

ИНФОРМАЦИОННО- УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

4(59)/2012



*Член редакционного совета
журнала «Информационно-
управляющие системы»,
член-корр. РАН,
доктор техн. наук
Л. И. Чубраева*

В 1962 году в результате деления факультета авиационных приборов и электрооборудования Ленинградского института авиационного приборостроения на два новых появился факультет электрооборудования летательных аппаратов.

С течением времени менялось название факультета и вуза — сейчас это факультет интеллектуальных систем управления и нанотехнологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, — но неизменным оставалось стремление сотрудников факультета отдавать все свои силы, умение и энтузиазм подготовке высококвалифицированных кадров для аэрокосмической отрасли науки, техники, промышленности, а также напряженной научно-исследовательской деятельности.

Большая часть статей, представленных в данном выпуске журнала, подготовлена сотрудниками факультета.

В 2012 году факультету интеллектуальных систем управления и нанотехнологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения исполняется 50 лет. Редакция журнала «Информационно-управляющие системы» поздравляет сотрудников факультета и желает дальнейших творческих успехов.

Учредитель

ОАО «Издательство «Политехника»»

Главный редактор

М. Б. Сергеев,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Зам. главного редактора

Г. Ф. Мощенко

Ответственный секретарь

О. В. Муравцова

Редакционный совет:

Председатель А. А. Оводенко,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. Н. Васильев,
чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. Н. Козлов,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Б. Мейер,
д-р наук, проф., Цюрих, Швейцария

Ю. Ф. Подоплекин,
д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. В. Симаков,
д-р техн. наук, проф., Москва, РФ

Л. Фортуна,

д-р наук, проф., Катания, Италия

А. Л. Фрадков,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Л. И. Чубраева,

чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, С.-Петербург, РФ

Ю. И. Шокин,

акад. РАН, д-р физ.-мат. наук, проф., Новосибирск, РФ

Р. М. Юсупов,

чл.-корр. РАН, д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редакционная коллегия:

В. Г. Анисимов,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Б. П. Безручко,

д-р физ.-мат. наук, проф., Саратов, РФ

Н. Блаунштейн,

д-р физ.-мат. наук, проф., Беэр-Шева, Израиль

А. Н. Дудин,

д-р физ.-мат. наук, проф., Минск, Беларусь

А. И. Зейфман,

д-р физ.-мат. наук, проф., Вологда, РФ

Е. А. Крук,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. Ф. Мелехин,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. В. Смирнов,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

В. И. Хищенко,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. А. Шальто,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

А. П. Шепета,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Э. М. Юлдашев,

д-р техн. наук, проф., С.-Петербург, РФ

Редактор: А. Г. Ларионова

Корректор: Т. В. Звертановская

Дизайн: С. В. Барашкова, М. Л. Черненко

Компьютерная верстка: С. В. Барашкова

Адрес редакции: 190000, Санкт-Петербург,

Б. Морская ул., д. 67, ГУАП, РИЦ

Тел.: (812) 494-70-02

E-mail: 80x@mail.ru

Сайт: www.i-us.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати,

телерадиовещания и средств массовых коммуникаций.

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-12412 от 19 апреля 2002 г.

Журнал входит в «Перечень ведущих рецензируемых научных журналов

и изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные

результаты диссертации на соискание ученой степени доктора

и кандидата наук».

Журнал распространяется по подписке. Подписку можно оформить через

редакцию, а также в любом отделении связи по каталогу «Роспечать»:

№ 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс.

© Коллектив авторов, 2012

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ

Артемко Ю. Н., Агапов В. А., Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. Групповое управление актуаторами контррефлектора радиотелескопа 2

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Чубраева Л. И., Шишлаков В. Ф. Роль информационных технологий при создании новой техники 10

Козюченко С. С., Павленко А. В., Павлов К. Ю., Саксаганский Г. Л. Комплексная система управления установкой для тестирования элементов дивертора ИТЭР 16

Пронин М. В., Воронцов А. Г., Хон А. Ю. Управление сверхпроводящим индуктивным накопителем энергии 20

Кручинина И. Ю., Антипов В. Н. Проблемные вопросы создания высокоскоростных мини-турбогенераторов и пути их решения 25

Чубраев Д. В. Информационная система оперативного планирования европейского оператора передающей сети 35

Костюкова О. И., Федорцова Н. М. Исследование свойств решений линейно-квадратичных параметрических задач оптимального управления 43

Денисенко Д. А., Ефанов В. Н. Синтез робастных систем управления в среде ортогональных функций экспоненциального вида 52

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ И ПРОЦЕССОВ

Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Экспертная система анализа и прогнозирования аварийных ситуаций в энергетических установках 59

Иванов Н. Н. Вероятностная модель диффузионного распределения для оценки надежности радиоэлектронных приборов 64

Ульянов Г. Н., Иванов С. А., Владыко А. Г. Модель канала управления беспилотного летательного аппарата с нечетким логическим контроллером 70

ПРОГРАММНЫЕ И АППАРАТНЫЕ СРЕДСТВА

Ронжин А. Л., Глазков С. В. Метод автоматического распознавания голосовых команд и речевых акустических событий 74

ЗАЩИТА ИНФОРМАЦИИ

Волхонский В. В. Некоторые вопросы разработки методологии построения систем контроля доступа и выбора технологии идентификации 78

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАНАЛЫ И СРЕДЫ

Марковский С. Г., Марковская Н. В. Расчет средней задержки алгоритма разрешения конфликтов в системах радиочастотной идентификации 84

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

Ларин В. П., Шелест Д. К. Формирование информационного обеспечения надежности бортовой аппаратуры на стадии проектирования 93

КРАТКИЕ СООБЩЕНИЯ

Шепета А. П. Определение зоны поиска надводного объекта по данным предварительного целеуказания 98

ХРОНИКА И ИНФОРМАЦИЯ

Сохраняя и приумножая традиции 100

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

104

АННОТАЦИИ

110

ЛР № 010292 от 18.08.98.

Сдано в набор 15.06.12. Подписано в печать 20.07.12. Формат 60×84/8.

Бумага офсетная. Гарнитура SchoolBookC. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 13,3. Уч.-изд. л. 16,3. Тираж 1000 экз. Заказ 353.

Оригинал-макет изготовлен в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

Отпечатано с готовых диапозитивов в редакционно-издательском центре ГУАП.

190000, Санкт-Петербург, Б. Морская ул., 67.

УДК 681.5

ГРУППОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ АКТУАТОРАМИ КОНТРЕФЛЕКТОРА РАДИОТЕЛЕСКОПА

Ю. Н. Артеменко,

канд. техн. наук, заведующий отделом

Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва

В. А. Агапов,

младший научный сотрудник

В. В. Дубаренко,

доктор техн. наук, профессор

А. Ю. Кучмин,

канд. техн. наук

Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург

Рассматривается задача построения кинематической и динамической моделей гексапода, используемого для перемещения контррефлектора. Исследуется проблема расчета выдвигений штоков актуаторов с учетом быстрогодействия их приводов и инерции системы контррефлектор — гексапод.

Ключевые слова — радиотелескоп, гексапод, актуатор.

Введение

В больших радиотелескопах для компенсации ошибок наведения главного зеркала и дефектов его поверхности и для реализации режимов сканирования обычно используются системы автоматического управления (САУ) пространственным положением элементов зеркальной системы. Ранее [1] было установлено, что за счет линейного и углового перемещений контррефлектора (КР) зеркальной системы антенны, производимых соответствующими САУ, может осуществляться компенсация изменения фокусного расстояния и положения фокальной оси главного зеркала, а также частичная компенсация фазовых искажений, вызываемых деформацией элементов главного зеркала.

В работе [2] показано, что одним из перспективных вариантов решения данной проблемы может быть использование гексаподов для обеспечения угловых и линейных перемещений КР.

Моделируемый КР радиотелескопа установлен на подвижную платформу гексапода и перемещается шестью актуаторами. Каждый актуатор состоит из штанги с линейным электроприводом, позволяющим изменять ее длину. Каждый актуатор соединен с нижней (НП) и верхней (ВП) платформами гексапода двумя двухстепенными

шарнирами, позволяющими толкателям свободно вращаться по двум углам. Основание с помощью соответствующих неподвижных штанг крепится к конструкции главного зеркала. Такая конструкция позволяет перемещать КР по трем линейным (x , y и z) и трем угловым (β , θ и α) координатам, где β — поворот относительно оси x , θ — поворот относительно оси y , α — угол поворота относительно оси z .

Кинематическая модель гексапода

Чтобы описать движение КР, необходимо ввести базовую систему координат (БСК) $E_0 = (\mathbf{o}_0, [\mathbf{e}_0])$, где \mathbf{o}_0 — начало координат БСК, $[\mathbf{e}_0]$ — тройка базисных векторов (ортов) БСК. Для углов, векторов и матриц вращения нижний индекс — это номер системы координат (СК), верхний индекс является номером СК, относительно которой определяются угловое и линейное положения, второй верхний индекс обозначает номер СК, в которой рассчитываются координаты векторов. Матрицы вращения \mathbf{c}_j^i имеют вид

$$\mathbf{c}_j^i(\boldsymbol{\varphi}_j^i) = \mathbf{c}_1(\beta_j^i) \cdot \mathbf{c}_2(\theta_j^i) \cdot \mathbf{c}_3(\alpha_j^i),$$

где $\boldsymbol{\varphi}_j^i = [\beta_j^i \ \theta_j^i \ \alpha_j^i]^T$, а β_j^i , θ_j^i и α_j^i — углы простейших вращений относительно осей x , y и z ос-

ответственно. Матрицы простейших вращений имеют вид

$$c_1(\beta_j^i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta_j^i) & -\sin(\beta_j^i) \\ 0 & \sin(\beta_j^i) & \cos(\beta_j^i) \end{bmatrix};$$

$$c_2(\theta_j^i) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_j^i) & 0 & \sin(\theta_j^i) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_j^i) & 0 & \cos(\theta_j^i) \end{bmatrix};$$

$$c_3(\alpha_j^{ic}) = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_j^i) & -\sin(\alpha_j^i) & 0 \\ \sin(\alpha_j^i) & \cos(\alpha_j^i) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Введем связанную СК ВП $E_{1b} = (o_{1b}, [e_{1b}])$, где o_{1b} — начало координат СК ВП, которое относительно БСК определяется координатным столбцом $r_{1b}^{0,0}$; $[e_{1b}]$ — орты СК ВП. Ориентация СК ВП относительно БСК определяется углами простейших вращений Φ_{1b}^0 .

Чтобы задать начальное положение НП, введем систему координат начального положения нижней платформы СК НПО $E_{1c} = (o_{1c}, [e_{1c}])$, где o_{1c} — начало координат СК НПО, которое относительно СК ВП определяется координатным столбцом $r_{1c}^{1b,1b}$; $[e_{1c}]$ — орты СК НПО. Ориентация СК НПО относительно СК ВП определяется углами простейших вращений Φ_{1c}^{1b} .

Чтобы задать положение НП, введем связанную СК НП $E_1 = (o_1, [e_1])$, где o_1 — начало координат СК НП, которое относительно СК НПО определяется координатным столбцом $r_1^{1c,1c}$; $[e_1]$ — орты СК НП. Ориентация СК НП относительно СК НПО определяется углами простейших вращений Φ_1^{1c} . Положение СК НП относительно БСК описывается вектором r_1^0 , координатный столбец которого в БСК может быть вычислен по формуле

$$r_1^{0,0} = r_{1b}^{0,0} + c_{1b}^0 [r_{1c}^{1b,1b} + c_{1c}^{1b} r_1^{1c,1c}],$$

а угловое положение характеризуется матрицей вращения $c_1^0 = c_{1b}^0 c_{1c}^{1b} c_1^{1c}$, где c_i^j — матрицы вращения от соответствующих углов Φ_i^j .

Определим координаты крепления шарниров на верхней платформе в СК ВП: $r_{1bj1}^{1b,1b}$, $r_{1bj2}^{1b,1b}$, $r_{1bj3}^{1b,1b}$, $r_{1bj4}^{1b,1b}$, $r_{1bj5}^{1b,1b}$, $r_{1bj6}^{1b,1b}$, где нижний индекс обозначает номер шарнира на ВП. Аналогично введем координаты крепления шарниров на нижней платформе в СК НП: $r_{1j1}^{1,1}$, $r_{1j2}^{1,1}$, $r_{1j3}^{1,1}$, $r_{1j4}^{1,1}$, $r_{1j5}^{1,1}$, $r_{1j6}^{1,1}$, где нижний индекс обозначает номер шарнира на НП.

Текущие длины актуаторов могут быть определены как расстояния между соответствующими шарнирами верхней и нижней платформы по формуле

$$l_{1ji}^{1bji} = |r_{1ji}^{1b,1b} - r_{1bjj}^{1b,1b}|,$$

$$i = 1..6,$$

где $r_{1ji}^{1b,1b}$ — координаты точки крепления шарниров на нижней платформе в СК ВП, которые рассчитываются следующим образом:

$$r_{1ji}^{1b,1b} = r_{1c}^{1b,1b} + c_{1c}^{1b} [r_1^{1c,1c} + c_1^{1c} r_{1ji}^{1,1}],$$

$$i = 1..6.$$

В итоге выражение для текущих длин примет вид

$$l_{1ji}^{1bji} = |r_{1c}^{1b,1b} + c_{1c}^{1b} [r_1^{1c,1c} + c_1^{1c} r_{1ji}^{1,1}] - r_{1bjj}^{1b,1b}| =$$

$$= l_{0i} + \Delta l_{ai}, \quad i = 1..6, \quad (1)$$

где l_{0i} — начальные значения длин актуаторов; Δl_{ai} — текущие удлинения штоков актуаторов.

Продифференцировав $r_1^{0,0}$ и c_1^0 , учтя свойства кососимметрических матриц, получим выражения для линейных $v_1^{0,0}$ и угловых $\omega_1^{0,0}$ скоростей НП в БСК:

$$v_1^{0,0} = v_{1b}^{0,0} + c_{1b}^0 < r_{1c}^{1b,1b} +$$

$$+ c_{1c}^{1b} r_1^{1c,1c} >^T \omega_{1b}^{0,1b} + c_{1b}^0 c_{1c}^{1b} v_1^{1c,1c};$$

$$\omega_1^{0,0} = c_{1b}^0 \omega_{1b}^{0,1b} + c_1^0 \omega_1^{1c,1}, \quad (2)$$

где $v_{1b}^{0,0}$ — скорость ВП в БСК; $\omega_{1b}^{0,1b}$ — угловая скорость движения ВП относительно БСК в СК ВП; $< \dots >$ — кососимметрическая матрица вида

$$\langle [x, y, z]^T \rangle = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix}; v_1^{1c,1c} — линейная ско-$$

рость ВП в СК НПО; $\omega_1^{1c,1}$ — угловая скорость ВП относительно СК НПО в СК ВП.

Угловые скорости $\omega_1^{0,0}$, $\omega_{1b}^{0,1b}$ и $\omega_1^{1c,1}$ могут быть определены через скорости простейших вращений Φ_1^0 , Φ_{1b}^0 и Φ_1^{1c} :

$$\omega_{1b}^{0,1b} = \varepsilon_{1b}^0 \Phi_{1b}^0; \omega_1^{1c,1} = \varepsilon_1^{1c} \Phi_1^{1c};$$

$$\omega_1^{0,0} = c_1^0 \varepsilon_1^0 \Phi_1^0, \quad (3)$$

где ε_j^i — матрицы Эйлера вида $\varepsilon_j^i = [c_3^T(\alpha_j^i) c_2^T(\theta_j^i) \times e_x | c_3^T(\alpha_j^i) e_y | e_z]$ от соответствующих углов, $e_x = [1 0 0]^T$, $e_y = [0 1 0]^T$, $e_z = [0 0 1]^T$.

Получим скорости изменения длин актуаторов v_i , продифференцировав (1):

$$v_i = \frac{\mathbf{v}_{1ji}^{1b,1b,T} \left[\mathbf{r}_{1c}^{1b,1b} + \mathbf{c}_{1c}^{1b} \mathbf{r}_1^{1c,1c} + \mathbf{c}_{1c}^{1b} \mathbf{c}_1^{1c} \mathbf{r}_{1ji}^{1,1} - \mathbf{r}_{1bji}^{1b,1b} \right]}{\left| \mathbf{r}_{1c}^{1b,1b} + \mathbf{c}_{1c}^{1b} \left[\mathbf{r}_1^{1c,1c} + \mathbf{c}_1^{1c} \mathbf{r}_{1ji}^{1,1} \right] - \mathbf{r}_{1bji}^{1b,1b} \right|} = v_{ai}, \quad i = 1..6, \quad (4)$$

где $\mathbf{v}_{1ji}^{1b,1b} = \mathbf{c}_{1c}^{1b} \mathbf{v}_1^{1c,1c} + \mathbf{c}_{1c}^{1b} \mathbf{c}_1^{1c} \langle \mathbf{r}_{1ji}^{1,1} \rangle^T \boldsymbol{\varepsilon}_1^{1c} \boldsymbol{\phi}_1^{1c}$ — скорость относительного поступательного движения шарниров одного актуатора в СК ВП; v_{ai} — скорости удлинения штоков актуаторов, которые в случае винтовой передачи могут быть определены по формуле $v_{ai} = \frac{\Omega_i}{I_i}$, Ω_i — угловая скорость двигателя, I_i — передаточное число редуктора.

Уравнения (1)–(4) необходимо рассматривать как систему, которая является кинематической моделью гексапода.

Групповой регулятор гексапода

Задачей группового регулятора гексапода является выработка законов выдвигания штоков каждого актуатора с учетом быстродействия приводов актуаторов и инерции системы контррефлектор—гексапод.

