В 2010 г. НИКТИ БТС стал структурным подразделением СПбГЭТУ и получил название НИКТИ БТС СПбГЭТУ. Сегодня НИКТИ БТС – один из ведущих научных центров России по направлению создания биотехнических систем различного назначения.

Благодаря разработанным математическим методам текущей диагностики и прогнозирования состояний живого организма на базе автоматической обработки информации с биологического объекта в реальном масштабе времени были решены практические задачи создания уникальных систем автоматического контроля и управления состоянием человека в экстремальных условиях глубоководных длительных погружений, подготовки и осуществления выхода космонавтов в свободное космическое пространство. Эти автоматизированные комплексы, диагностические системы для реанимации, а также биотехнические комплексы для длительного хранения изолированных функционирующих органов не имеют аналогов в мире.

Особенно продуктивным оказался предложенный В. М. Ахутиным и широко применяемый в разработках НИКТИ БТС метод поэтапного моделирования для оптимизации автоматизированных систем с ЧО. Принципиально новый подход к синтезу биотехнических систем эргатического типа позволил адекватно сопрягать управляемые системы с сенсорными и моторными органами человека. Была разработана под руководством главного конструктора проекта В. В. Шаповалова автоматизированная система раннего выявления отклонений в здоровье детей от 3 до 15 лет по 25 профилям патологий с выработкой заключения о состоянии здоровья и рекомендаций по дообследованию. За цикл работ в этом направлении в 1991 г. коллективу сотрудников НИКТИ БТС присуждена Государственная премия Совета министров СССР. Модификация этой системы предназначена для обследования подростков от 12,5 до 18,5 лет. Система прошла государственные испытания Министерства здравоохранения и медицинской промышленности России и подтвердила высокую медицинскую эффективность (более 92 %) по всем профилям детских патологий. С 1991 г. система внедрена (более 2500 комплексов) в сотнях городов России и более 5 млн детей осматриваются каждый год.

С 2004 г. по рекомендации В. М. Ахутина директором НИКТИ БТС стал известный специалист в области биотехнических систем д-р техн. наук, лауреат Государственной премии Совета министров СССР В. В. Шаповалов; он же с 2008 г. возглавил и кафедру БТС в СПбГЭТУ «ЛЭТИ». В НИКТИ БТС выполнены сотни правительственных научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Эти технические системы неоднократно удостоивались высших наград и дипломов почета на международных выставках.

Сегодня направления работ НИКТИ БТС связаны:

– с разработкой, внедрением в практическое здравоохранение и сопровождением автоматизированных систем скринирующей диагностики (для детского населения, для взрослого населения, для раннего выявления риска сахарного диабета, для скрининга беременных на предмет риска рождения детей с синдромом Дауна и др.);

– разработкой и сопровождением систем оценки и контроля состояния космонавтов в процессе тренировочных работ;

- разработкой морских биотехнических систем;
- разработкой информационных систем для медицинских научных учреждений.

Большое внимание руководство НИКТИ БТС всегда уделяло сотрудничеству с кафедрой БТС в подготовке специалистов по новым направлениям техники.

Термин «биотехнические системы» прочно вошел в привычный словарь технических терминов, объединяя не только технические изделия, комплексы, приборы, но и процессы, отражающие последовательности операций над объектами, выполнение которых позволяет изменять состояние исходного объекта в выбранном направлении. Причем выбор операций, а также определение условий их выполнения и параметров биотехнических средств, участвующих в них, основан на применении отмеченных выше принципов.

Увеличивается число вузов, открывающих новые кафедры биотехнического направления, приходят новые специалисты в УМС, появляются новые идеи в подготовке по направлению «Биотехнические системы и технологии», эффективно развиваются связи кафедры БТС и НИКТИ БТС с медицинскими учреждениями и промышленными предприятиями. Это основа развития, и такое состояние нужно только приветствовать. А сложившийся дружный коллектив единомышленников – это база для дальнейшего совершенствования образования в этой области и появления новых достижений в области биотехнических систем и технологий. Мы всегда помним и следуем кличу родоначальника биотехнического образования в России Владимира Михайловича Ахутина: «И... полный вперед!»

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ахутин В. М. Бионические аспекты синтеза биотехнических систем // Информационные материалы: Кибернетика. 1976. № 4 (92). С. 3–26.
2. Биотехнические системы. Теория и проектирование / В. М. Ахутин, А. П. Немирко, Е. П. Попечителей и др. Л.: Изд-во ЛГУ, 1981. 220 с.
3. Попечителей Е. П. Каналы взаимодействия биологических и технических звеньев в биотехнических системах / Изв. ЛЭТИ. 1982. Вып. 318. С. 14–22.

E. P. Popchitelev, V. V Shapovalov

50 YEARS OF BIOTECHNICAL EDUCATION IN RUSSIA AND SPbETU «LETI»

An analysis of the main developments and achievements technical education for biotechnical education in Russia and in the SPbETU «LETI» over the 50 years of its existence.

Technical education for biomedicine, biotechnical system, department of electro-medical equipment, department of biomedical electronics and environmental protection, department of biotechnological systems, Educational-methodical Council, education and research

Сведения об авторах

Абрахим Аус А.

Аспирант кафедры робототехники и автоматизации производственных систем СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 895-16-81. E-mail: inkeedo83@mail.ru.

Авдеев Борис Яковлевич

Профессор кафедры информационно-измерительных систем и технологий СПбГЭТУ, д-р техн. наук.

Тел.: (812) 234-93-93. E-mail: bya-avdeev@rambler.ru.

Айдарова Сауле Байляровна

Профессор КазНТУ, д-р хим. наук.

E-mail: s.aidarova@ntu.kz, zvezda.s.a@gmail.com.

Богданович Александр Андреевич

Студент кафедры радиотехнических систем СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 346-28-59.

Вишнякова Елена Анатольевна

Ассистент кафедры прикладной экономики СПбГЭТУ, аспирантка.

Тел.: +7 (921) 375-60-31. E-mail: vishelena@yandex.ru.

Гареев Камиль Газинурович

Аспирант кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 759-40-32. E-mail: kkgareev@rambler.ru.

Герман-Галкин Сергей Германович

Профессор БГТУ «Военмех», д-р техн. наук, профессор.

Тел.: (812) 234-68-18. Email: vvputov@mail.ru.

Грачева Ирина Евгеньевна

Доцент кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ, канд. физ.-мат. наук.

Тел.: (812) 234-30-16. E-mail: IEGrachova@mail.ru.

Дзлиев Сослан Владимирович

Начальник МОЛ СЭТ ФЭА СПбГЭТУ, д-р техн. наук, доцент.

Тел.: +7 (905) 222-96-45. E-mail: dzlsv@mail.ru.

Ермолаев Виктор Николаевич

Доцент лаборатории инженерного профиля КазНТУ, канд. хим. наук.

E-mail: vicnadyerm@mail.ru.

Жнакин Дмитрий Михайлович

Аспирант МОЛ СЭТ СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 988-35-53. E-mail: dzhnakin@gmail.com.

Имаев Дамир Хабибович

Профессор кафедры автоматики и процессов управления СПбГЭТУ, д-р техн. наук.

Тел.: +7 (921) 584-64-45. E-mail: damir.imaev@mail.ru.

Кайралиева Тальмира Габдолкаримовна

Студентка кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (950) 035-43-81. E-mail: ta.88@mail.ru.

Калинин Борис Вячеславович

Начальник отдела ОАО «ВНИИРА» (СПб.). Аспирант кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 335-25-55 (доб. 32-12). E-mail: boris-k@bk.ru.

Красичков Александр Сергеевич

Доцент кафедры радиотехнических систем СПбГЭТУ, канд. техн. наук, доцент.

Тел.: (812) 346-28-59. E-mail: krass33@mail.ru.

Кузнецов Владимир Евгеньевич

Доцент кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ, канд. техн. наук, доцент.

Тел.: +7 (911) 292-67-59. E-mail: vekuznetsov56@mail.ru.

Кухарев Георгий Александрович

Профессор кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ СПбГЭТУ, д-р техн. наук.

Тел.: +7 (911) 118-24-44. E-mail: kuga41@mail.ru.