Траектория движения КР задается в БСК как три линейных $\mathbf{r}_{\text{КР}^*}^{0,0} = \left[x_{\text{КР}^*}^{0,0}, y_{\text{КР}^*}^{0,0}, z_{\text{КР}^*}^{0,0} \right]^T$ и три угловых $\boldsymbol{\phi}_{\text{КР}^*}^0 = \left[\beta_{\text{КР}^*}^0, \theta_{\text{КР}^*}^0, \alpha_{\text{КР}^*}^0 \right]^T$ перемещения вершины КР. Реальное положение вершины КР определяется вектором $\mathbf{r}_{\text{КР}}^1$ с координатным столбцом $\mathbf{r}_{\text{КР}}^{1,1}$ и углами $\boldsymbol{\phi}_{\text{КР}}^1$, которым соответствует матрица вращения $\mathbf{c}_{\text{КР}}^1$. С учетом кинематической модели гексапода (1)–(4) реальное положение вершины КР в БСК может быть рассчитано по формуле

$$\mathbf{r}_{\text{КР}}^{0,0} = \mathbf{r}_1^{0,0} + \mathbf{r}_{\text{КР}}^{1,0} = \mathbf{r}_{1b}^{0,0} + \mathbf{c}_{1b}^{0,0} \mathbf{r}_{1c}^{1b,1b} + \mathbf{c}_{1b}^{0,0} \mathbf{c}_{1c}^{1b} \mathbf{r}_1^{1c,1c} + \mathbf{c}_{1b}^{0,0} \mathbf{c}_{1c}^{1b} \mathbf{c}_1^{1c} \mathbf{r}_{\text{КР}}^{1,1}; \quad \mathbf{c}_{\text{КР}}^0 = \mathbf{c}_{1b}^{0,0} \mathbf{c}_{1c}^{1b} \mathbf{c}_1^{1c} \mathbf{c}_{\text{КР}}^1 \Rightarrow \boldsymbol{\eta}_{\text{КР}}^0 = \mathbf{f}(\mathbf{c}_{\text{КР}}^0). \quad (5)$$

Поэтому целесообразно рассчитывать линейные $\boldsymbol{\eta}_r$ и угловые $\boldsymbol{\eta}_{\phi}$ ошибки наведения КР в БСК, при этом законы изменения ошибок наведения КР от времени должны учитывать динамику КР и электроприводов гексапода:

$$\boldsymbol{\eta}_r = \mathbf{r}_{\text{КР}}^{0,0} - \mathbf{r}_{\text{КР}^*}^{0,0} = \begin{bmatrix} \frac{a_1}{T_h - T_1} \left[T_h e^{-\frac{t}{T_h}} - T_1 e^{-\frac{t}{T_1}} \right] \\ \frac{a_2}{T_h - T_2} \left[T_h e^{-\frac{t}{T_h}} - T_2 e^{-\frac{t}{T_2}} \right] \\ \frac{a_3}{T_h - T_3} \left[T_h e^{-\frac{t}{T_h}} - T_3 e^{-\frac{t}{T_3}} \right] \end{bmatrix};$$

$$\boldsymbol{\eta}_{\phi} = \boldsymbol{\phi}_{\text{КР}}^0 - \boldsymbol{\phi}_{\text{КР}^*}^0 = \begin{bmatrix} \frac{a_4}{T_h - T_4} \left[T_h e^{-\frac{t}{T_h}} - T_4 e^{-\frac{t}{T_4}} \right] \\ \frac{a_5}{T_h - T_5} \left[T_h e^{-\frac{t}{T_h}} - T_5 e^{-\frac{t}{T_5}} \right] \\ \frac{a_6}{T_h - T_6} \left[T_h e^{-\frac{t}{T_h}} - T_6 e^{-\frac{t}{T_6}} \right] \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где a_i — начальное рассогласование по соответствующей координате; T_h — постоянная времени гексапода; T_i — постоянные времени замкнутой системы с регулятором; t — время.

Рассчитаем необходимые удлинения штоков актуаторов, чтобы КР следовал по желаемой траектории с ошибками наведения (6). Для этого определим текущие перемещения $\mathbf{r}_1^{1c,1c}(t)$ и текущие значения матрицы вращения $\mathbf{c}_1^{1c}(t)$ как функции ошибок наведения, учтя, что

$$\mathbf{r}_{\text{КР}}^{0,0}(t) = \mathbf{r}_{\text{КР}^*}^{0,0}(t) + \boldsymbol{\eta}_r(t)$$

и

$$\mathbf{c}_{\text{КР}}^0(t) = \mathbf{c}_{\text{КР}^*}^0(t) \mathbf{c}_{\text{КР}^*}^{\text{КР}^*}(\boldsymbol{\eta}_{\phi}(t));$$

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_1^{1c,1c}(t) &= \mathbf{c}_{1c}^{1b,T} \mathbf{c}_{1b}^{0,T}(t) \left[\mathbf{r}_{\text{КР}}^{0,0}(t) - \mathbf{r}_{1b}^{0,0}(t) \right] - \\ &- \mathbf{c}_{1c}^{1b,T} \mathbf{r}_{1c}^{1b,1b} - \mathbf{c}_1^{1c}(t) \mathbf{r}_{\text{КР}}^{1,1} = \mathbf{c}_{1c}^{1b,T} \mathbf{c}_{1b}^{0,T}(t) \times \\ &\times \left[\mathbf{r}_{\text{КР}^*}^{0,0}(t) + \boldsymbol{\eta}_r(t) - \mathbf{r}_{1b}^{0,0}(t) \right] - \mathbf{c}_{1c}^{1b,T} \mathbf{r}_{1c}^{1b,1b} - \mathbf{c}_1^{1c}(t) \mathbf{r}_{\text{КР}}^{1,1}, \\ \mathbf{c}_1^{1c}(t) &= \mathbf{c}_{1c}^{1b,T} \mathbf{c}_{1b}^{0,T}(t) \mathbf{c}_{\text{КР}}^0 \mathbf{c}_{\text{КР}}^{1,T} = \\ &= \mathbf{c}_{1c}^{1b,T} \mathbf{c}_{1b}^{0,T}(t) \mathbf{c}_{\text{КР}^*}^0(t) \mathbf{c}_{\text{КР}^*}^{\text{КР}^*}(\boldsymbol{\eta}_{\phi}(t)) \mathbf{c}_{\text{КР}}^{1,T}. \quad (7) \end{aligned}$$

Подставив (7) в (1), найдем выражения для удлинений штоков актуаторов:

$$\begin{aligned} \Delta l_{ai} &= \left| \mathbf{c}_{1b}^{0,T}(t) \left[\mathbf{r}_{\text{КР}^*}^{0,0}(t) + \boldsymbol{\eta}_r(t) - \mathbf{r}_{1b}^{0,0}(t) \right] - \right. \\ &- \left. \mathbf{c}_{\text{КР}^*}^0(t) \mathbf{c}_{\text{КР}^*}^{\text{КР}^*}(t) \mathbf{c}_{\text{КР}}^{1,T} \left[\mathbf{r}_{\text{КР}}^{1,1} - \mathbf{r}_{1ji}^{1,1} \right] - \mathbf{r}_{1bji}^{1b,1b} \right| - l_{0i}, \\ & \quad i = 1..6. \quad (8) \end{aligned}$$

Продифференцировав (8), получим выражения для скоростей удлинений штоков:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{l}_{ai} &= \frac{d}{dt} \left| \mathbf{c}_{1b}^{0,T}(t) \left[\mathbf{r}_{\text{КР}^*}^{0,0}(t) + \boldsymbol{\eta}_r(t) - \mathbf{r}_{1b}^{0,0}(t) \right] - \right. \\ &\times \left. \mathbf{c}_{\text{КР}^*}^{\text{КР}^*}(t) \mathbf{c}_{\text{КР}}^{1,T} \left[\mathbf{r}_{\text{КР}}^{1,1} - \mathbf{r}_{1ji}^{1,1} \right] - \mathbf{r}_{1bji}^{1b,1b} \right| = \\ &= \frac{1}{l_{1ji}^{1b,1b}} \left[\langle \boldsymbol{\omega}_{1b}^{0,1b} \rangle^T \mathbf{c}_{1b}^{0,T} \left[\mathbf{r}_{\text{КР}^*}^{0,0} + \boldsymbol{\eta}_r - \mathbf{r}_{1b}^{0,0} - \right. \right. \\ &- \left. \left. \mathbf{c}_{\text{КР}^*}^0 \mathbf{c}_{\text{КР}^*}^{\text{КР}^*} \mathbf{c}_{\text{КР}}^{1,T} \left[\mathbf{r}_{\text{КР}}^{1,1} - \mathbf{r}_{1ji}^{1,1} \right] \right] + \mathbf{c}_{1b}^{0,T} \left[\mathbf{v}_{\text{КР}^*}^{0,0} + \dot{\boldsymbol{\eta}}_r - \mathbf{v}_{1b}^{0,0} \right] - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -\mathbf{c}_{1b}^{0,T} \mathbf{c}_{\text{КР}^*}^0 < \boldsymbol{\omega}_{\text{КР}^*}^{0,\text{КР}^*} > \mathbf{c}_{\text{КР}}^{\text{КР}^*,1,T} \left[\mathbf{r}_{\text{КР}}^{1,1} - \mathbf{r}_{1ji}^{1,1} \right] - \\
 & -\mathbf{c}_{1b}^{0,T} \mathbf{c}_{\text{КР}^*}^0 \mathbf{c}_{\text{КР}}^{\text{КР}^*} < \boldsymbol{\omega}_{\text{КР}}^{\text{КР}^*,\text{КР}} > \mathbf{c}_{\text{КР}}^{1,T} \left[\mathbf{r}_{\text{КР}}^{1,1} - \mathbf{r}_{1ji}^{1,1} \right]^T \times \\
 & \times \left[\mathbf{c}_{1b}^{0,T} \left[\mathbf{r}_{\text{КР}^*}^{0,0} + \boldsymbol{\eta}_r - \mathbf{r}_{1b}^{0,0} - \mathbf{c}_{\text{КР}^*}^0 \mathbf{c}_{\text{КР}}^{\text{КР}^*} \times \right. \right. \\
 & \left. \left. \times \mathbf{c}_{\text{КР}}^{1,T} \left[\mathbf{r}_{\text{КР}}^{1,1} - \mathbf{r}_{1ji}^{1,1} \right] - \mathbf{r}_{1bji}^{1b,1b} \right] = \frac{\Omega_i}{I_i}, i = 1..6, \quad (9)
 \end{aligned}$$

где $\langle \boldsymbol{\omega}_{1b}^{0,1b} \rangle$, $\langle \boldsymbol{\omega}_{\text{КР}^*}^{0,\text{КР}^*} \rangle$ и $\langle \boldsymbol{\omega}_{\text{КР}}^{\text{КР}^*,\text{КР}} \rangle$ — кососимметрические матрицы, образованные из компонентов соответствующих координатных столбцов $\boldsymbol{\omega}_{1b}^{0,1b} = \boldsymbol{\varepsilon}_{1b}^0 \boldsymbol{\Phi}_{1b}^0$, $\boldsymbol{\omega}_{\text{КР}^*}^{0,\text{КР}^*} = \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{КР}^*}^0 \boldsymbol{\Phi}_{\text{КР}^*}^0$ и $\boldsymbol{\omega}_{\text{КР}}^{\text{КР}^*,\text{КР}} = \boldsymbol{\varepsilon}_{\text{КР}}^{\text{КР}^*} (\boldsymbol{\eta}_\varphi) \dot{\boldsymbol{\eta}}_\varphi$; $v_{\text{КР}^*}^{0,0}$ — желаемая скорость поступательного движения КР; $\boldsymbol{\omega}_{\text{КР}^*}^{0,\text{КР}^*}$ — желаемая скорость углового движения КР; $\dot{\boldsymbol{\eta}}_r$ и $\dot{\boldsymbol{\eta}}_\varphi$ — скорости изменения соответственно линейных и угловых ошибок наведения:

$$\begin{aligned}
 \dot{\boldsymbol{\eta}}_r &= \begin{bmatrix} \frac{a_1}{T_h - T_1} \left[e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_h}} \right] \\ \frac{a_2}{T_h - T_2} \left[e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_h}} \right] \\ \frac{a_3}{T_h - T_3} \left[e^{-\frac{t}{T_3}} - e^{-\frac{t}{T_h}} \right] \\ \frac{a_4}{T_h - T_4} \left[e^{-\frac{t}{T_4}} - e^{-\frac{t}{T_h}} \right] \\ \frac{a_5}{T_h - T_5} \left[e^{-\frac{t}{T_5}} - e^{-\frac{t}{T_h}} \right] \\ \frac{a_6}{T_h - T_6} \left[e^{-\frac{t}{T_6}} - e^{-\frac{t}{T_h}} \right] \end{bmatrix}; \\
 \dot{\boldsymbol{\eta}}_\varphi &= \begin{bmatrix} \frac{a_1}{T_h - T_1} \left[e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_h}} \right] \\ \frac{a_2}{T_h - T_2} \left[e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_h}} \right] \\ \frac{a_3}{T_h - T_3} \left[e^{-\frac{t}{T_3}} - e^{-\frac{t}{T_h}} \right] \\ \frac{a_4}{T_h - T_4} \left[e^{-\frac{t}{T_4}} - e^{-\frac{t}{T_h}} \right] \\ \frac{a_5}{T_h - T_5} \left[e^{-\frac{t}{T_5}} - e^{-\frac{t}{T_h}} \right] \\ \frac{a_6}{T_h - T_6} \left[e^{-\frac{t}{T_6}} - e^{-\frac{t}{T_h}} \right] \end{bmatrix}. \quad (10)
 \end{aligned}$$

Для синтеза группового регулятора необходимо рассчитать амплитуды a_i и постоянные времени T_i при известном начальном и желаемом положениях гексапода и постоянной времени T_h . В начальный момент времени рассогласования $\boldsymbol{\eta}_r(t_0)$ и $\boldsymbol{\eta}_\varphi(t_0)$ согласно (5) и (6) могут быть найдены по формулам

$$\begin{aligned}
 \boldsymbol{\eta}_r(t_0) &= \mathbf{r}_{\text{КР}}^{0,0}(t_0) - \mathbf{r}_{\text{КР}^*}^{0,0}(t_0) = \mathbf{r}_{1b}^{0,0}(t_0) + \mathbf{c}_{1b}^0(t_0) \times \\
 & \times \left[\mathbf{r}_{1c}^{1b,1b} + \mathbf{c}_{1c}^{1b} \mathbf{r}_1^{1c,1c}(t_0) + \mathbf{c}_{1c}^{1b} \mathbf{c}_1^{1c}(t_0) \mathbf{r}_{\text{КР}}^{1,1} \right] - \mathbf{r}_{\text{КР}^*}^{0,0}(t_0); \\
 \boldsymbol{\eta}_\varphi(t_0) &= \boldsymbol{\Phi}_{\text{КР}}^0(t_0) - \boldsymbol{\Phi}_{\text{КР}^*}^0(t_0) = \mathbf{f} \left(\mathbf{c}_{\text{КР}^*}^{\text{КР}^*}(t_0) \right) = \\
 & = \mathbf{f} \left(\mathbf{c}_0^{\text{КР}^*,T}(t_0) \mathbf{c}_{1b}^0(t_0) \mathbf{c}_{1c}^{1b} \mathbf{c}_1^{1c}(t_0) \mathbf{c}_{\text{КР}}^1 \right), \quad (11)
 \end{aligned}$$

где

$$\mathbf{f} \left(\mathbf{c}_j^i(\boldsymbol{\Phi}_j^i) \right) = \left[-\arctg \left(\mathbf{c}_{j,(3,2)}^i / \mathbf{c}_{j,(3,3)}^i \right), \arcsin \left(\mathbf{c}_{j,(1,3)}^i \right), -\arctg \left(\mathbf{c}_{j,(1,2)}^i / \mathbf{c}_{j,(1,1)}^i \right) \right]^T,$$

нижние индексы в скобках обозначают соответственно номер строки и номер столбца выбранного элемента матрицы. Коэффициенты a_i определяются из соотношений $\boldsymbol{\eta}_r(t_0) = [a_1 \ a_2 \ a_3]^T$ и $\boldsymbol{\eta}_\varphi(t_0) = [a_4 \ a_5 \ a_6]^T$.

На следующем этапе необходимо найти оптимальные значения времени переходного процесса $T_{п.п}$ и постоянных времени T_i при заданной точности наведения δ_i КР по каждой координате соответственно и ограничениях на максимальные длины, скорости и ускорения выдвигания штоков актуаторов по модулю. В случае позиционирования, когда начальные и конечные скорости актуаторов равны нулю, данная задача может быть решена следующим образом. Сформулируем критерий оптимального управления в виде

$$J = \min_x \left\{ x_1 + \sum_{i=1}^6 \left(\frac{1}{x_{i+1}} + x_{i+7} \right) \right\} \quad (12)$$

при следующих ограничениях:

$$x_1 > k_1 T_h; \quad (13.1)$$

$$x_{i+1} < \frac{k_2}{T_h}; \quad (13.2)$$

$$x_{i+7} > 0; \quad (13.3)$$

$$x_1 - x_{i+7} > 0; \quad (13.4)$$

$$-\lambda_i^{\max} < \frac{-a_i}{T_h} x_{i+1} < \lambda_i^{\max}; \quad (13.5)$$

$$\begin{aligned}
 & e^{-x_1 x_{i+1}} - \left(\frac{-x_1}{T_h e^{\frac{-x_1}{T_h}}} - \frac{\text{sign}(a_i) \delta_i}{a_i} \right) \times \\
 & \times x_{i+1} - \frac{\text{sign}(a_i) \delta_i}{a_i} = 0; \quad (13.6)
 \end{aligned}$$

$$\frac{a_i}{T_h - \frac{1}{x_{i+1}}} \left(\frac{1}{T_h} e^{-\frac{-x_{i+7}}{T_h}} - x_{i+1} e^{-x_{i+7} x_{i+1}} \right) = 0; \quad (13.7)$$

$$-v_i^{\max} < \frac{-a_i}{T_h - \frac{1}{x_{i+1}}} \left(e^{-\frac{-x_{i+7}}{T_h}} - e^{-x_{i+7} x_{i+1}} \right) < v_i^{\max}, \quad (13.8)$$

где $x_1 = T_{п.п}$; $x_{i+1} = \frac{1}{T_i}$; x_{i+7} — моменты времени,

в которые скорости изменения линейных и угловых ошибок наведения имеют максимальные по

модулю значения; k_1, k_2 — весовые коэффициенты; λ_i^{\max} — максимальное значение ускорений изменения линейных и угловых ошибок наведения; v_i^{\max} — максимальное значение скоростей изменения линейных и угловых ошибок наведения; $i = 1..6$.

Ограничения (13.1) и (13.2) определяют минимальное допустимое значение времени переходного процесса и постоянных времени T_i , связанное с тем, что быстродействие замкнутой системы в целом не может быть выше быстродействия ее подсистем. Ограничения (13.3) и (13.4) определяют минимальные и максимальные допустимые значения x_{i+7} , так как выбранные законы изменения длины штоков актуаторов имеют выраженные этапы разгона и торможения.

Ограничения (13.5) определяют максимальные по модулю допустимые значения ускорений изменения линейных и угловых ошибок наведения. Эти ограничения получены дифференцированием (10) по времени и максимизацией найденного ускорения на отрезке $[0, T_{п.п}]$:

$$\ddot{\eta}_i = \frac{-a_i}{T_h - T_i} \left[\frac{1}{T_i} e^{-\frac{t}{T_i}} - \frac{1}{T_h} e^{-\frac{t}{T_h}} \right] = \frac{-a_i}{T_h - \frac{1}{x_{i+1}}} \left[x_i e^{-x_{i+1}t} - \frac{1}{T_h} e^{-\frac{t}{T_h}} \right]. \quad (14)$$

Не сложно показать, что $\ddot{\eta}_i$ имеют максимальные по модулю значения при $t = 0$, равные $\ddot{\eta}_i(t_0) = \frac{-a_i}{T_h} x_{i+1}$.

Ограничения (13.6) определяют максимальные допустимые ошибки наведения. Они получены упрощением следующего уравнения:

$$\eta_i(T_{п.п}) = \frac{a_i}{T_h - T_i} \left[T_h e^{-\frac{T_{п.п}}{T_h}} - T_i e^{-\frac{T_{п.п}}{T_i}} \right] = \frac{a_i}{T_h - \frac{1}{x_{i+1}}} \left[T_h e^{-\frac{x_1}{T_h}} - \frac{1}{x_{i+1}} e^{-x_1 x_{i+1}} \right] = \text{sign}(a_i) \delta_i. \quad (15)$$

Ограничения (13.7) определяют моменты времени, в которые скорости изменения линейных и угловых ошибок наведения имеют максимальные по модулю значения. Получены из условия, что ускорение (14) равно нулю при $t = x_{i+7}$.

Ограничения (13.8) определяют максимальные по модулю допустимые значения скоростей изменения линейных и угловых ошибок наведения в моменты времени x_{i+7} .