Ламкин Иван Анатольевич

Аспирант, инженер кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-31-64. E-mail: ialamkin@mail.ru.

Малахов Кирилл Александрович

Инженер-программист ООО «Авансофт», магистр техники и технологии по направлению «Телекоммуникации» СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (911) 944-62-61. E-mail: malakhov.k@gmail.com.

Маругин Алексей Сергеевич

Доцент кафедры радиотехнических систем СПбГЭТУ, канд. техн. наук, доцент.

Тел.: (812) 346-28-59. E-mail: ASM_ETU@mail.ru.

Молдовян Николай Андреевич

Профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ, д-р техн. наук, профессор.

Тел.: (812) 234-28-27. Email: nmold@mail.ru.

Мошников Вячеслав Алексеевич

Профессор кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ, д-р физ.-мат. наук, профессор.

Тел.: (812) 234-30-16. E-mail: VAMoshnikov@mail.ru.

Мурсаев Александр Хафизович

Профессор кафедры вычислительной техники СПбГЭТУ, д-р техн. наук, профессор.

Тел.: (812) 532-02-33. E-mail: sashamursaev @ yandex.ru.

Новикова Евгения Сергеевна

Ассистент кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: (812) 234-27-73. E-mail: evgeshka19@mail.ru.

Нгуен Ван Шо

Аспирант кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ.
Тел.: +7 (964) 320-00-19. E-mail: nvsovn@yahoo.com.

Осетров Александр Владимирович

Профессор кафедры электроакустики и ультразвуковой техники СПбГЭТУ, д-р техн. наук.
Тел.: (812) 314-17-49. E-mail: AVOsetrov@list.ru.

Орлов Владимир Константинович

Доцент кафедры радиотехнических систем СПбГЭТУ, канд. техн. наук, доцент.
Тел.: (812) 346-28-59. E-mail: OVK@hotbox.ru.

Перевалов Юрий Юрьевич

Аспирант МОЛ СЭТ СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (950) 012-41-02. E-mail: p.youra@yahoo.com.

Пищалев Константин Евгеньевич

Инженер ООО «ИНТЕРМ», соискатель МОЛ СЭТ СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 975-97-53. E-mail: pischalev@mail.ru.

Поляхов Николай Дмитриевич

Профессор кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ, д-р техн. наук.
Тел.: (812) 234-68-18. E-mail: ndpol@mail.ru.

Попечителев Евгений Парфирович

Профессор кафедры биомедицинской электроники и охраны среды СПбГЭТУ, засл. деятель науки РФ, д-р техн. наук.

Тел.: +7 (921) 946-54-62. E-mail: eugeny_p@mail.ru.

Путов Виктор Владимирович

Зав. кафедрой систем автоматического управления СПбГЭТУ, декан ФЭА, профессор, д-р техн. наук.

Тел.: (812) 234-68-18. E-mail: vvputov@mail.ru.

Советов Борис Яковлевич

Зав. кафедрой автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ, д-р техн. наук, профессор.

Тел.: (812) 234-27-73. E-mail: bysovetov@mail.ru.

Соколова Анастасия Алексеевна

Ассистент кафедры радиотехнических систем СПбГЭТУ, аспирантка.

Тел.: +7 (911) 838-27-82. E-mail: aa.sokolova@mail.ru.

Степанова Наталия Валентиновна

Ассистент кафедры иностранных языков СПбГЭТУ, аспирантка.

Тел.: +7 (921) 349-19-09. E-mail: Native87@rambler.ru.

Тарасов Сергей Анатольевич

Доцент кафедры микро- и наноэлектроники СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-31-64. E-mail: SATarasov@mail.ru.

Филатов Денис Михайлович

Ассистент кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ, аспирант.

Тел.: (812) 234-68-18. E-mail: denf2412@list.ru.

Хо Нгок Зуй

Аспирант кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (952) 369-67-89. E-mail: aimezthngocduy207@yahoo.com.

Чжан Ян

Аспирант кафедры систем автоматического управления СПбГЭТУ.

Тел.: (812) 234-68-18. E-mail: y.zh@mail.ru.

Нгуен Кьем Чьен

Аспирант кафедры систем автоматизированного управления СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (952) 373-57-99. E-mail: kiemchien0812@yahoo.com.

Шелудько Виктор Николаевич

Первый проректор СПбГЭТУ, канд. техн. наук, доцент.

Тел.: (812) 234-25-39. E-mail: VNSheludko@eltech.ru.

Шестопалов Михаил Юрьевич

Проректор по научной работе СПбГЭТУ.

Тел.: +7 (921) 946-01-18. E-mail: shestopalov_08@mail.ru.

Щеголева Надежда Львовна

Доцент кафедры математического обеспечения и применения ЭВМ СПбГЭТУ, канд. техн. наук.

Тел.: +7 (981) 754-56-32. E-mail: stil_hope@mail.ru.

Яшин Александр Иванович

Профессор кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления СПбГЭТУ, д-р техн. наук, профессор.

Тел.: (812) 234-27-73. E-mail: a_yashin@inbox.ru.

Шаповалов Валентин Викторович

Зав. кафедрой биотехнических систем СПбГЭТУ, д-р техн. наук.

Тел.: (812) 234-01-33. E-mail: val.shapovalov@mail.ru.

Правила представления рукописей авторами

В редакционный совет журнала «Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ»» необходимо представить:

- файлы на дискете либо CD (в отдельных случаях по предварительному согласованию с редсоветом допустима передача материалов по электронной почте):
 - рукопись статьи;
 - сведения об авторе(ах);
- документы на листах формата А4 (1 экз.):
 - рукопись статьи (статья должна быть объемом 4–8 маш. с., обзорная статья – до 16 маш. с.);
 - сведения об авторе(ах);
 - рекомендация кафедры с указанием наименования тематического раздела, в котором предполагается опубликование материала;
 - экспертное заключение о возможности опубликования материала в открытой печати;
 - сопроводительное письмо (только для авторов, не работающих (не обучающихся) в СПбГЭТУ «ЛЭТИ»).

Сведения об авторах должны содержать:

1. Фамилию, имя, отчество (полностью) автора.
2. Основное место работы.
3. Должность.
4. Ученую степень, ученое звание.
5. Контактный телефон, адрес электронной почты.

Все сведения печатаются в строку (без пунктов) на русском и английском языках.

Правила оформления текста статьи

Статья должна быть тщательно отредактирована, содержать признаки научной публикации:

- текстовый редактор Microsoft Word версии не ниже 97;
- формат бумаги А4;
- параметры страницы: поля – верхнее 2.5 см, левое и нижнее 2.5 см, правое 2 см, верхний колонтитул 2 см, нижний колонтитул 2 см;
- основной текст статьи: шрифт «Times New Roman» 12 pt; выравнивание по ширине; первая строка с абзачным отступом 1 см; межстрочный интервал «Множитель 1.2».

На первой странице указывается индекс УДК (в левом верхнем углу; шрифт «Times New Roman» 14 pt; межстрочный интервал одинарный); далее даются инициалы и фамилии авторов, затем название статьи, аннотация статьи и ключевые слова на русском языке. Инициалы и фамилии авторов, название статьи, аннотация статьи и ключевые слова на английском языке размещаются в конце публикации после библиографического списка.

Перечень авторов разделен запятыми, инициалы перед фамилиями (шрифт «Times New Roman» 12 pt, жирный курсив; выравнивание по правому краю, абзачный отступ справа 1 см; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем и после него 6 pt, межстрочный интервал одинарный).

Название статьи набирается прописными буквами (шрифт «Times New Roman» 14 pt; жирный; выравнивание по левому краю; отступы слева и справа 1 см; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 6 pt, после него – 12 pt; межстрочный интервал одинарный).

Аннотация содержит 3–7 строк, характеризующих содержание статьи (шрифт «Times New Roman» 10 pt, курсив; выравнивание по ширине; отступы: слева и справа 1.5 см, первая строка 0.75 см; интервалы перед абзацем и после него 0 pt, межстрочный интервал одинарный).

Ключевые слова состоят из 3–10 слов и словосочетаний, отражающих содержание статьи, разделенных запятыми, в конце их перечисления точка не ставится; шрифт «Times New Roman» 10 pt, жирный; выравнивание по левому краю; автоматические переносы отключены; интервалы перед абзацем 6 pt, после него 9 pt; межстрочный интервал одинарный).