Не трудно заметить, что переменные x_{i+1} можно выразить через x_1 , используя ограничение (13.6). Для этого введем замену $y = x_1 x_{i+1}$, тогда (13.6) примет вид

$$e^{-y_i} = -\mu_i y_i + \sigma_i, \quad \sigma_i = \frac{\text{sign}(a_i) \delta_i}{a_i},$$

$$\mu_i = \frac{\text{sign}(a_i) \delta_i T_h}{a_i x_1} - \frac{T_h}{x_1} e^{-\frac{x_1}{T_h}}, \quad \mu_i > 0, \quad \sigma_i > 0. \quad (16)$$

Уравнение (16) имеет два одинаковых решения в случае

$$\frac{\partial e^{-y_i}}{\partial y_i} = -e^{-y_i} = \frac{\partial(-\mu_i y_i + \sigma_i)}{\partial y_i} = -\mu_i, \quad (17)$$

что позволяет уточнить нижнюю границу для σ_i :

$$y_i = -\ln \mu_i, \quad \mu_i = \mu_i \ln \mu_i + \sigma_i, \quad \sigma_i = \mu_i - \mu_i \ln \mu_i. \quad (18)$$

Учтем (18) в уравнении (16):

$$e^{-y_i} = -\mu_i y_i + \sigma_i, \quad \mu_i > 0, \quad \mu_i - \mu_i \ln \mu_i - \sigma_i < 0. \quad (19)$$

Перегруппировав (19): $-\frac{1}{\mu_i} = \left(y_i - \frac{\sigma_i}{\mu_i} \right) e^{y_i}$, и введя замену $z_i = y_i - \frac{\sigma_i}{\mu_i}$, получим

$$z_i e^{z_i} = -\frac{1}{\mu_i} e^{-\frac{\sigma_i}{\mu_i}}. \quad (20)$$

Решением (20) является функция Ламберта f^{-1} :

$$z_i = f^{-1} \left(-\frac{1}{\mu_i} e^{-\frac{\sigma_i}{\mu_i}} \right),$$

$$y_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} + z_i = \frac{\sigma_i}{\mu_i} + f^{-1} \left(-\frac{1}{\mu_i} e^{-\frac{\sigma_i}{\mu_i}} \right). \quad (21)$$

Тогда переменные x_{i+1} находятся из соотношения

$$x_{i+1} = \frac{\sigma_i}{\mu_i(x_1) x_1} + \frac{1}{x_1} f^{-1} \left(-\frac{1}{\mu_i(x_1)} e^{-\frac{\sigma_i}{\mu_i(x_1)}} \right) = g_i(x_1),$$

$$\mu_i(x_1) > 0, \quad \mu_i(x_1) - \mu_i(x_1) \ln \mu_i(x_1) - \sigma_i < 0. \quad (22)$$

Не трудно увидеть, что переменные x_{i+7} могут быть выражены через $g(x_1)$ с использованием ограничений (13.7):

$$\frac{a_i}{T_h - \frac{1}{g_i(x_1)}} \left(\frac{1}{T_h} e^{-\frac{x_{i+7}}{T_h}} - g_i(x_1) e^{-x_{i+7} g_i(x_1)} \right) = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{T_h} e^{-\frac{x_{i+7}}{T_h}} = g_i(x_1) e^{-x_{i+7} g_i(x_1)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{1}{T_h g_i(x_1)} = e^{x_{i+7} \left(\frac{1}{T_h} - g_i(x_1) \right)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow x_{i+7} = \frac{1}{\frac{1}{T_h} - g_i(x_1)} \ln \left(\frac{1}{T_h g_i(x_1)} \right) = h_i(x_1). \quad (23)$$

В результате выполненных преобразований задача многомерной оптимизации с 13 переменными сводится к задаче одномерного поиска с критерием

$$J = \min_{x_1} \{x_1\} \quad (24)$$

при ограничениях:

$$g_i(x_1) < \frac{k_2}{T_h}, \quad \mu_i(x_1) > 0,$$

$$\mu_i(x_1) - \mu_i(x_1) \ln \mu_i(x_1) - \sigma_i < 0,$$

$$-\lambda_i^{\max} < \frac{-a_i}{T_h} g_i(x_1) < \lambda_i^{\max},$$

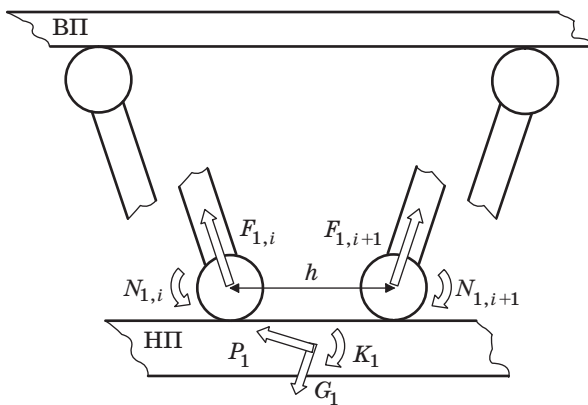
$$-v_i^{\max} < \frac{-a_i}{T_h - \frac{1}{g_i(x_1)}} \left(e^{\frac{-h_i(x_1)}{T_h}} - e^{-h_i(x_1)g_i(x_1)} \right) <$$

$$< v_i^{\max}. \quad (25)$$

Решить данную оптимизационную задачу можно, например, воспользовавшись функцией `fmincon` пакета `MatLab`, которая находит минимум целевой функции при линейных и нелинейных ограничениях.

Динамическая модель гексапода и управление заклиниванием актуаторов

Одним из преимуществ гексаподов является управляемый выбор люфта в шарнирах и редукторах актуаторов. Для этой цели шарниры соседних актуаторов устанавливаются с некоторой базой h (рисунок).



■ Схема крепления шарниров и силы, действующие на гексапод

Силы F_1^1 и моменты M_1^1 , действующие на НП в СК НП, имеют вид

$$F_1^1 = \sum_{i=1}^6 F_{1,i}^1 + G_1^1 + P_1^1,$$

$$M_1^1 = \sum_{i=1}^6 \langle r_{1ji}^{1,1} \rangle F_{1,i}^1 + \sum_{i=1}^6 N_{1,i}^1 + K_1^1, \quad (26)$$

где $F_{1,i}^1$ — силы упругости и демпфирования, действующие на НП со стороны i -го актуатора в СК НП; $N_{1,i}^1$ — моменты трения в i -м шарнире НП в СК НП; P_1^1 — силовая нагрузка, действующая на НП; K_1^1 — моментная нагрузка, действующая на НП; G_1^1 — сила тяжести, действующая на НП. Сила $F_{1,i}^1$ действует вдоль актуатора и является коллинеарной вектору r_{1ji}^{1bj} . Моменты $N_{1,i}^1$ действуют против скорости движения в шарнире.

В реальных случаях будет рассогласование $\dot{\chi}_i$ между линейной скоростью движения точки крепления шарнира v_i на НП и скоростью удлинения актуатора v_{ai} :

$$\dot{\chi}_i = v_i - v_{ai}, \quad (27)$$

где v_i определяется согласно (4).

Силы $F_{1,i}^1$ и векторы r_{1ji}^{1bj} коллинеарные, поэтому координаты $F_{1,i}^1$ в СК ВП

$$F_{1,i}^1 = - \frac{c_1^{1c,T} c_{1c}^{1b,T} r_{1ji}^{1bj,1jb}}{l_{1ji}^{1bji}} [C_i \chi_i + D_i \dot{\chi}_i],$$

$$\chi_i = l_{1ji}^{1bji} - l_{0i} - \frac{\psi_i}{I_i},$$

$$l_{0i} = \left| r_{1c}^{1b,1b} + c_{1c}^{1b} r_{1ji}^{1,1} - r_{1bj}^{1b,1b} \right|, \quad (28)$$

где C_i, D_i — коэффициенты упругости и демпфирования актуатора соответственно; χ_i — деформация актуатора; ψ_i — угол поворота ротора двигателя актуатора.

В шарнирах НП действуют моменты трения. Для их описания введем СК актуатора A_i $E_{ai} = (o_{ai}, [e_{ai}])$, где o_{ai} — начало СК A_i , которое относительно СК ВП определяется; $r_{1ji}^{1b,1b}, [e_{ai}]$ — орты СК A_i . Угловое положение СК НП в СК A_i определяется углами $\phi_1^{ai} = [\beta_1^{ai} \quad \theta_1^{ai} \quad 0]^T$, которые находятся из соотношений

$$\phi_1^{ai} = \left[\arcsin \left(e_{ai,y}^{z,1} \right), -\arctg \left(\frac{e_{ai,x}^{z,1}}{e_{ai,z}^{z,1}} \right), 0 \right]^T,$$

$$e_{ai}^{z,1} = \frac{r_{1ji}^{1bj,1}}{l_{1ji}^{1bji}}, \quad e_{ai}^{z,1} = c_1^{ai,T} e_{ai}^z,$$

$$\mathbf{e}_{ai}^z = [0 \ 0 \ 1]^T, \quad \mathbf{c}_1^{ai} = \mathbf{c}_1(\beta_1^{ai}) \mathbf{c}_2(\theta_1^{ai}), \quad (29)$$

где $\mathbf{e}_{ai}^{z,1} = [e_{ai,x}^{z,1} \ e_{ai,y}^{z,1} \ e_{ai,z}^{z,1}]^T$ — координатный столбец орта оси z СК A_i в СК НП; \mathbf{e}_{ai}^z — координатный столбец орта оси z СК A_i .

Выражения для моментов трения НП примут вид

$$\mathbf{N}_{1,i}^1 = -\varepsilon_1^{ai} \mu_s \text{sign}(\dot{\phi}_1^{ai}) n_i - \varepsilon_1^{ai} \mu_v \text{sign}(\dot{\phi}_1^{ai}) \gamma(\dot{\phi}_1^{ai}), \quad (30)$$

$$n_i = |\mathbf{F}_{1,i}^1|,$$

где $\text{sign}(\dot{\phi}_1^{ai}) = [\text{sign}(\beta_1^{ai}) \ \text{sign}(\dot{\theta}_1^{ai}) \ \text{sign}(0)]^T$; $\gamma(\dot{\phi}_1^{ai}) = [|\beta_1^{ai}|^\vartheta \ |\dot{\theta}_1^{ai}|^\vartheta \ 0]^T$; μ_s — коэффициент сухого

трения; μ_v — коэффициент вязкого трения; ϑ — постоянный коэффициент. Угловые скорости $\dot{\phi}_1^{ai}$ определяются из соотношений

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_{1ji}^{1bj,1} &= \mathbf{c}_1^{ai,T} \mathbf{e}_{ai}^{z,1bj} \mathbf{l}_{1ji}^{1bj,1}, \quad \mathbf{v}_{1ji}^{1bj,1} = \mathbf{c}_1^{1c,T} \mathbf{c}_{1c}^{1b,T} \mathbf{v}_{1ji}^{1bj,1b}, \\ \mathbf{v}_{1ji}^{1bj,1} &= \dot{\phi}_1^{ai,T} \mathbf{e}_{ai}^{z,1bj} \mathbf{l}_{1ji}^{1bj} + \mathbf{c}_1^{ai,T} \mathbf{e}_{ai}^z \mathbf{v}_i = \\ &= -\mathbf{c}_1^{ai,T} \langle \boldsymbol{\omega}_1^{ai,ai} \rangle \mathbf{e}_{ai}^z \mathbf{l}_{1ji}^{1bj} + \mathbf{c}_1^{ai,T} \mathbf{e}_{ai}^z \mathbf{v}_i = \\ &= \mathbf{c}_1^{ai,T} \langle \mathbf{e}_{ai}^z \rangle \mathbf{c}_1^{ai} \boldsymbol{\omega}_1^{ai,1} \mathbf{l}_{1ji}^{1bj} + \mathbf{c}_1^{ai,T} \mathbf{e}_{ai}^z \mathbf{v}_i = \\ &= \langle \mathbf{c}_1^{ai,T} \mathbf{e}_{ai}^z \mathbf{l}_{1ji}^{1bj} \rangle \boldsymbol{\omega}_1^{ai,1} + \mathbf{c}_1^{ai,T} \mathbf{e}_{ai}^z \mathbf{v}_i = \\ &= \langle \mathbf{c}_1^{ai,T} \mathbf{e}_{ai}^z \mathbf{l}_{1ji}^{1bj} \rangle \boldsymbol{\varepsilon}_1^{ai} \boldsymbol{\phi}_1^{ai} + \mathbf{c}_1^{ai,T} \mathbf{e}_{ai}^z \mathbf{v}_i, \end{aligned} \quad (31)$$

где $\mathbf{v}_{1ji}^{1bj,1}$ — скорость относительного поступательного движения шарниров одного актуатора в СК НП; $\boldsymbol{\omega}_1^{ai,ai}$ — угловая скорость движения НП в СК A_i ; $\boldsymbol{\omega}_1^{ai,1}$ — угловая скорость движения НП относительно СК A_i в СК НП;

$$\xi_1^{ai} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{\cos(\beta_1^{ai})} & 0 \\ -1 & \frac{\text{tg}(\beta_1^{ai}) \text{tg}(\theta_1^{ai})}{\cos(\beta_1^{ai})} & 0 \\ \frac{1}{\cos(\beta_1^{ai}) \cos(\theta_1^{ai})} & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad (32)$$

$$\zeta_1^{ai} = \begin{bmatrix} \text{tg}(\beta_1^{ai}) \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Уравнение динамики КР с гексаподом имеет вид

$$\Theta_1^1 \dot{\mathbf{V}}_1^{0,1} + \Phi_1^{0,1} \Theta_1^1 \mathbf{V}_1^{0,1} = \Xi_1^1,$$

$$\Theta_1^1 = \begin{bmatrix} 1m_1 & 0 \\ 0 & \mathbf{I}_1 \end{bmatrix}, \quad \Phi_1^{0,1} = \begin{bmatrix} \langle \boldsymbol{\omega}_1^{0,1} \rangle^T & 0 \\ \langle \mathbf{v}_1^{0,1} \rangle^T & \langle \boldsymbol{\omega}_1^{0,1} \rangle^T \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{V}_1^{0,1} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^{0,1} \\ \boldsymbol{\omega}_1^{0,1} \end{bmatrix}, \quad \Xi_1^1 = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_1^1 \\ \mathbf{M}_1^1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (33)$$

где Θ_1^1 — матрица инерции НП; m_1 — масса нижней платформы; \mathbf{I}_1 — матрица моментов инерции НП. Матричные уравнения кинематики гексапода имеют вид

$$\mathbf{V}_1^{0,1} = \mathbf{S}^T \dot{\mathbf{q}},$$

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1^{1c,T} & 0 \\ 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_1^{1c} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1^0 & 0 \\ \langle \mathbf{r}_1^{0,0} \rangle \mathbf{c}_1^0 & \mathbf{c}_1^0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{r}_1^{1c,1c} \\ \boldsymbol{\phi}_1^{1c} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{M}_1^0 = \begin{bmatrix} \mathbf{c}_1^{1c,T} & 0 \\ 0 & \boldsymbol{\varepsilon}_1^{1c} \end{bmatrix}, \quad \dot{\mathbf{q}} = \begin{bmatrix} \mathbf{v}_1^{1c,1c} \\ \dot{\boldsymbol{\phi}}_1^{1c} \end{bmatrix}. \quad (34)$$

Уравнения гексапода с учетом динамики примут вид

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) \dot{\mathbf{q}} = \mathbf{S} \Xi_1^1,$$

$$\mathbf{A}(\mathbf{q}) = \mathbf{S} \Theta_1^1 \mathbf{S}^T, \quad \mathbf{B}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{S} \Theta_1^1 \dot{\mathbf{S}}^T + \mathbf{S} \Phi_1^{0,1} \Theta_1^1 \mathbf{S}^T,$$

$$\dot{\mathbf{S}} = \dot{\mathbf{M}}_1^{0,T} \mathbf{L}_1^0 + \mathbf{M}_1^{0,T} \mathbf{L}_1^0 \Phi_1^{0,1}, \quad (35)$$

где $\dot{\mathbf{M}}_1^0 = \begin{bmatrix} \langle \boldsymbol{\omega}_1^{1c,1} \rangle^T \mathbf{c}_1^{1c,T} & 0 \\ 0 & \dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1^{1c} \end{bmatrix},$

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}_1^{1c} = \begin{bmatrix} -\langle \mathbf{e}_z \dot{\alpha}_j^i \rangle \mathbf{c}_3^T(\alpha_j^i) \mathbf{c}_2^T(\theta_j^i) \mathbf{e}_x - \\ -\mathbf{c}_3^T(\alpha_j^i) \langle \mathbf{e}_y \dot{\theta}_j^i \rangle \mathbf{c}_2^T(\theta_j^i) \mathbf{e}_x | -\langle \mathbf{e}_z \dot{\alpha}_j^i \rangle \mathbf{c}_3^T(\alpha_j^i) \mathbf{e}_y | 0 \end{bmatrix}.$$

Заключение

В статье приведены простые кинематическая и динамическая модели гексапода. Представлена методика определения оптимальных законов движений штоков актуаторов с учетом быстрогодействия их приводов и инерции системы контррефлектор — гексапод. Данная методика позволяет свести задачу многомерной оптимизации при наличии сложных ограничений к задаче одномерного поиска при наличии нелинейных ограничений и значительно сократить время поиска решения.

Контррефлектор предполагается использовать как высокоточную систему для коррекции

ошибок и деформаций главного зеркала, поэтому необходимо обеспечивать задачу выбора люфта на протяжении всей траектории движения КР, а не только в стационарных положениях. Величина силы прижатия в шарнирах должна определяться суммарным вектором действующих на КР сил в текущий момент, что обеспечит его плавные перемещения без раскрытия люфта и как следствие может продлить время эксплуатации гексапода. Данная задача требует более детального анализа и будет рассмотрена в следующей статье.

Литература

1. Система автоматического наведения радиотелескопа: Патент РФ Ru 2319171 С1. 2008. Бюл. № 7. Ч. 3. С. 824–825.
2. Городецкий А. Е., Артеменко Ю. Н., Дубаренко В. В., Тарасова И. Л., Кучмин А. Ю. Проблемы создания систем адаптации космических радиотелескопов // Информационно-управляющие системы. 2010. № 3. С. 2–8.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

При подготовке рукописей статей редакция просит Вас руководствоваться следующими рекомендациями.

Объем статьи (текст, таблицы, иллюстрации и библиография) не должен превышать эквивалента в 20 страниц, напечатанных на бумаге формата А4 на одной стороне через 1,5 интервала в Word шрифтом Times New Roman размером 13, поля: слева три сантиметра, остальные не менее двух.

Обязательными элементами оформления статьи являются: индекс УДК, заглавие, инициалы и фамилия автора (авторов), ученая степень, звание, полное название организации, аннотация (7–10 строк) и ключевые слова на русском и английском языках, подрисуночные подписи.

Формулы в текстовой строке набирайте в Word, не используя формульный редактор (MathType или Equation), только в том случае, если средства Word не позволяют набрать формулу или символ (например, простая дробь, символы с «крышками» и т. д.), используйте имеющийся в Word формульный редактор MathType или Equation; формулы, стоящие в отдельной строке, могут быть набраны как угодно; при наборе формул в формульном редакторе знаки препинания, ограничивающие формулу, набирайте вместе с формулой; для установки размера шрифта никогда не пользуйтесь вкладкой Other..., используйте вкладку Define; в формулах не отделяйте пробелами знаки: + = –; не подгоняйте размер символов в формулах под размер шрифта в тексте статьи, не растягивайте и не сжимайте мышью формулы, вставленные в текст.

При наборе символов в тексте помните, что символы, обозначаемые латинскими буквами, набираются светлым курсивом, русскими и греческими — светлым прямым, векторы и матрицы — прямым полужирным шрифтом.

Иллюстрации:

— рисунки, графики, диаграммы, блок-схемы предоставляйте в виде отдельных исходных векторных файлов, поддающихся редактированию: *.vsd, *.cdr, *.xls, *.doc, *.ai, *.dxf;

— при наличии надписей на рисунке используйте тот же шрифт, что и в основном тексте (Times New Roman), размер шрифта не более 10 pt, но не менее 8 pt;

— если при изготовлении рисунка Вы используете стрелочки, руководствуйтесь принципом единообразия;

— фото и растровые — в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением (не менее 300 pixels/inch).

В редакцию предоставляются:

— сведения об авторе (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученое звание, учебное заведение и год его окончания, ученая степень и год защиты диссертации, область научных интересов, количество научных публикаций, домашний и служебный адреса и телефоны, факс, эл. адрес), фото авторов: анфас, в темной одежде на белом фоне, должны быть видны плечи и грудь, высокая степень четкости изображения без теней и отблесков на лице, фото можно представить в электронном виде в формате *.tif, *.png с максимальным разрешением — не менее 300 pixels/inch при минимальном размере фото 40 × 55 мм;

— экспертное заключение.

Список литературы составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется следующим образом:

— для книг и сборников — фамилия и инициалы авторов, полное название книги (сборника), город, издательство, год, общее количество страниц;

— для журнальных статей — фамилия и инициалы авторов, полное название статьи, название журнала, год издания, номер журнала, номера страниц;

— ссылки на иностранную литературу следует давать на языке оригинала без сокращений;

— при использовании web-материалов указывайте адрес сайта и дату обращения.

Более подробную информацию см. на сайте: www.i-us.ru

УДК 621.791.35

РОЛЬ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ СОЗДАНИИ НОВОЙ ТЕХНИКИ

Л. И. Чубраева,

член-корр. РАН, доктор техн. наук

В. Ф. Шишлаков,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Рассмотрены вопросы, связанные с применением информационных технологий при создании электроэнергетических устройств, систем и комплексов нового поколения, принцип действия которых основан на использовании явления высокотемпературной сверхпроводимости.

Ключевые слова — информационные технологии, высокотемпературная сверхпроводимость.

Введение

Созданный в 2005 г. Научно-исследовательский институт инновационных технологий в электромеханике и электроэнергетике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (НИИ ИТЭЭ ГУП) уделяет большое внимание совершенствованию информационных технологий (ИТ), используемых при создании новой техники.

Основная часть научных исследований, выполняемых НИИ ИТЭЭ, относится к поисковым работам. Только за последние 3 года выполнено несколько НИР и ОКР, связанных с созданием и экспериментальными исследованиями уникальных электротехнических устройств, не имеющих аналогов в мировой практике.

1. Проведены комплексные теоретические и экспериментальные исследования силовых регуляторов тока (сверхпроводниковых накопителей энергии (СПИН) и сверхпроводниковых ограничителей тока). Создан и экспериментально исследован СПИН энергоемкостью 4,5 МДж; дана оценка возможностей применения силовых регуляторов тока для повышения устойчивости и надежности электроэнергетических систем и комплексов со сверхпроводниковым оборудованием, использующим высокотемпературные сверхпроводники (ВТСП).

2. Проведены экспериментальные исследования влияния высокочастотных электромагнитных полей, в том числе сложной конфигурации, на магнитные характеристики конструкцион-

ных наноматериалов (аморфных сплавов, ВТСП-массивов, ВТСП-лент, постоянных магнитов), применяемых при изготовлении сверхпроводниковых электроэнергетических устройств, а также экспериментальные исследования ВТСП СПИН с комбинированным преобразователем и накопителем энергии.

3. Сформирован научный подход к выработке критериев оптимизации ВТСП-устройств и комплексов, обеспечивающих энергосбережение на этапах разработки, изготовления и эксплуатации. Проведены экспериментальные исследования динамических режимов ВТСП-устройств на макетных образцах. Разработаны научные основы физического, электродинамического и математического моделирования ВТСП-систем по критериям энергосбережения. Разработан метод параметрической оптимизации ВТСП-устройств, обеспечивающих заданные критерии по энергосбережению, а также методики текущей и многокритериальной оптимизации процессов изготовления ВТСП-устройств с обеспечением ресурсо- и энергосбережения.

4. Совместно с Университетом Бен-Гуриона (Израиль) разработаны научные основы создания солнечно- и ветроэнергетической установки повышенной надежности и экологической безопасности за счет использования сверхпроводниковых устройств (рис. 1) [1].

5. Разработан проект ветрогенератора с ВТСП-обмотками мощностью 1 МВт, а также разработан, создан и испытан ВТСП синхронный ветрогенератор мощностью 50 кВт и высокомомент-



■ **Рис. 1.** Комбинированная солнечно- и ветроэнергетическая установка со сверхпроводниковыми устройствами

ный синхронный двигатель с ВТСП-обмоткой статора.

Все это стало возможным благодаря широкому внедрению ИТ на всех этапах работ.

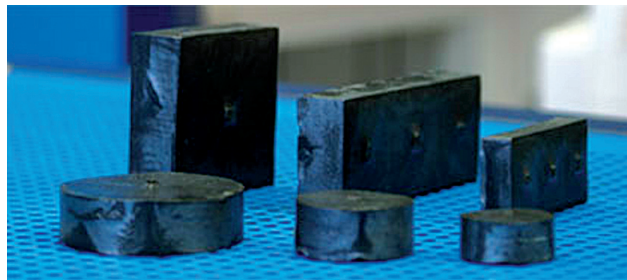
Информационные технологии на этапе выбора направления для научных исследований

На этапе выбора стратегии научных исследований работы с использованием ИТ проводятся по двум направлениям. С одной стороны, анализируются результаты выполненных научных разработок как в нашей стране, так и за рубежом. Это относится к изучению технической литературы и материалов российских и международных конференций. С другой — проводится расширенный патентный поиск, который позволяет определить изобретателей или компании, получившие патенты или другие охраняемые документы в области предполагаемых исследований, найти последние новые решения и оценить состояние рынка по данному направлению.

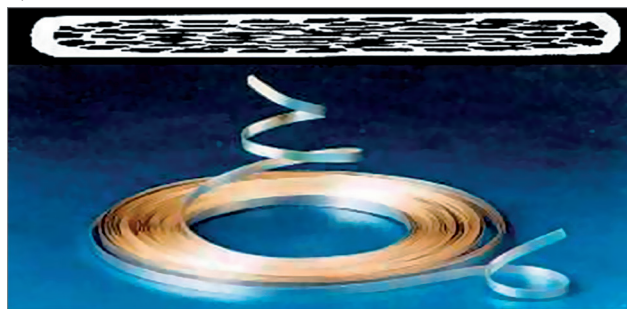
При выборе направлений разработки нового поколения электромеханических преобразователей энергии для общепромышленной и специальной энергетики, базирующихся на широком использовании наноматериалов и нанотехнологий, на основе анализа научно-технической литературы и патентного поиска было выявлено следующее. В настоящее время производство массивных ВТСП (рис. 2, а) имеет ограничения по размерам, и в большинстве случаев такие ВТСП не могут использоваться в качестве индукторов большинства синхронных электрических машин. Возможны применения составных ВТСП-массивов для гистерезисных машин и систем магнитного подвеса, поскольку наведенные электрические токи замыкаются в пределах одного ВТСП-массива.

Поэтому стало ясно, что на данном этапе целесообразно для индукторов использовать высококоэрцитивные постоянные магниты на основе редкоземельных металлов. Это позволит в последующем, по мере совершенствования технологий, перейти к применению ВТСП-массивов.

а)



б)



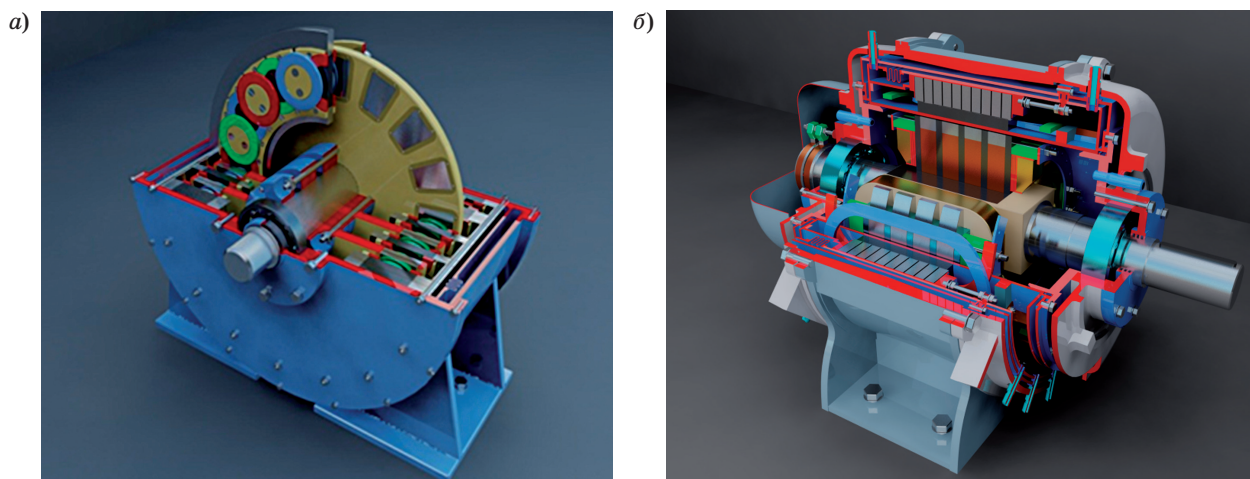
■ **Рис. 2.** Образцы массивных (а) и ленточных (б) ВТСП

Производство ленточных ВТСП-проводов как 1-го, так и 2-го поколения (рис. 2, б) пока основано на изготовлении длиномерных лент со сравнительно небольшой величиной тока (с точки зрения экономически эффективных сверхпроводниковых электрических машин) на уровне 150–250 А. Производство транспонированных ВТСП-проводов на большие токи находится пока в стадии разработки. В то же время развитие техники требует создания опытных образцов ВТСП-устройств в целях определения направлений их дальнейшего использования.

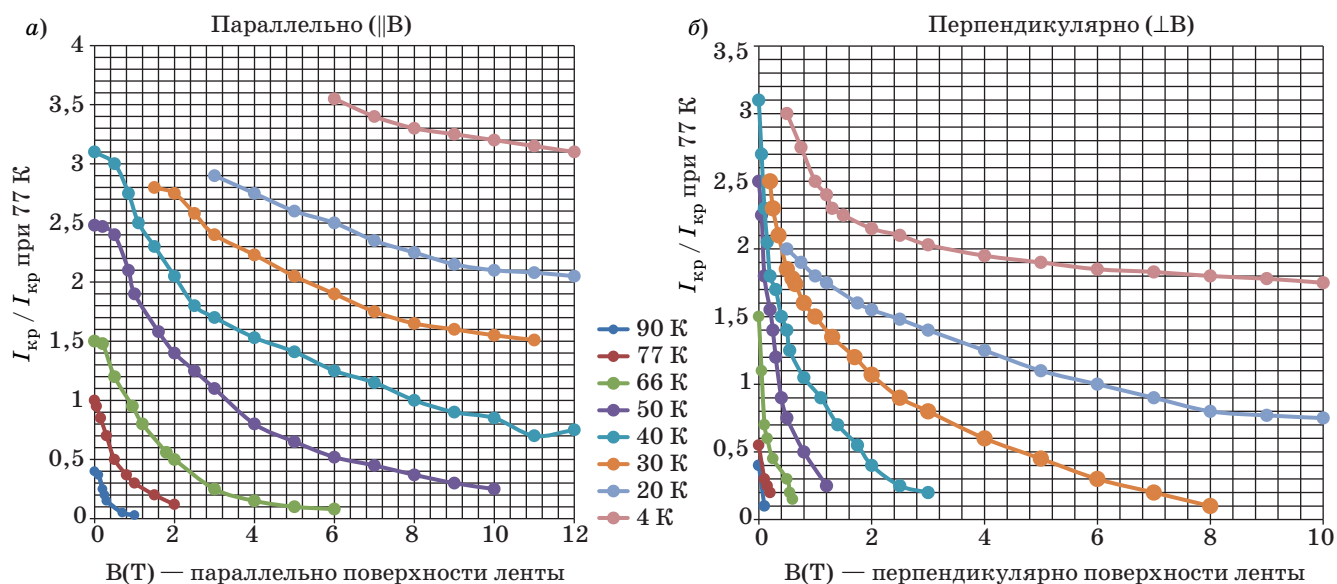
В результате были выбраны два направления создания опытных образцов сравнительно большой мощности, в которых могут быть получены большие рабочие токи (рис. 3, а, б).

Основная часть отечественных и зарубежных разработок основана на применении ВТСП-материалов для индукторов электрических машин, по аналогии с устройствами из низкотемпературных сверхпроводников. Однако ВТСП-материалы отличается высокая анизотропия во внешних магнитных полях (рис. 4, а, б). Это особенно заметно при рабочих температурах на уровне жидкого азота. В результате разработчики идут на применение в качестве хладагента жидкого неона, что сокращает объем потенциального рынка и вызывает сомнения в перспективности общепромышленного использования по ряду причин, в частности, из-за высокой стоимости неона по сравнению с азотом.

Поэтому разработчиками ВТСП-устройств, специалистами НИИ ИТЭЭ, было принято решение



■ Рис. 3. ВТСП синхронные машины с радиальным (а) и аксиальным (б) магнитным потоком



■ Рис. 4. Характеристики ВТСП-материалов в продольном (а) и поперечном (б) магнитном поле при различных температурах

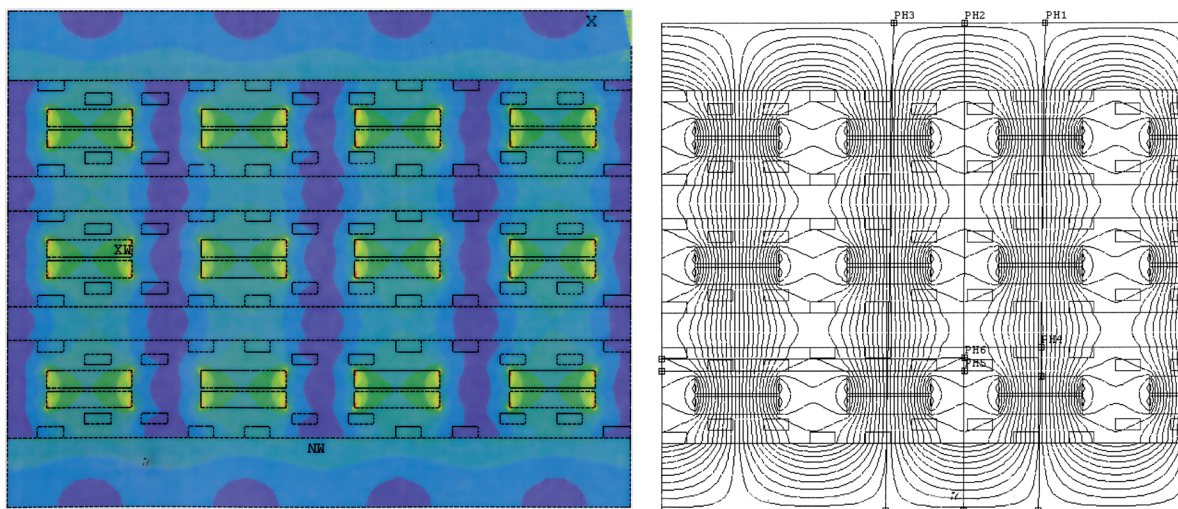
о применении ВТСП-лент для обмоток статоров, а не для обмоток роторов. Но для окончательной разработки такого типа электромеханических преобразователей энергии потребовалось математическое моделирование электромагнитных и тепловых полей.

Информационные технологии на этапе проектирования инновационных устройств

Моделирование электромагнитных полей с использованием программного обеспечения wxFEMAG показало правильность выбранного технического решения, поскольку удалось предложить конструктивные и технологические решения, обеспечившие необходимое распределение

электромагнитных полей относительно ВТСП-лент: рабочий магнитный поток направлен перпендикулярно узкой, а не широкой стороне ленты (рис. 5) в многодисковой синхронной машине с аксиальным магнитным потоком. В машине с радиальным магнитным потоком седлообразные катушки обмотки статора уложены в пазы, которые защищают ВТСП-материал от рабочего магнитного потока, и потери наводятся только небольшим по величине собственным потоком рассеяния. Такие конструкции могут применяться в электрических генераторах, двигателях и синхронных компенсаторах.

Работы по созданию электрических трансформаторов показали целесообразность возврата к трансформаторам броневого конструктива, осо-



■ Рис. 5. Характер распределения магнитного поля в зоне обмотки статора

бенно в устройствах сравнительно небольшой мощности. В отличие от предыдущего поколения броневых трансформаторов, одним из основных недостатков которого является трудность проведения ремонтных работ, предложенная конструкция обеспечивает полную ремонтпригодность с одновременным снижением доли ручного труда. При этом, как и в других типах электрических машин, обеспечивается наиболее благоприятное распределение магнитных полей относительно ВТСП-обмоток.

Последующий этап компьютерного проектирования производится из условия обеспечения ресурсо- и энергосбережения, снижения массогабаритных показателей и упрощения процесса изготовления за счет снижения доли ручного труда и замены последовательных дорожных карт производства картами с максимальным количеством параллельных участков. Используются компьютеризированные средства многокритериальных задач оптимизации и многофакторного математического моделирования.

Для проверки работоспособности проектируемого устройства в реальных условиях эксплуатации моделируются режимы наброса и сброса нагрузки, регулирования активной и реактивной мощности, переходных процессов при синхронизации с энергосистемой бесконечной мощности или с аналогичными по мощности устройствами автономной энергетики, переходных процессов при симметричных и несимметричных коротких замыканиях и др.

Большая роль на этапе проектирования отводится визуализации процессов изготовления и сборки разрабатываемых устройств с помощью специальных компьютерных программ. В результате имеется возможность не только продемонстрировать заказчику весь ход работ, но и посто-

янно вносить корректировки как в конструкцию, так и в технологию изготовления устройства в целях его совершенствования.

Информационные технологии и физическое моделирование

Информационные технологии позволяют минимизировать затраты времени на физическое моделирование за счет многокритериальной оценки достоверности математических моделей, начиная с постановки задачи, принятых упрощений и граничных условий. После этого начинается процесс разработки и изготовления достоверной физической модели с использованием компьютерных технологий.

Так, например, при изготовлении ВТСП-обмотки статора одного из устройств было принято решение о моделировании различных технологий процесса создания электрических соединений отдельных ВТСП-катушек (рис. 6) [2]. Этот



■ Рис. 6. Моделирование электрических соединений ВТСП-лент

элемент имеет большое значение для работоспособности обмотки и устройства в целом, поскольку при неправильном его выполнении возможна потеря сверхпроводящего состояния с сохранением обмоткой только резистивных режимов работы. Математическое моделирование этого элемента невозможно даже при многокритериальном подходе, учитывающем электрические, магнитные и теплофизические характеристики.

Аналогичная роль отводилась модели для исследования потерь на трение в многодисковой машине погружного исполнения [3].

Использование ИТ при разработке методологии экспериментальных исследований, оптимизации процессов измерений и обработке полученной информации позволяет оптимизировать исследуемые процессы по требуемым критериям и получить научно обоснованные рекомендации.