Далее следует текст статьи.

После основного текста следует библиографический список, который включает:

➤ *заголовок* «Список литературы» набирается прописными буквами (шрифт «Times New Roman» 12 pt; выравнивание по центру; интервалы: перед абзацем 6 pt, после него 6 pt; межстрочный интервал «Одинарный»);

➤ *библиографическое описание источника* с порядковым номером ссылки на него по тексту, начиная с первого, выполненное по ГОСТ 7.3–2003. Библиографическое описание документа. Введ. 01.07.2004 / Госкомстандарт. М., 2004 (отдельным абзацем; шрифт «Times New Roman» 10 pt; первая строка с абзацным отступом 0.7 см; выравнивание по ширине; межстрочный интервал одинарный).

Библиографический список не должен превышать 10 (для обзорных заказных статей – 20) наименований: приводятся только источники, на которые есть ссылки в тексте (ссылки на неопубликованные и нетиражированные работы не допускаются).

Для создания *формул* используются встроенные возможности Word и (или) редактора MathType. Необходимо использовать следующие установки редактора формул. Размеры: «полный» 12 pt, «подстрочный» 10 pt, «под-подстрочный» 8 pt, «символ» 14 pt, «подсимвол» 12 pt; стили: текст, функция, число – шрифт «Times New Roman», вектор-матрица – шрифт «Times New Roman», жирный; греческий малый, греческий большой, символ – шрифт «Symbol», прямой; переменная – шрифт «Times New Roman», курсив; интервалы: перед формулой 6 pt, после нее 6 pt.

На каждый рисунок и таблицу в тексте статьи необходимо дать ссылку. Каждый рисунок и таблица должны быть пронумерованы (напр.: Рис. 1, Табл. 3).

Текст в *таблицах* печатается через 1 интервал, шрифт «Times New Roman»; основной текст 10 pt, индексы 8 pt. Нумерационный заголовок содержит слово «Таблица» и ее номер арабскими цифрами (без знака номера перед ними и без точки на конце); выравнивается по правому краю таблицы и выделяется светлым курсивом; интервалы: перед таблице 4 pt, после нее 4 pt.

Рисунки цифрового формата (в электронном виде) создаются средствами Word или другими программами в черно-белом виде. Цветные рисунки не допускаются. Рисунки не редактируются. Основные линии на рисунках (границы блоков и соединительные линии на схемах, линии графиков) имеют толщину 1.25 pt, вспомогательные (линии-выноски, оси, размерные линии) – 0.75 pt.

Описание содержания рисунка, а также введенных на нем обозначений следует приводить в основном тексте статьи. Подпись под рисунком содержит только его номер (шрифт «Times New Roman», курсив, 10 pt) и располагается по центру рисунка. Все тексты и

обозначения на рисунке даются шрифтом размером 10 pt, индексы 8 pt с единичным межстрочным интервалом; цифровые обозначения на линиях выносок и номер рисунка даются курсивом. Буквенные обозначения фрагментов рисунка (шрифт «Times New Roman», курсив, 10 pt) ставятся внизу фрагмента; интервалы: перед рисунком 6 pt, после него 6 pt.

При невозможности представить электронные версии рисунков следует представить только твердые копии, обеспечивающие качественное воспроизведение рисунков после их сканирования (графики – черной тушью на белой бумаге, фотографии – на матовой бумаге размером не менее 9 × 12 см, не более 21 × 30 см).

Перечень основных тематических направлений журнала:

- Радиоэлектроника и телекоммуникации.
- Физика твердого тела и электроника.
- Информатика, управление и компьютерные технологии.
- Автоматизация и управление.
- Электротехника.
- Приборостроение и информационные технологии.
- Биотехнические системы в медицине и экологии.
- Управление качеством, инновационный и антикризисный менеджмент.
- Гуманитарные науки.
- История науки, образования и техники.
- Современные технологии в образовании.

Рукописи аспирантов печатаются бесплатно.

Технические вопросы можно выяснить по адресу: Izvestiya-leti@yandex.ru