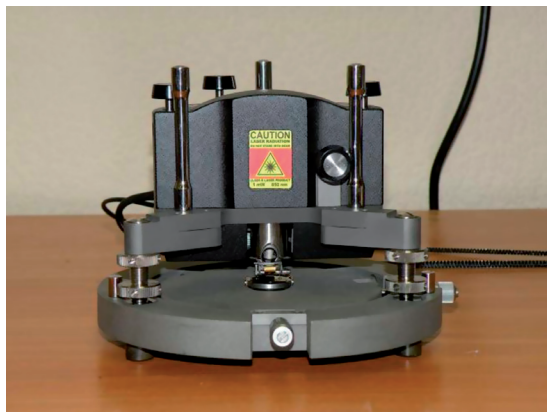
Информационные технологии на этапе разработки математической теории планирования эксперимента

Основной задачей этапа является разработка рациональных методик испытаний отдельных узлов перед сборкой устройства в целом и устройства после его сборки. На основании этой инфор-

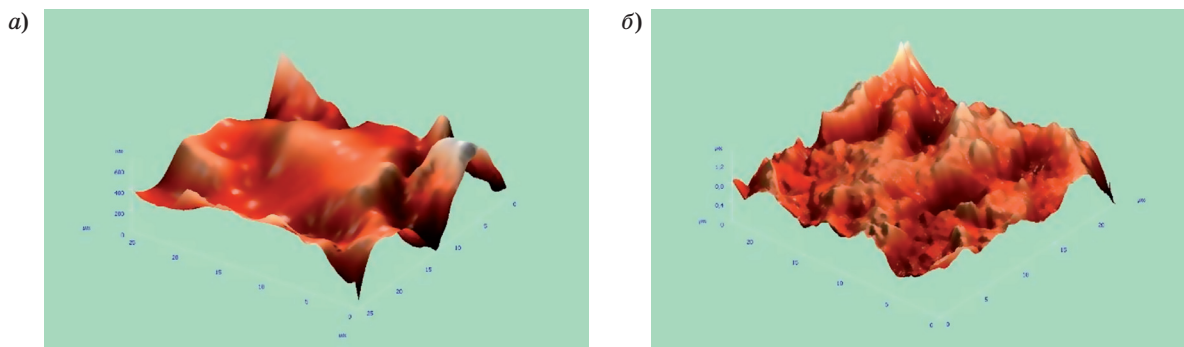
мации производится разработка схемы размещения датчиков, определение необходимой контрольно-измерительной аппаратуры, а также разработка автоматизированной системы управления экспериментом. Разработка многофакторного эксперимента, каким является экспериментальное исследование криогенных электротехнических устройств, представляет собой исключительно сложную научную и техническую задачу. Кроме традиционных электрических, электромагнитных и механических измерений необходимы исследования, контролируемые сверхпроводящее состояние токоведущих элементов; исследования, связанные с функционированием криогенной техники, и др. Все это может быть решено только на основе современных компьютерных технологий с постоянным совершенствованием экспериментальной базы и технологии получения информации и ее обработки.

В качестве примера приведем результаты некоторых разработок.

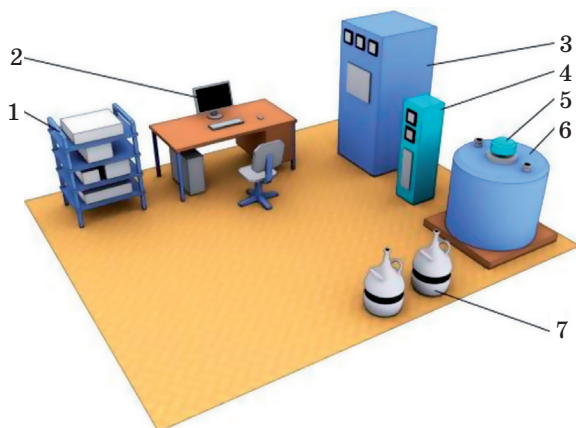
Методы исследования характеристик конструкционных наноматериалов и сверхпроводников с помощью зондовой микроскопии (рис. 7 и 8, а, б) обеспечивают проведение исследований характеристик и свойств наноматериалов (в том числе ВТСП) с поддержкой ряда измерительных мето-



■ Рис. 7. Сканирующий зондовый микроскоп с сольвером



■ Рис. 8. Изображение рельефа поверхности феррита до (а) и после (б) термоциклирования в виде 3D



■ **Рис. 9.** Общий вид измерительного комплекса: 1 — стойка с приборами; 2 — персональный компьютер; 3 — электрический шкаф управления; 4 — ЛАТР; 5 — датчик положения ротора; 6 — синхронный ВТСП-двигатель в криостате; 7 — сосуды Дьюара с жидким азотом

дик. К ним относятся контактная и резонансная атомно-силовая микроскопия, микроскопия латеральных сил, метод отображения фазы, метод модуляции силы, изображение силы адгезии, отображение сопротивления растекания, сканирующая емкостная микроскопия, метод зонда Кельвина, магнитно-силовая микроскопия, электронно-силовая микроскопия. Исследовательский комплекс включает атомно-силовую микроскопию, рабочую станцию управления атомно-силовым микроскопом, лазер, набор зондовых датчиков, платформу установки и перемещения образцов, а также сканер-анализатор магнитного поля.

Универсальная компьютерная система комплексного контроля и регистрации параметров работы оборудования (рис. 9) предназначена для контроля, регистрации и последующей обработки результатов испытаний опытного образца электроэнергетической установки. Система включает блок измерителей, позволяющий получать информацию о величинах фазных и линейных напряжений и токов, температуре ВТСП-устройств и магнитной индукции генератора и двигателя. Измерения производятся с помощью специализированных датчиков, обеспечивающих точное

измерение параметров установки и ее гальваническую развязку с системой обработки информации. Кроме того, в ее состав входят усилительный блок, предназначенный для согласования по напряжению и нормировки сигналов датчиков; блок аналого-цифровых преобразователей на базе модулей АЦП-ЦАП 16/16 SigmaUSB, позволяющих подключать и обрабатывать разнородные источники сигналов с различными частотными диапазонами и проводить сравнительный анализ. Цифровой вход/выход может использоваться для контроля и управления дискретными элементами: реле, переключателями, концевыми датчиками. Модуль может быть использован автономно в качестве контроллера для систем обработки сигналов и управления различными устройствами и исполнительными механизмами.

Заключение

Таким образом, только использование новейших достижений информационных технологий на всех этапах создания инновационной техники — от выбора направления работ до приемо-сдаточных экспериментальных исследований готовых изделий — позволяет выполнять исследования на высоком научно-техническом уровне, в короткие сроки и на уровне лучших мировых образцов.

Литература

1. Chubraeva L., Sokolovsky V., Meerovich V. Investigation of inductive FCL with a split winding and SMES with magnetic core intended for operation in superconducting complexes // *Сверхпроводимость: исследования и разработки*. 2010. № 1. С. 23–31.
2. Чубраева Л. И., Шишлаков В. Ф. и др. Физическое моделирование процессов в ВТСП проводах и изделиях // *Информационно-управляющие системы*. 2011. № 4. С. 47–52.
3. Чубраева Л. И., Шишлаков В. Ф. и др. Физическое моделирование потерь на трение в режиме холостого хода синхронного ВТСП двигателя // *Информационно-управляющие системы*. 2011. № 3. С. 34–46.

УДК 681.5

КОМПЛЕКСНАЯ СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ДИВЕРТОРА ИТЭР

С. С. Козюченко,

старший научный сотрудник

А. В. Павленко,

канд. физ.-мат. наук, начальник лаборатории

К. Ю. Павлов,

научный сотрудник

НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, г. Санкт-Петербург

Г. Л. Саксаганский,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Описана комплексная система управления установки, предназначенной для квалификационных испытаний диверторных пластин термоядерной установки ИТЭР под воздействием электронного пучка. Кратко сформулирован порядок работы стенда, функции и задачи системы управления. Приведены состав и структура используемого оборудования, архитектурные особенности разработанного прикладного программного обеспечения.

Ключевые слова — ИТЭР, дивертор, система управления.

Введение

Проект создания международного термоядерного реактора ИТЭР, в котором Россия принимает активное участие, предполагает проведение квалификационных испытаний элементов установки. Одним из важнейших и энергонагруженных элементов конструкции установки ИТЭР является дивертор, функции которого заключаются в отводе части энергии плазмы и удалении частиц с периферии плазменного шнура.

Стенд IDTF (*ITER Divertor Test Facility*) предназначен для имитационных исследований элементов диверторных пластин термоядерной установки ИТЭР на термическую прочность и тепловой отклик поверхности под воздействием электронного пучка для полномасштабных прототипов диверторных пластин, а также для квалификационных испытаний диверторных пластин при серийном производстве.

Описание объекта управления

Стенд включает в себя следующие основные части:

- вакуумную камеру;
- электронную пушку, ее системы питания и управления;

- вакуумное оборудование;
- систему охлаждения стенда и ее систему управления;
- систему охлаждения масок;
- манипулятор для перемещенияборок диверторных пластин в камере в целях выбора нужной зоны облучения;
- систему перемещения откатного фланца камеры;
- диагностическое оборудование;
- другое вспомогательное оборудование и инженерные коммуникации.

Процесс испытанияборок диверторных пластин на установке IDTF можно описать следующей последовательностью операций. Образец устанавливается и закрепляется на манипуляторе, подвижный фланец с манипулятором и закрепленным на нем образцом совмещается с камерой, производится вакуумирование объема камеры. Затем запускаются системы охлаждения, оператор производит облучение различных зон образца электронным пучком. После завершения программы испытаний подвижный фланец отсоединяется от камеры, тележка с фланцем откатывается, образец снимается с манипулятора, а персонал стенда готовит отчет об испытаниях образца.

Структура комплексной системы управления

Комплексная система управления (КСУ) станда предназначена для управления оборудованием станда и контроля параметров в различных режимах работы. КСУ выполняет следующие основные функции:

- автоматизированное управление оборудованием станда;
- диагностику работоспособности оборудования станда;
- взаимодействие со сторонними системами управления;
- обеспечение защиты персонала и сохранности оборудования станда;
- обеспечение единого и наглядного интерфейса оператора;
- сбор и фиксацию результатов проводимых испытаний.

Комплекс оборудования включает в себя (рис. 1):

- автоматизированные рабочие места АРМ операторов, составляющие вместе центральный пульт управления ЦПУ стандом;
- местные пульта управления МПУ оборудованием станда;
- программируемые логические контроллеры ПЛК, непосредственно связанные с объектами управления;
- локальную вычислительную сеть ЛВС КСУ.



■ Рис. 1. Структурная схема КСУ

Аппаратное обеспечение

Автоматизированные рабочие места операторов представляют собой персональные компьютеры на основе операционной системы Windows 7. Они предназначены для запуска программных консолей оператора и другого вспомогательного программного обеспечения (ПО). На них также исполняются компоненты серверного ПО, обеспечивающие работу станда — сервер OPC и сервер базы данных.

Местные пульта управления предназначены для управления вакуумной подсистемой станда и системами движения непосредственно в зоне расположения оборудования. В качестве аппаратной платформы для МПУ используются панельные промышленные компьютеры National Instruments моделей PPC-2115 и TPC-2106T.

Программируемые логические контроллеры представляют собой специализированные модульные микропроцессорные устройства, предназначенные для выдачи и приема электрических сигналов непосредственно от оборудования станда в соответствии с написанной для них прикладной программой. В составе КСУ станда IDTF работают контроллеры National Instruments линейки CompactRIO [1, 2]. Они функционируют под управлением операционной системы реального времени VxWorks. Все автоматизированные операции станда производятся именно в ПЛК, а операторские пульта предназначены только для отображения этой информации.

Все оборудование КСУ соединено между собой с помощью ЛВС, благодаря чему обеспечивается обмен данными между компонентами системы.

Пространственно оборудование КСУ размещено в трех металлических шкафах управления.

Первый шкаф предназначен для управления оборудованием вакуумной подсистемы. В нем расположен контроллер National Instruments CompactRIO 9073 с модулями ввода-вывода, с цифровыми выходами управления вакуумными клапанами и насосами, а также аналоговыми входами для ввода и оцифровки сигналов с вакуумных датчиков давления (всего около 180 цифровых и 8 аналоговых сигналов). В конструктив шкафа встроен панельный компьютер МПУ вакуумной подсистемы.

Второй шкаф обслуживает подсистемы управления движением откатного фланца камеры и движением манипулятора. В нем установлен контроллер National Instruments CompactRIO 9074 и МПУ систем движения. Привод откатного фланца запитан через преобразователь частоты Lenze мощностью 2,2 кВт. Событиями, инициирующими начало и остановку движения, являются команды оператора с МПУ или сигналы с концевых выключателей.

Система движения манипулятора устроена несколько сложнее. Помимо концевых датчиков на

приводе манипулятора установлен инкрементальный энкодер. Управление реализовано через специализированный модуль управления движением National Instruments 9514 и преобразователь частоты КЕВ Kombivert F5A мощностью 2 кВт. Это оборудование позволяет организовать систему движения с обратной связью по положению на аппаратном уровне. Оператор может задать перемещение образца с точностью до одного миллиметра.

Второй шкаф управления также обеспечивает связь КСУ с системами управления электронной пушкой и охлаждением стенда. Эти системы являются сторонними по отношению к КСУ, поэтому в КСУ не интегрированы. Связь с ними организована на уровне сигналов ввода-вывода.

Третий шкаф — шкаф диагностики — расположен непосредственно на подвижном фланце вакуумной камеры. В нем установлен контроллер National Instruments CompactRIO 9073, в функции которого входит управление отсечными клапанами системы охлаждения (в случае аварийного отключения), а также прием и оцифровка сигналов с термопар, расположенных на исследуемой диверторной сборке (около 50 каналов).

Программное обеспечение

Все прикладное ПО стенда написано в среде National Instruments Labview 2011 [3]. Для разработки также использованы дополнительные модули Labview RealTime Module, Labview TouchPanel Module, Labview SoftMotion Control Module, Labview Datalogging and Supervisory Control Toolkit. Благодаря использованию комплексного решения от одного производителя все функции КСУ удалось реализовать в одной программной среде — единообразно и стандартными средствами.

Операторский интерфейс главным образом сосредоточен на двух программных операторских

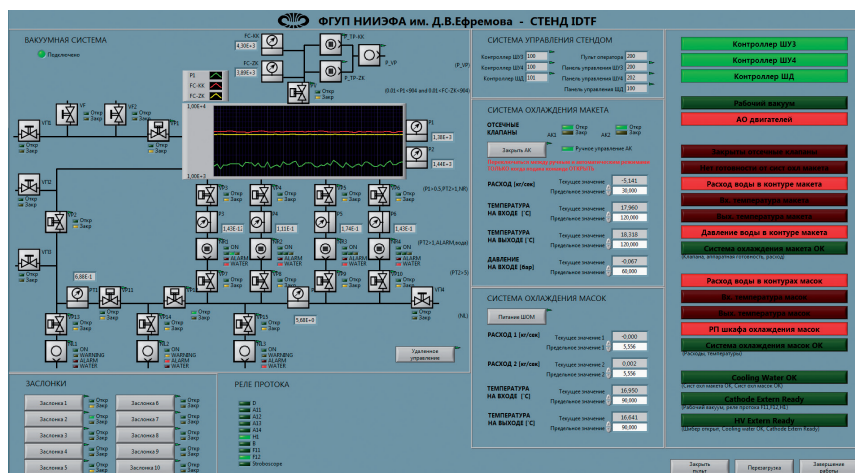
консолях ЦПУ. Консоли выполнены в виде отдельных исполняемых программ и могут быть запущены как на одном АРМ главного оператора, так и на двух различных АРМ в ЦПУ.

Главная консоль оператора (рис. 2) содержит мнемосхему вакуумной системы, блоки управления системами охлаждения и блок индикации. Мнемосхема позволяет контролировать состояние вакуумного оборудования и управлять клапанами и насосами в процессе откачки. Блок индикации на главной консоли дает наглядное графическое представление о текущем состоянии стенда в целом, помогает быстро определить возможные неполадки.

Диагностическая консоль оператора (рис. 3) предназначена для контроля температур, расхода воды, параметров электронной пушки и другого оборудования в процессе испытаний образца.

На диагностической консоли также реализован централизованный сбор и запись показаний со всех датчиков стенда (термопар, датчиков давления воды, газа, давления в камере и др.) в базу данных Citadel в реальном масштабе времени. Количество каналов сбора данных — около 100, частота опроса по всем каналам составляет 10 Гц. Значения сохраняются с учетом метки времени, присвоенной во время оцифровки. За счет этого задержки на передачу данных от ПЛК к АРМ по интерфейсу не влияют на время фиксации в базе данных.

Местный пульт управления вакуумной системы дублирует управление вакуумной системой на ЦПУ, имеет тот же вид и эквивалентные функциональные возможности. Управление вакуумной системой производится только с одного пульта в каждый момент времени — возможность двойного управления исключена. Оператор ЦПУ в любой момент может делегировать управление вакуумной системой на МПУ и снова принять управление на себя.



■ Рис. 2. Главная консоль оператора



■ **Рис. 3.** Диагностическая консоль оператора

Местный пульт управления системами движения является единственным органом управления этим оборудованием. На ЦПУ его функциональность не дублируется, поскольку при управлении движением оператор обязан лично контролировать процесс перемещения. На экране МПУ системы движения расположены две вкладки — пульт управления системы движения откатного фланца камеры и пульт управления системы управления перемещением подвижной части манипулятора. На обеих вкладках отображается текущий режим движения, состояние конечных выключателей и кнопки управления. На вкладке управления перемещением подвижной части манипулятора показана также текущая координата. Реализована возможность задать желаемое положение манипулятора с цифровой клавиатуры.

Прикладное ПО контроллеров выполняет функции сетевого обмена через ЛВС установки, отработки команд оператора и обработки данных. Все команды оператора, отданные с любого из пультов системы, передаются на уровень ПЛК и преобразуются в соответствующие электрические сигналы. Частота сетевого обмена данными между элементами установки составляет 10 Гц.

Особое внимание уделено проработке комплекса защитных блокировок КСУ. Это управляющие воздействия, которые запускаются автоматически при возникновении определенных условий. Они призваны обеспечить сохранность оборудования установки и безопасность персонала даже при неверных действиях оператора. Срабатывание блокировок не является аварийной ситуацией. Условия безопасности контролируются постоянно в штатных и аварийных режимах.

Наибольшее количество защитных блокировок применяется к сигналам разрешения подачи

высоковольтного напряжения на анод электронной пушки. В частности, должны штатно работать все контроллеры КСУ, должен обеспечиваться проток воды в каждом из контуров систем охлаждения не ниже заданного уровня, температура воды в каждом из контуров охлаждения не должна превышать установленный уровень, должны выполняться условия электробезопасности и радиационной безопасности.

Комплексная система управления прошла предварительные испытания в составе стенда. В настоящее время на стенде IDTF проводятся приемосдаточные испытания по требованиям ИТЭР и ввод его в эксплуатацию.

Заключение

Комплексная система управления является одной из важнейших составляющих частей стенда IDTF. Созданная система управления позволяет эффективно и безопасно проводить квалификационные испытания элементов дивертора установки ИТЭР на термическую прочность.

Литература

1. **CompactRIO Developer's Guide.** <http://www.ni.com/compactriodevguide/> (дата обращения: 01.04.2012).
2. **LabVIEW Realtime.** Разработка приложений: учебный курс National Instruments. <http://www.labview.ru/training/> (дата обращения: 01.04.2012).
3. **Bitter R., Mohiuddin T., Nawrocki M.** LabVIEW: advanced programming techniques. — CRC Press, 2007. — 499 p.

УДК 621.314.263

УПРАВЛЕНИЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИМ ИНДУКТИВНЫМ НАКОПИТЕЛЕМ ЭНЕРГИИ

М. В. Пронин,

доктор техн. наук, профессор

А. Г. Воронцов,

канд. техн. наук, старший преподаватель

ОАО «Силовые машины», г. Санкт-Петербург

А. Ю. Хон,

начальник группы

НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, г. Санкт-Петербург

Предложена схема и алгоритм управления накопителем энергии со сверхпроводящими индуктивными катушками. В накопителе использован многотактный активный выпрямитель и широтно-импульсные преобразователи. Предложено векторное управление, которое обеспечивает регулирование активной и реактивной мощностей сети переменного напряжения, а также напряжения нагрузки.

Ключевые слова — сверхпроводящий накопитель энергии, активный выпрямитель, векторное управление, математическая модель, компьютерная модель.

Введение

Существуют различные способы накопления энергии: в виде потенциальной энергии воды в гидроаккумулирующих электростанциях, в виде кинетической энергии маховиков, в виде электроэнергии аккумуляторов и конденсаторов, в виде тепловой энергии. В зависимости от способа накопления и количества энергии может использоваться с различными назначениями: для оптимизации режимов работы электростанций, для электродвижения судов, кораблей, электромобилей и другого транспорта, для аварийного и импульсного питания электропотребителей, для электроинструмента.

Для большинства типов накопителей энергии требуется более или менее сложная силовая аппаратура управления, а также устройства регулирования процессов накопления и расходования энергии. В некоторых системах аппаратура управления проста и имеет второстепенное значение, в других — сложна, наукоемка, а стоимость ее составляет значительную часть стоимости всего изделия.

В данной статье рассматривается сверхпроводящий индуктивный накопитель энергии (СПИН), в котором энергия запасается в магнитном поле, а для регулирования процессов накопления и рас-

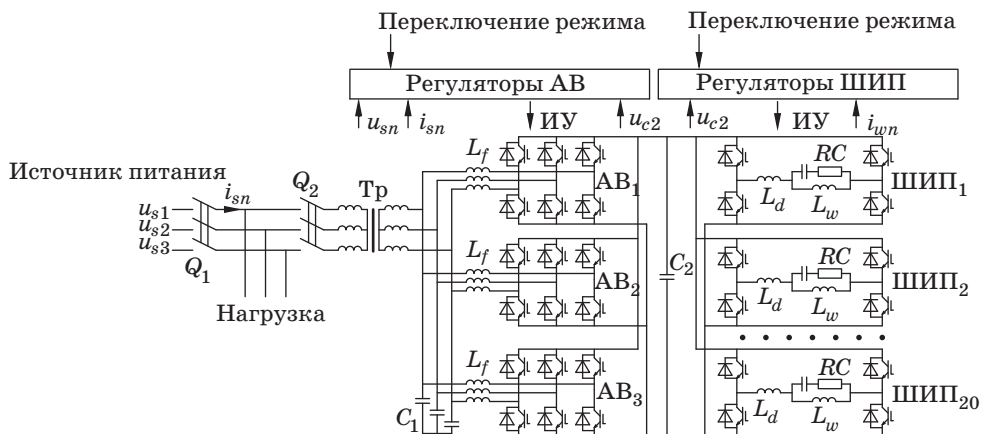
ходования энергии используется транзисторный преобразователь, содержащий активный выпрямитель и широтно-импульсные преобразователи. Предполагается применение СПИН в качестве аварийного источника питания. Предложены структура аппаратуры управления и алгоритмы регулирования электромагнитных процессов.

Силовая схема СПИН

Аппаратура управления СПИН разрабатывается при условии, что созданы сверхпроводящие индуктивные катушки с максимальным током 100 А и индуктивностью 10 Гн. Энергия катушки при указанном токе определяется известным выражением $W_w = 0,5 \cdot L_w i_w^2 = 0,5 \cdot 10 \cdot 100^2 = 50$ кДж. При минимальном токе катушки 50 А минимальная энергия равна 12,5 кДж. При этом накапливаемая и расходуемая энергия одной катушки равна 37,5 кДж.

Если мощность СПИН равна 70 кВт в течение 10 с, или 700 кВт в течение 1 с, то с учетом КПД преобразовательного оборудования требуется 20 сверхпроводящих индуктивных катушек. Предлагаемая схема такого аварийного (импульсного) источника питания изображена на рис. 1.

Основные элементы СПИН: трансформатор Tr ; индуктивно-емкостной фильтр с емкостями C_1



■ Рис. 1. Схема СПИН с аппаратурой управления: ИУ — импульсы управления

и индуктивностями L_f ; активный выпрямитель АВ с транзисторными мостами АВ₁–АВ₃; емкостной фильтр постоянного напряжения C_2 ; широтно-импульсные преобразователи напряжения ШИП₁–ШИП₂₀; LCR-фильтры напряжений нагрузки с индуктивностями L_d и RC-цепями; сверхпроводящие индуктивности L_w ; системы управления АВ и ШИП. Источником питания СПИН является электросеть 380 В, 50 Гц, мощностью не менее 50 кВ·А.

В режиме накопления энергии в СПИН ток в каждой катушке увеличивается до 100 А. При поддержании энергии СПИН токи в сверхпроводящих индуктивностях стабилизируются на уровне $(100 \pm 0,5)$ А.

В режиме аварийного источника питания энергия СПИН выдает в трехфазную нагрузку с напряжением 380 В и частотой 50 Гц. Мощность нагрузки и длительность ее питания соответствуют накопленной энергии. Например, возможна выдача мощности 100 кВ·А (70 кВт) в течение 10 с, или мощности 1000 кВ·А (700 кВт) в течение 1 с. В процессе питания трехфазной нагрузки допускается снижение тока в сверхпроводящих индуктивностях от 100 до 50 А, что соответствует использованию 75 % энергии, накопленной в электромагнитном поле до начала этого режима.

Поскольку мощность 1000 кВ·А обеспечивается только в течение 1 с, мощность трансформатора равна 100 кВ·А, т. е. он работает с многократной перегрузкой. Транзисторные мосты АВ₁–АВ₃ работают в многотактном режиме — пилообразные опорные напряжения мостов взаимно сдвинуты по фазе на угол, равный отношению 360 эл. град к количеству мостов. Это облегчает фильтрацию напряжений и токов сети и позволяет снизить токовую нагрузку конденсаторов на входе и выходе АВ. LCR-фильтры в цепях сверхпроводящих индуктивностей L_w используются для уменьшения размаха пульсаций напряжения.

Алгоритмы управления СПИН

Для управления СПИН используются два алгоритма. Переключения системы управления из одного режима в другой осуществляются по сигналу, который формируется в результате анализа напряжения сети.

В режимах накопления и поддержания энергии СПИН (режим 1) АВ стабилизирует выпрямленное напряжение, обеспечивает синусоидальность токов сети 380 В, 50 Гц и коэффициент мощности, близкий к 1. В каждом ШИП регулятор стабилизирует ток сверхпроводящей катушки на уровне $(100 \pm 0,5)$ А.

В режиме аварийного источника (режим 2) выпрямленное напряжение стабилизируется регуляторами ШИП при снижении токов катушек. АВ стабилизирует напряжение и частоту сети 380 Гц, 50 Гц и обеспечивает синусоидальность токов. Коэффициент мощности сети в этом режиме определяется нагрузкой.

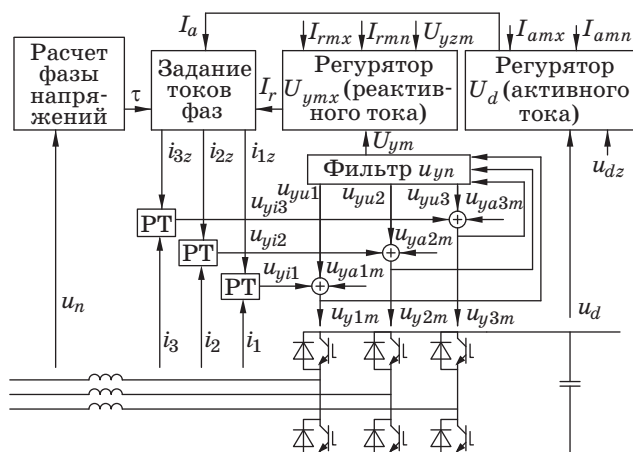
Наиболее сложным элементом СПИН является АВ. Особенности АВ в различных вариантах применения и алгоритмы управления рассмотрены в технической литературе [1–12]. В данном случае для режима 1 структура системы управления АВ представлена на рис. 2.

Синхронизация АВ с сетью осуществляется по фазе τ напряжений сети:

$$\left. \begin{aligned} u_x &= (u_3 - u_2) / \sqrt{3}, U_m = \sqrt{u_x^2 + u_1^2}, \\ \text{если } u_x > 0, \text{ то } \tau &= \arcsin(u_1 / U_m), \\ \text{иначе } \tau &= \pi - \arcsin(u_1 / U_m), \end{aligned} \right\}$$

где u_1, u_2, u_3 — напряжения фаз энергосистемы.

При стабилизации напряжения на выходе АВ на входы регулятора поступают сигналы по заданному u_{dz} и фактическому u_d выпрямленному напряжению.



■ Рис. 2. Система управления АВ в режиме накопления энергии в СПИН: РТ — регулятор тока

На выходе формируется амплитуда активных составляющих токов фаз I_a :

$$\left. \begin{aligned} I_a &= K_{ao}(u_{dz} - u_d) + I_{ai}, \\ \text{если } I_a > I_{amx}, & \text{ то } I_a = I_{amx}, \\ \text{если } I_a < I_{amn}, & \text{ то } I_a = I_{amn}, \\ \text{иначе } I_{ai} &= K_{ai} \int (u_{dz} - u_d) dt, \end{aligned} \right\}$$

где t — время; K_{ai} , K_{ao} — коэффициенты регулятора; I_{amx} , I_{amn} — ограничения амплитуды активных токов «сверху» и «снизу».

При колебаниях напряжения питания возможен переход АВ в режим перемодуляции, при котором ограничиваются возможности управления. Чтобы это не произошло, предусмотрен регулятор амплитуды напряжений управления. На его входы поступают сигналы по заданной амплитуде напряжений U_{yzm} и фактической амплитуде U_{ym} . На выходе формируется амплитуда заданных реактивных составляющих токов I_r :

$$\left. \begin{aligned} I_r &= K_{ro}(U_{yzm} - U_{ym}) + I_{ri}, \\ \text{если } I_r > I_{rmx}, & \text{ то } I_r = I_{rmx}, \\ \text{если } I_r < I_{rmn}, & \text{ то } I_r = I_{rmn}, \\ \text{иначе } I_{ri} &= K_{ri} \int (U_{yzm} - U_{ym}) dt, \end{aligned} \right\}$$

где K_{ri} , K_{ro} — коэффициенты регулятора; I_{rmx} , I_{rmn} — ограничения амплитуды реактивных токов «сверху» и «снизу».

Если амплитуда заданной реактивной составляющей тока сети равна 0, то АВ работает с коэффициентом мощности, близким к 1.

В блоке определения фазы напряжений сети вычисляется фаза τ . Это позволяет суммировать активные и реактивные составляющие токов и вычислить заданные токи фаз мостов:

$$\left. \begin{aligned} i_{1z} &= I_a \sin(\tau) + I_r \cos(\tau); \\ i_{2z} &= I_a \sin(\tau - 2\pi/3) + I_r \cos(\tau - 2\pi/3); \\ i_{3z} &= I_a \sin(\tau - 4\pi/3) + I_r \cos(\tau - 4\pi/3). \end{aligned} \right\}$$

Токи фаз каждого моста искажены высшими гармониками и составляющими нулевой последовательности. Чтобы ослабить влияние пульсаций токов на электромагнитные процессы и устранить влияние составляющих нулевой последовательности, регулирование осуществляется по суммарным токам фаз АВ:

$$i_n = \sum_{m=1}^M i_{vnm}.$$

В каждой фазе каждого моста АВ ток регулируется пропорциональным регулятором. На их входы поступают сигналы по заданному i_{nz} и фактическому i_n токам. На выходах формируются сигналы по «токовым» составляющим напряжений управления:

$$u_{yin} = K_{io}(i_{nz} - i_n).$$

В фазах мостов для выравнивания токов и подавления составляющих нулевой последовательности используются еще пропорциональные регуляторы, на входы которых поступают сигналы по заданному току i_{nz}/M (M — количество мостов) и по фактическому току i_{vnm} . На выходах формируются сигналы по «уровнительным» составляющим напряжений управления:

$$u_{yanm} = K_{ao}(i_{nz} / M - i_{vnm}).$$

Напряжения управления мостов u_{ynm} формируются в виде сумм «токовых» u_{yin} , «сетевых» u_{yun} и «уровнительных» u_{yanm} составляющих:

$$u_{ynm} = u_{yin} + u_{yun} + u_{yanm}.$$

Составляющие u_{yun} выделяются из усредненных напряжений управления:

$$u_{yn} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M u_{ynm}.$$

Для определения составляющих u_{yun} проводится фильтрация напряжений управления u_{yn} , как описано в работах [2, 3]. При этом на выходе фильтра выделяются амплитуда U_{ym} и фаза τ_u основных составляющих напряжений управления. Это позволяет определить мгновенные значения основных составляющих напряжений управления:

$$u_{yun} = U_{ym} \sin[\tau_u - 2\pi(n-1)/3].$$

Описанный алгоритм управления АВ использован при построении математической и компьютерной моделей СПИН в целом.

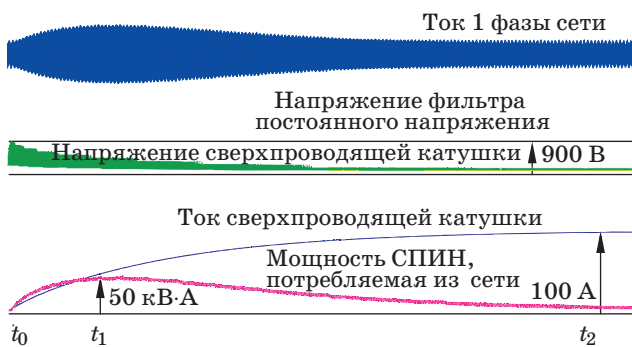
Результаты расчетов режимов работы СПИН

Компьютерные модели СПИН построены по методологии моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам [2, 3]. Методология позволяет создавать модели, работающие с минимальными затратами машинного времени [9]. Программы расчетов на ЭВМ разработаны на языке программирования C++ и встроены в графическую оболочку, которая позволяет отображать информацию на экране дисплея, вводить в ЭВМ исходные данные для расчетов, анализировать результаты расчетов, представлять результаты в виде графиков и таблиц.

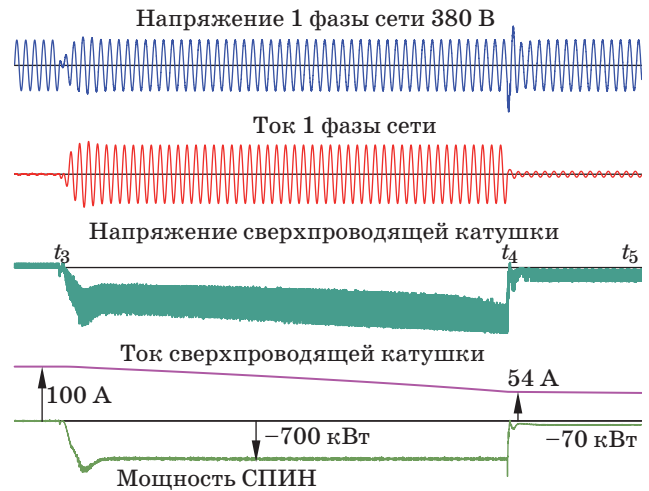
По разработанным программам выполнена серия расчетов режимов работы СПИН. Один расчет выполнен для режима включения СПИН и накопления энергии в сверхпроводящих катушках. При расчете использованы указанные выше параметры СПИН. Токи в индуктивностях изменялись от 0 до 100 А. Частота широтно-импульсной модуляции в АВ и ШИП принята равной 8000 Гц.

Результат расчета процесса накопления энергии в сверхпроводящих катушках представлен на рис. 3. На рисунке изображены: ток 1 фазы питающей электросети; выпрямленное напряжение АВ; напряжение 1 сверхпроводящей катушки; ток 1 сверхпроводящей катушки; мощность, потребляемая из питающей сети в процессе накопления энергии (коэффициент мощности равен 1).

В момент времени t_0 СПИН подключается к сети 380 В, 50 Гц и переходит в режим «зарядки» сверхпроводящих катушек. До момента t_1 СПИН передает энергию сети в катушки при снижении их напряжения. В момент t_1 достигается максимальная мощность СПИН 50 кВ·А и далее до момента t_2 мощность снижается. В момент t_2 ток сверхпроводящих катушек достигает 100 А, зарядка катушек прекращается, мощность СПИН уменьшается до мощности потерь.



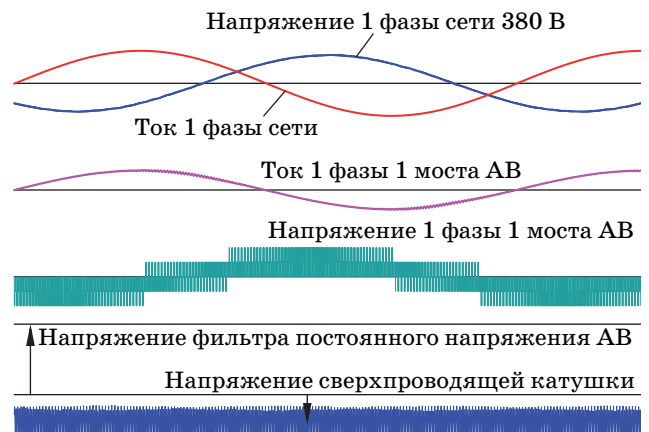
■ Рис. 3. Режим накопления энергии в СПИН



■ Рис. 4. Напряжения и токи СПИН при питании сети 380 В (мощность 700 кВт)

Переход СПИН из режима поддержания энергии катушек в режим питания нагрузок сети 380 В, 50 Гц происходит автоматически при исчезновении напряжения сети. При этом СПИН поддерживает заданное напряжение сети 380 В и генерирует ту мощность, которая требуется нагрузке. Этот процесс отображен на рис. 4. На рисунке изображены: напряжение фазы сети, ток фазы сети, напряжение 1 сверхпроводящей катушки, ток 1 катушки, мощность СПИН.

В соответствии с рис. 4 в момент времени t_3 отключается питающая сеть и СПИН из «ждущего» режима переходит в «активный» режим работы, т. е. питает нагрузку сети 380 В, 50 Гц мощностью 700 кВт (1000 кВ·А). При этом изменяется знак напряжений на сверхпроводящих катушках и токи катушек начинают уменьшаться. В этом режиме СПИН работает 1 с. Как видно из диаграммы, в процессе разрядки сверхпроводя-



■ Рис. 5. Напряжения и токи СПИН при питании сети 380 В — фрагмент (мощность 700 кВт)

щих катушек в течение 1 с их токи уменьшаются от 100 А до 54 А. В момент времени t_4 мощность нагрузки сети 380 В уменьшается до 70 кВт (100 кВ·А) и дальнейшая работа продолжается при этой мощности до момента, при котором ток катушек станет меньше 50 А.

Фрагмент процесса работы СПИН с мощностью 700 кВт представлен на рис. 5, где изображены: напряжение и ток фазы сети, ток и напряжение 1 фазы 1 моста АВ, выпрямленные напряжения АВ и 1 сверхпроводящей катушки. На рисунке видно, что ток и напряжение сети 380 В, 50 Гц в этом режиме практически синусоидальны.

Очевидно, что в рассматриваемой системе обеспечивается переход СПИН в режим работы при нагрузке 70 кВт (100 кВ·А) сети 380 В, 50 Гц. Запас энергии сверхпроводящих катушек обеспечивает работу в этом режиме в течение 10 с.

Литература

1. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Силовые полностью управляемые полупроводниковые преобразователи (моделирование и расчет) / ОАО «Электросила». — СПб., 2003. — 172 с.
2. Пронин М. В., Воронцов А. Г., Калачиков П. Н., Емельянов А. П. Электроприводы и системы с электрическими машинами и полупроводниковыми преобразователями (моделирование, расчет, применение) / ОАО «Силовые машины» «Электросила». — СПб., 2004. — 252 с.
3. Пронин М. В. Электромеханотронные системы. Создание на основе комплекса уточненных быстродействующих моделей. — LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. — 224 с.
4. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Активная фильтрация напряжений и токов сети в установках с высоковольтными тиристорными преобразователями // Горное оборудование и электромеханика. 2005. № 5. С. 41–45.
5. Пронин М. В. Моделирование и анализ системы с многофазным асинхронным генератором и многофазным активным выпрямителем // Электротехника. 2006. № 5. С. 55–61.
6. Пронин М. Активные фильтры высших гармоник. Направления развития // Новости электротехники. 2006. № 2(38). <http://www.news.elteh.ru/> (дата обращения: 16.05.2012).
7. Пронин М. В., Воронцов А. Г. Система с многофазным асинхронным генератором и несколькими ак-

Заключение

В статье предложена структура накопителя энергии (аварийного источника питания), содержащего сверхпроводящие катушки индуктивно-стей и транзисторный преобразователь с активным выпрямителем и широтно-импульсными преобразователями постоянного напряжения.

Предложен алгоритм векторного управления накопителем энергии, в соответствии с которым разделяются системы управления активным выпрямителем и широтно-импульсными преобразователями и осуществляется раздельное регулирование активной и реактивной мощности выпрямителя.

Работа выполнялась в ФГУП «НИИ ЭФА». Преобразовательное оборудование разрабатывалось в ООО «Лаборатория преобразовательной техники» при участии специалистов ГУАП.

тивными преобразователями // Электротехника. 2007. № 10. С. 41–45.

8. Пронин М. В., Воронцов А. Г., Терещенков В. В. Управление многотактным активным выпрямителем экскаватора ЭКГ-35К // Горное оборудование и электромеханика. 2009. № 10. С. 29–33.
9. Кузин М. Е., Нахди Т., Кистанова Е. В., Пронин М. В., Воронцов А. Г. Особенности моделирования электрических систем в SIMULINK и методами их расчета по взаимосвязанным подсистемам // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. № 7. С. 88–95.
10. Pronin M., Shonin O., Vorontsov A., Gogolev G. Control system of the multistage active rectifier energizing power shovel multi-motor variable-frequency drive for mining applications // EPE-2011, Aug. 30 — Sept. 01, 2011, Birmingham, UK. <http://www.epe2011.com/> (дата обращения: 01.09.2011).
11. Pronin M., Shonin O., Vorontsov A., Gogolev G. A Pumped Storage Power Plant with Double-Fed Induction Machine and Cascaded Frequency Converter // EPE-2011, Aug. 30 — Sept. 01, 2011, Birmingham, UK. <http://www.epe2011.com/> (дата обращения: 01.09.2011).
12. Pronin M., Shonin O., Vorontsov A., Gogolev G., Nahdi T. A Double-Fed Induction Machine with a Multistage-Multilevel Frequency Converter for Pumped Storage Power Plant Applications // PEAM 2011, Sept. 08 — Sept. 09, 2011, Wuhan, China. <http://www.peamconf.org/2011/> (дата обращения: 09.09.2011).

УДК 621.313

ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ СОЗДАНИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ МИНИ-ТУРБОГЕНЕРАТОРОВ И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

И. Ю. Кручинина,

канд. техн. наук, заместитель директора по научной работе

В. Н. Антипов,

доктор техн. наук, ведущий научный сотрудник

Институт химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, г. Санкт-Петербург

Выполнены исследования по созданию мини-турбогенераторов предельных мощностей, основанные на применении новых материалов. Определены максимально допустимые электромагнитные и механические нагрузки мини-турбогенераторов мощностью 100 и 200 кВт в зависимости от допустимых размеров сердечника статора. Разработаны модели для комплексной оптимизации выбранных параметров генератора и для решения трехмерной контактной задачи теории упругости методом конечных элементов на математической модели фрагмента конструкции ротора. Для решения принципиальных проблем создания мини-турбогенератора мощностью 200 кВт с частотой вращения $100\ 000\ \text{мин}^{-1}$ и выше необходимо получить более прочные материалы и антифрикционные покрытия для ротора, аморфные сплавы для сердечника статора и улучшить высококоэрцитивные магниты. В статье приведена расчетная оценка влияния свойств материалов на технико-экономические показатели мини-турбогенераторов.

Ключевые слова — высокоскоростной генератор, новые материалы, покрытия, постоянные магниты, аморфные сплавы.

Введение

Газотурбинные станции с одновременной выработкой электрической и тепловой энергии для малой энергетики по ряду технико-экономических показателей имеют преимущество перед большой энергетикой, прежде всего, за счет скорости возведения станций и уменьшенных инвестиций. Типичными являются ТЭЦ с двумя и четырьмя газотурбинными агрегатами с электрической мощностью каждой турбины 9 МВт. Перспективным турбогенератором для децентрализованной энергетики является быстроходный турбогенератор с возбуждением от постоянных магнитов и частотами вращения $6000\ \text{мин}^{-1}$ и выше.

В настоящее время самой низкой себестоимостью выработанной электроэнергии и самой высокой эффективностью полезного использования топлива (до 90 %) характеризуются когенерационные установки, использующие технологию прямого газотурбинного цикла.

Высокоскоростные турбогенераторы для малой энергетики

В ИХС РАН разработан проект высокоскоростного турбогенератора для децентрализованной энергетики мощностью 6,0 МВт на частоту вращения $12\ 000\ \text{мин}^{-1}$, имеющий повышенные технико-экономические показатели [1], что потребовало комплексного подхода в расчетно-проектных и материаловедческих исследованиях и принятия новых проектных и технологических решений. Мощность 6,0 МВт реализована в расточке статора 310 мм. Сравнение удельных характеристик разработанного турбогенератора СГПМ-6-12000 с традиционным турбогенератором ТК-6-2РУХЛЗ приведено в табл. 1. Основные номинальные данные и размеры статора представлены в табл. 2.

Одна из технологий малой энергетики базируется на применении мини-турбин. Наиболее распространенными на нашем рынке являются мини-турбины американской фирмы Сар-

■ **Таблица 1.** Сравнение высокоскоростного турбогенератора с традиционным

Параметр	ТК-6-2РУХЛЗ	СГПМ-6-12000
Мощность, кВт	6000	6000
Напряжение, В	6300	6300
Частота вращения, мин ⁻¹	3000	12 000
КПД, %	97,4	98,0
Масса, кг	20 040	4780
Удельная масса, кг/кВт	3,34	0,8

■ **Таблица 2.** Основные номинальные данные и размеры турбогенератора

Основные номинальные данные	
Мощность номинальная	6000 кВт
Напряжение номинальное	3150 В
Ток номинальный	1221 А
Частота	200 Гц
Число фаз	3
Число полюсов	2
Коэффициент мощности	0,9
Основные размеры сердечника якоря, мм	
Внешний диаметр	610
Внутренний диаметр	310
Активная длина	2100
Зазор	8,0
Высота ярма	84,5
Размеры паза	12,5 × 65,0

stone мощностью 30, 65 и 200 кВт номинальной частотой вращения вала 96 000 мин⁻¹ [2]. Мини-турбины могут объединяться в кластеры до 1 МВт. Другая фирма Elliott (Calnetix) на российском рынке предлагает известную турбину TA-100 и имеет разработанный ряд мини-турбин с различной номинальной скоростью вращения [3]. В табл. 3 представлены данные по мини-турбогенераторам фирмы Calnetix.

Для мини-турбинных установок нами предлагаются высокоскоростные турбогенераторы с возбуждением от постоянных магнитов:

■ **Таблица 3.** Основные геометрические размеры мини-турбогенераторов фирмы Calnetix

Типоразмер	Мощность, кВт	Частота вращения, мин ⁻¹	Диаметр ротора статора, мм	Активная длина статора, мм
RSS-12-115-1	12	115 000	37,6	56,9
RSS-26-84-1	26	84 000	44,5	92,9
RSS-100-60-1	100	60 000	72,9	171,5

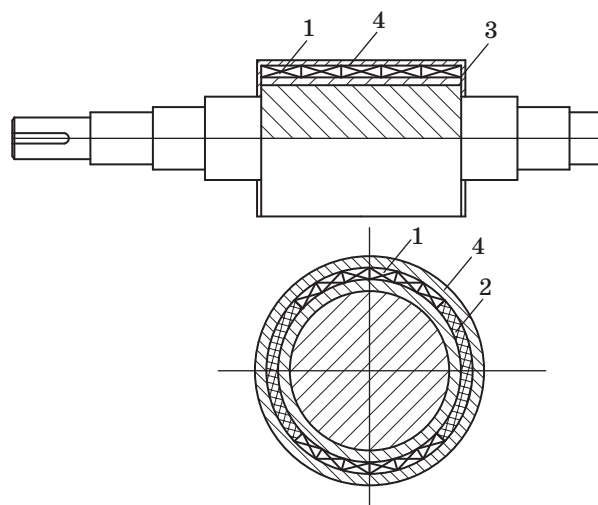
— для проекта малоразмерных газотурбинных установок ФГУП «УАП «Гидравлика» разработаны турбогенераторы СГПМ-0,25-48000 (250 кВт, 400 В, 48 000 мин⁻¹) и СГПМ-0,10-67000 (100 кВт, 400 В, 67 000 мин⁻¹);

— для проекта газотурбинной установки ГТУ-1С ФГУП ММПП «Салют» — турбогенератор СГПМ-1,0-24000 (1000 кВт, 400 В, 24 000 мин⁻¹).

Отличительной особенностью конструкции разработанных высокооборотных турбогенераторов с возбуждением от постоянных магнитов является патентно-защищенное исполнение ротора [4] (рис. 1). Магнитная система ротора турбогенератора состоит из набора элементарных магнитов (размер которых определяется технологическими соображениями), занимающих в окружном направлении две зоны по 120–140°, между которыми располагаются немагнитные вставки для образования полюсов ротора. Магниты и вставки крепятся на подложке посредством бандажного цилиндра и с торцевых сторон фиксируются запорными кольцами, которые выполнены из материала с низким электрическим сопротивлением, например из меди.

Предлагаемая конструкция обеспечивает пусковые характеристики синхронной машины, и генератор может работать в режиме двигателя, создавая необходимый пусковой момент. Конструкция отличается простотой и надежностью, так как содержит минимально необходимое число элементов.

Для повышения технико-экономических показателей высокооборотных турбогенераторов децентрализованной энергетики должны быть использованы новые, полученные с помощью нанотехнологий, материалы, в том числе: немагнит-



■ **Рис. 1.** Конструкция ротора по патенту РФ № 2320064: 1 — элементарные магниты; 2 — немагнитные вставки; 3 — запорные кольца; 4 — бандажный цилиндр

ные стали повышенной прочности, антифрикционные покрытия поверхности ротора, аморфные и наноструктурированные металлические сплавы для сердечника статора, наноструктурные высокоэнергетические постоянные магниты из сплава Nd-Fe-B с улучшенными параметрами.

На основе численного моделирования базовых электрических машин разработаны требования к характеристикам новых материалов, применение которых позволит существенно улучшить как энергетические, так и массогабаритные показатели высокоскоростных турбогенераторов.

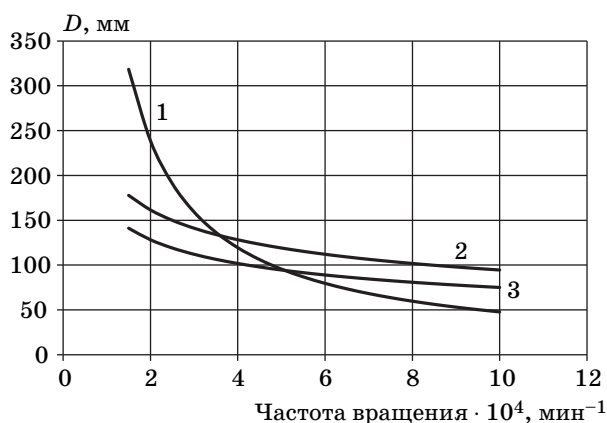
Материалы и сплавы повышенной прочности для ротора

Быстроходный мини-турбогенератор для передвижных электростанций мощностью 100–200 кВт на основе высокоскоростных (до 100 000 мин⁻¹) газовых турбин, безусловно, обладает малыми размерами и массой и привлекателен для широкого круга автономных потребителей, однако для его создания потребуются решить ряд принципиальных проблем, требующих разработки новых материалов. Первостепенной является задача обеспечения прочности ротора. Можно полагать, что для обычно применяемых материалов предельно допустимая окружная скорость на поверхности ротора лежит в пределах 250–300 м/с. Характер ограничения на величину допустимого диаметра ротора с этих позиций показан на рис. 2 для окружной скорости ротора 250 м/с (кривая 1).

С другой стороны, для реализации заданной номинальной кажущейся мощности $S_n = P_n \cos\varphi_n$ необходим диаметр ротора

$$D_1 = \sqrt[3]{\frac{C_A S_n}{\lambda n}},$$

где C_A — машинная постоянная Арнольда, мм³ × мин⁻¹/В·А; P_n — номинальная мощность, кВт;



■ **Рис. 2.** Зависимость допустимого диаметра ротора от частоты вращения

$\cos\varphi_n$ — коэффициент мощности в номинальном режиме; λ — отношение расчетной длины сердечника статора к диаметру; n — частота вращения вала, мин⁻¹.

Машинная постоянная Арнольда определяется электромагнитными нагрузками — максимальным значением индукции в воздушном зазоре B_δ и линейной нагрузкой обмотки статора:

$$A_1: C_A = 6,1 \cdot 10^7 / A_1 B_\delta \alpha' K_\phi K_{об1},$$

где α' — расчетное отношение среднего значения индукции в воздушном зазоре к ее максимальному значению; K_ϕ — коэффициент формы кривой поля, представляющий отношение действующего значения ЭДС к среднему; $K_{об1}$ — коэффициент обмотки статора основной гармонической ЭДС.

Зависимость линейной нагрузки обмотки статора от диаметра определяется опытом современного электромашиностроения, значения магнитной индукции в зазоре для высокоскоростных машин должны быть приняты меньше обычно используемых в целях ограничения потерь в стали при высокой частоте перемагничивания. Полагая $K_\phi = 1,11$, $\alpha' = 2/\pi$, $\lambda = 2$, $A_1 = 300$ А/см, $B_\delta = 0,5$ Тл, получим представленные на рис. 2 зависимости требуемого диаметра ротора для мощности генератора 100 (кривая 2) и 200 кВт (кривая 3) от номинальной частоты вращения. Зависимости рис. 2 свидетельствуют о том, что при мощности генератора 100–200 кВт для частот вращения свыше 50 000 мин⁻¹ возникнут проблемы, связанные с механической прочностью ротора.

Рассмотрим эти проблемы более детально на примере проектирования мини-турбогенераторов с возбуждением от постоянных магнитов мощностью 100 и 200 кВт при частотах вращения 30 000–100 000 мин⁻¹. При расчетах для принятых значений $\lambda = 2$ и $\alpha' = 0,67$ определены и представлены в табл. 4 необходимые для реализации заданной мощности высота магнита H и толщина бандажного кольца h . Используя решение задачи Лямэ теории упругости, применяя принцип Даламбера и ориентируясь на средние тангенциаль-

■ **Таблица 4.** Механическая напряженность бандажного цилиндра при изменении мощности и частоты вращения генератора

P , кВт	n , мин ⁻¹	D_2 , мм	δ , мм	h , мм	H , мм	σ , МПа
100	30 000	98	6,0	5,0	10,0	407
100	50 000	83	6,0	5,0	8,0	694
100	100 000	62	6,0	5,0	8,5	1403
200	30 000	139	8,0	7,0	9,5	687
200	50 000	98	8,0	7,0	8,0	795
200	100 000	83	8,0	7,0	6,5	1991

ные напряжения в бандажном цилиндре (как допустимые), можно получить следующее неравенство в качестве критерия прочности:

$$[\sigma] = \sigma_t \leq \frac{1}{3} \rho \omega^2 \left\{ (R-h)^2 \left[1 - \left(1 - \frac{H}{(R-h)} \right)^3 \right] + R^2 \left[1 - \left(1 - \frac{h}{R} \right)^3 \right] \right\} \frac{R-h}{h^2},$$

где $[\sigma]$ — допустимое напряжение; σ_t — тангенциальное напряжение в бандажном цилиндре; ρ — плотность материала магнита и бандажного цилиндра; ω — угловая частота вращения ротора; R — внешний радиус ротора; h — радиальная толщина бандажного цилиндра; H — радиальная высота магнитов.

Для расчетных вариантов были определены тангенциальные напряжения в бандажном цилиндре.

Как видно из табл. 4, при мощности 100 кВт генератор может быть выполнен на основе стального или титанового бандажа на частоту вращения 30 000 мин⁻¹, поскольку допустимые значения тангенциальных напряжений для стали — 560 МПа, для титана — 490 МПа; для частот вращения 50 000 и 100 000 мин⁻¹ требуется выполнять бандажный цилиндр из композитных материалов с допустимой величиной тангенциальных напряжений 1500 МПа, например, из органика марки ОПЖА/ЭДТ-Н из органожгута Армос 600-А-НК, имеющего прочность при растяжении 2500 МПа.

При мощности 200 кВт при наличии этого материала возможно изготовление мини-турбогенератора на частоты вращения до 50 000 мин⁻¹, для частоты вращения 100 000 мин⁻¹ требуется разработка нового материала.

Более точное решение может быть получено методом конечных элементов при численном моделировании трехмерной контактной задачи теории упругости. При работе машины элементарные магниты и вставки нагружают бандажный цилиндр собственными центробежными силами. При этом возможно отсоединение подошвы системы элементов от подложки в том случае, если величины натягов недостаточны. Поэтому при окончательных расчетах необходимо решать контактную задачу теории упругости с целью определить прочность, контактные давления или возможные отрывы элементов магнитной системы друг от друга. Трехмерная контактная задача теории упругости с многочисленными контактными областями реализована методом конечных элементов на математической модели фрагмента

конструкции ротора. Внешним воздействием является инерционная нагрузка, вызванная вращением ротора. В качестве граничных условий ставится условие симметрии по всем областям, полученным в результате выделения рассматриваемого элемента симметрии. Был выполнен подробный анализ механического состояния магнитной системы роторов рассматриваемых вариантов. Все расчеты проводились для случая сопряжения магнитной системы с валом посредством горячей посадки с определенным натягом, обеспечивающим контакт элементов магнитной системы по ее радиальным поверхностям при номинальной частоте вращения генератора. Основные результаты расчета приведены в табл. 4.

Для высокоскоростного турбогенератора с постоянными магнитами основное требование к бандажному стакану ротора — это его прочность.

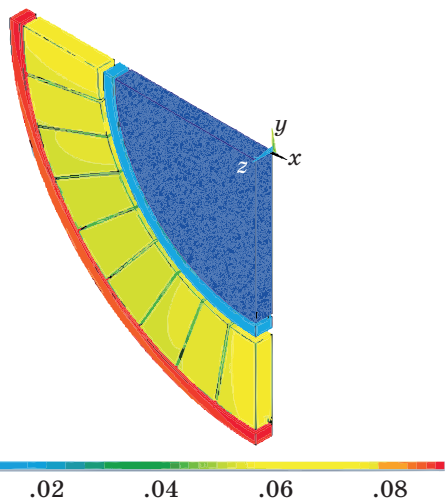
Анализ результатов моделирования методом конечных элементов контактной задачи теории упругости [5] показал принципиальную выполнимость конструкции магнитной системы ротора в случае использования в качестве материала для бандажа немагнитных сплавов с пределом прочности порядка 1600–1700 МПа. Максимально возможные натяги посадки определялись из условия захлаживания подложки с магнитами (при посадке бандажа) либо тела ротора (при посадке всей магнитной системы) до температуры жидкого азота. Для турбогенератора СПИМ-6,0-12000 результаты численного моделирования представлены на рис. 3–6.

В данном случае натяг посадки бандажного цилиндра принят 0,029 см; натяг посадки магнитной системы на тело ротора — 0,018 см.

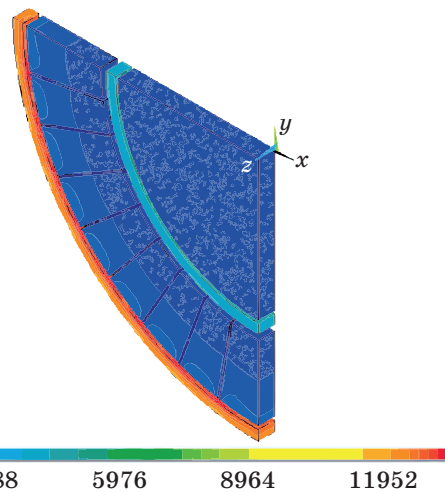
Результаты расчетов различных вариантов материала бандажного цилиндра сведены в табл. 5.

В качестве титанового сплава можно рекомендовать сплав типа ВТ8-ВТ14 или других марок с требованием после соответствующей термообработки получить состояние с пределом прочности порядка 1600–1700 МПа.

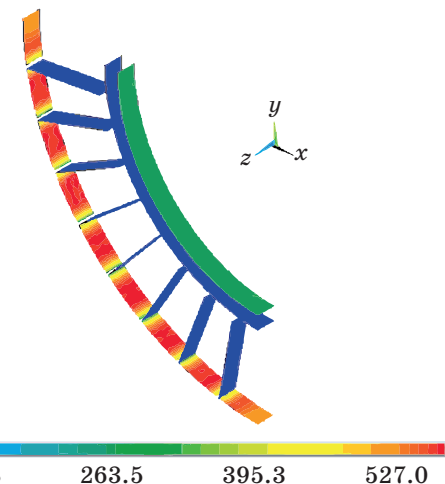
Существуют жаропрочные сплавы на никелевой основе типа ХН68ВКТЮ и ХН63МБ, а также прецизионные сплавы на кобальтовой основе типа 40КХНМ и 40КХНМВТЮ, достигавшие на образцах заданных характеристик. Однако промышленно освоенных технологий изготовления труб с упомянутыми свойствами не выявлено. По оценке ЦНИИТмаш, освоение потребует инвестиций порядка 10 млн руб. и времени 9–10 месяцев. Остается путь использования двухслойного бандажа: внутренний слой — немагнитная сталь, а внешний наматывается органопластиковым жгутом с предварительным натяжением для обеспечения контакта элементарных магнитов с магнитной подложкой. Возможности получения высокопроч-



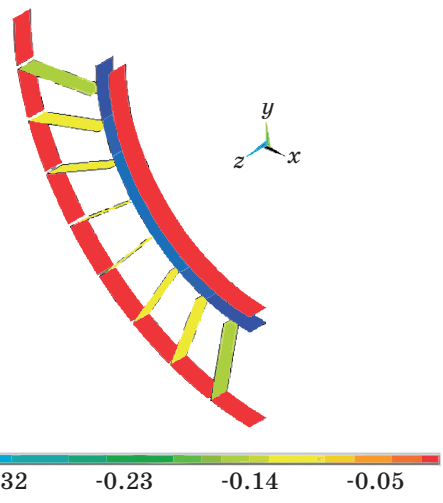
■ **Рис. 3.** Картина суммарных перемещений (см) под воздействием натяга и центробежных сил



■ **Рис. 4.** Картина напряженно-деформированного состояния ($\text{кг}/\text{см}^2$) под воздействием натяга и центробежных сил



■ **Рис. 5.** Распределение контактного давления по поверхностям сопряжения элементов ротора ($\text{кг}/\text{см}^2$) под воздействием натяга и центробежных сил



■ **Рис. 6.** Величины расчетных зазоров по поверхностям сопряжения элементов ротора (см) под воздействием натяга и центробежных сил

■ **Таблица 5.** Расчетные данные для различного материала бандажа

Материал бандажа	Максимальная величина		
	напряжения от натяга, σ_0 , $\text{кг}/\text{см}^2$	напряжения от натяга и действия центробежных сил, σ , $\text{кг}/\text{см}^2$	контактного давления от натяга и действия центробежных сил, Q , $\text{кг}/\text{см}^2$
Сталь	6930	13 400	590
Титан	3900	11 200	600
Органопластик	4000	9500	580

ных материалов с высоким пределом текучести связаны с осуществлением ультратонкого измельчения кристаллического зерна. Одним из самых проблемных вопросов является создание объемных наноструктурированных материалов, получение микроструктур в объеме крупного образца. Для этого методом высокоскоростной интенсивной пластической деформации создается максимально возможное число зародышей зерен и затормаживается их рост. В дополнение к различным режимам нагрева, охлаждения и деформирования стремятся измельчить зерно комбинацией различных методов. За рубежом одним из таких методов является регулирование структуры путем наложения сильного магнитного поля. По экспериментальным данным, в стали при наложении сильного магнитного поля (8–12 Тл) во время фазового превращения образуется структура с упорядоченным в направлении поля расположением кристаллических зерен. В результате применения комбинированного метода — интенсивного деформирования и сильного магнитного поля — ожидается уменьшение размера зерна до 0,8–0,5 мкм.

В Уральском институте металлов разработаны сверхпрочные стали и сплавы с прочностью до 2000–2500 МПа [6]. Разработанные способы упрочнения комбинированием процессов интенсивной пластической деформации с формированием наноструктур в прокате путем измельчения структуры зерна и упрочнения за счет плотно расположенной наноразмерной фазы при микролегировании азотом и ванадием не приводят к снижению пластичности и сопротивления хрупким, усталостным и другим разрушениям. В настоящее время по технологическим причинам невозможно изготовление цилиндра диаметром более 25 мм.

В Институте качественных сталей ЦНИИчермет им. И. П. Бардина проанализированы вопросы нанофазного легирования металлов и сплавов атомарным азотом в сочетании с нитридообразующими элементами. Нанотехнология микролегирования стали нитридными фазами может работать как самостоятельно, так и в сочетании с нанотехнологиями пластической деформации. Появилась возможность увеличить прочность стали в 3–4 раза, а также хладостойкость и коррозионную стойкость. Главное достоинство нанотехнологии микролегирования стали нитридными и карбонитридными фазами заключается в ее универсальности — она применима для выплавки любой стали и всего сортамента металлопродукции.

Антифрикционные покрытия ротора

Механические потери от трения бочки ротора о воздух в высокооборотных электромеханических преобразователях энергии стремительно возрастают с увеличением окружной скорости ротора и по величине составляют от 0,6 до 1 % полезной мощности. Для рассмотренных вариантов турбогенератора 6 МВт при частоте вращения ротора 12 000 мин⁻¹ потери трения о воздух составляют от 42 до 63 кВт. Снижение механических потерь в высокооборотных машинах может быть достигнуто применением антифрикционных высокотемпературных стеклоподобных составов. По данным материаловедческих исследований физико-химических характеристик синтезированных покрытий, перспективными являются аморфные металлические покрытия на основе железа-АМАГ-200 (FeSiB₂NbCu). Покрытие является прочным, долговечным, характеризуется низкими величинами остаточных напряжений, надежно работает при температурах до 1000 К. КПД турбогенератора с антифрикционным покрытием ротора может быть увеличен на 0,5 %. Существенное ограничение при применении этого покрытия — высокие технологические температу-

ры, не позволяющие наносить покрытие на ротор в сборе из-за температурных ограничений по размагничиванию постоянных магнитов (150 °С).

Для повышения показателей эффективности высокоскоростных электрических машин предложено использовать антифрикционные нанокomпозитные покрытия на ротор, снижающие как механические потери, так и нагрев ротора, технология синтеза которых не требует температуры выше 100 °С.

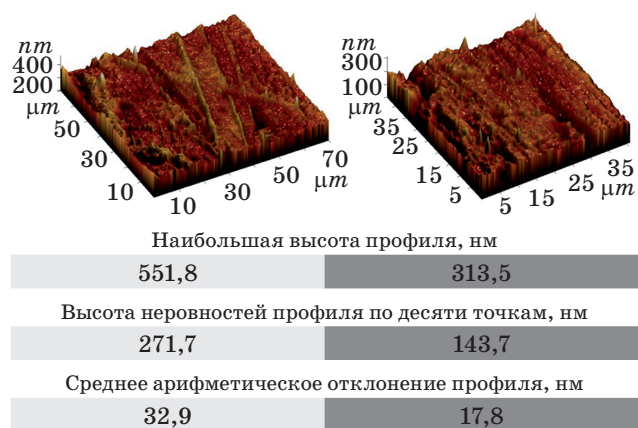
В ИХС РАН синтезированы и исследованы:

- органосиликатные покрытия на основе кремнийорганических полимеров — полидиметилфенилфиллоксана, модифицированного органическим полиэфиром. В качестве наполнителей применены хризотилловый асбест, слюда мусковит, алюмоборосиликатное стекло, диоксид циркония. Использовались различные технологии изготовления покрытий, режимы термической обработки и сушки, методы их нанесения, варьировалось количество слоев покрытий;

- специальные покрытия на ротор на основе органо-неорганических эпоксисилоксановых и эпоксититанатных золь-гель композиций на базе аналога — атмосферостойкого защитного покрытия.

Исследовано также покрытие поверхности ротора фторсодержащими поверхностно-активными веществами (фтортензидами или фтор-ПАВ) путем нанесения состава «Валкон» [7].

Изучены физико-химические свойства синтезированных покрытий: морфология поверхности и гидрофобность. По результатам исследований методом атомно-силовой микроскопии выявлено, что при использовании покрытий шероховатость необработанной поверхности образца улучшается на 1–2 класса (рис. 7). Исследования свойств гидрофобности методом «сидячей капли» показали, что покрытия на основе эпоксититанатного золя (ЭТ1) имеют значение краевого угла смачивания ~88–91°. Введение в золь фторсодержащего полимера позволяет повысить гидрофобность по-



■ Рис. 7. Характеристики поверхностей трения



■ Рис. 8. Ротор модельного мини-турбогенератора с органосиликатным покрытием и мини-турбогенератор на испытательном стенде

крытия и увеличить значение краевого угла смачивания до $\sim 150^\circ$ (ЭТ2).

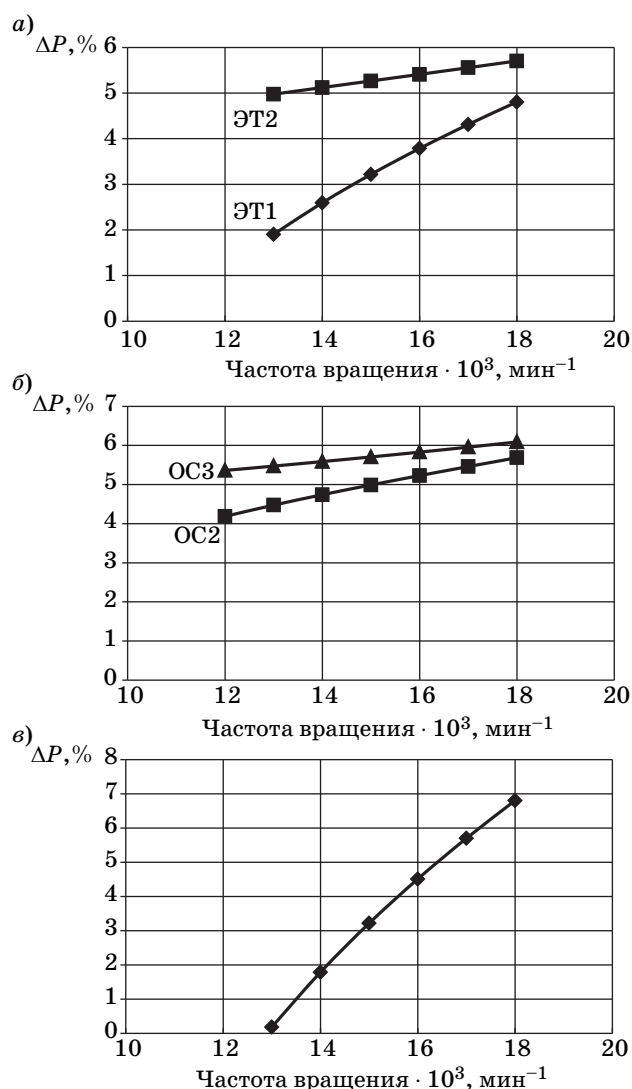
В результате физического моделирования на модельной машине (рис. 8) высокооборотного мини-турбогенератора СГПМ-1,2-18000 [8, 9] определены потери холостого хода в зависимости от частоты вращения, в том числе аэродинамические потери трения ротора о воздух, и проведены исследования влияния антифрикционных покрытий, нанесенных на поверхность ротора, на снижение уровня механических потерь синхронных машин повышенных частот вращения. Исследуемый диапазон частот вращения $9000\text{--}18\,000\text{ мин}^{-1}$.

Результаты определения среднего снижения потерь трения ротора с органосиликатными и эпоксититанатными покрытиями и после обработки для ротора с «Валконом» показаны на рис. 9, а–в.

Высокое значение общего уровня потерь и незначительная величина их снижения увеличивают вероятную погрешность результатов измерений.

Эффект уменьшения потерь трения в диапазоне окружных скоростей ротора $17\text{--}42\text{ м/с}$ в случае применения органосиликатных и эпоксититанатных покрытий составил $5\text{--}6\%$. Исследование обработанной поверхности непокрытого ротора «Валконом» показало резкое изменение снижения потерь в исследуемом диапазоне окружных скоростей ротора: ниже 30 м/с проявляется эффект увеличения потерь. Обработка эпоксититанатного покрытия фтортензидами эффекта уменьшения потерь не дала.

Большие перспективы открывает полученный в американской лаборатории Эймса (*Department of Energy Ames Laboratory*) материал ВАМ, более



■ Рис. 9. Экспериментальные результаты снижения уровня потерь трения: а — органосиликатные покрытия; б — эпоксититанатные покрытия; в — «Валкон»

скользкий, чем тефлон, и при этом почти такой же твердый, как алмаз. ВАМ представляет собой комбинацию металлических сплавов бора, алюминия и магния (AlMgB_{14}) с боридом титана (TiB_2) [10]. ВАМ уступает по твердости лишь алмазу и нитриду бора с кубической решеткой, при этом демонстрируя удивительно низкий коэффициент трения — $0,02$ (у тефлона он равен $0,05\text{--}0,1$, а у хорошо смазанной стали — $0,16$). Дальнейшие планы исследований влияния антифрикционных покрытий на величину механических потерь будут направлены на разработку отечественного аналога американского материала ВАМ — неорганического покрытия на основе высокодисперсного алюминия, содержащего легирующие добавки (магний, бор) и нанодисперсный диборид титана.

Материалы магнитопровода статора

В проекте высокооборотного турбогенератора мощностью 6,0 МВт на частоту вращения 12 000 мин⁻¹ для децентрализованной энергетики в связи с высокой частотой перемагничивания (200 Гц) для сердечника статора в расчетах для снижения потерь принята сталь электротехническая горячекатаная тонколистовая марки 1521 толщиной 0,2 мм. Дальнейшее снижение потерь сердечника статора возможно при переходе на аморфные металлические сплавы. Лента из аморфных и нанокристаллических сплавов изготавливается на уникальном высокоточном оборудовании из расплава методом формирования и литья плоской струи металлического расплава на кобальтовой или железной основе заданного химического состава на поверхность охлаждаемого диска, движущуюся с линейной скоростью от 20 до 30 м/с, и быстрого затвердевания (со скоростью ~106 °С/с) плоской струи расплава (*planar*

flow casting). При таком процессе затвердевания расплава не успевает происходить кристаллизация металлической ленты, которая в результате имеет структуру металлического стекла.

Высокожелезистый сплав 94ЖСР-А имеет индукцию насыщения $B = 1,6$ Тл и удельные потери $P_{1,3/50} = 0,46 - 0,26$ Вт/кг, т. е. в 2–3 раза меньше, чем лучшие холоднокатаные стали.

Расчеты показывают, что применение аморфных сплавов даже для частоты перемагничивания 50 Гц может значительно повысить эффективность синхронного генератора. В табл. 6 сведены расчетные данные потерь в стали низкооборотного генератора с постоянными магнитами мощностью 500 кВт для изотропных и анизотропных, холоднокатаных и горячекатаных электротехнических сталей, а также для аморфного сплава. Улучшение КПД генератора оценивается величиной 1,0 % [11].

Появление наноструктурированных аморфных сплавов типа Finemet открывает новые возможности для повышения эффективности высоко-

■ Таблица 6. Сравнение потерь в стали синхронного генератора 500 кВт для различных материалов

Параметр	Марка стали							30КСП*
	2411		1511		3413			
Толщина листов стали, мм	0,5	0,35	0,5	0,35	0,5	0,35	0,27	0,04
Удельные потери, Вт/кг	1,6	1,35	1,55	1,35	0,8	0,6	0,5	0,1
Потери в спинке статора, кВт	1,67	1,41	1,2	1,08	0,64	0,48	0,4	0,1
Потери в зубцах статора, кВт	3,69	3,11	3,2	2,74	1,63	1,22	1,02	0,23
Потери в стали статора, кВт	5,47	4,63	4,5	3,93	2,38	1,81	1,53	0,45
Суммарные потери, кВт	22,9	22,1	22,0	21,4	19,9	19,3	19,0	17,92
КПД, %	95,6	95,8	95,8	95,9	96,2	96,3	96,3	96,5

*Аморфный сплав.

■ Таблица 7. Магнитные свойства Finemet в сравнении с обычными материалами

Материал	Толщина, мкм	B_s , Тл	B_r/B_s , %	H_c , А/м	M_r (1 кГц)·10 ³	P_{cv} , кВт·м ³	T_c , °С
Finemet:							
FT-1H	18	1,35	90	0,8	5,0	950	570
FT-1M	18	1,35	60	1,3	70,0	350	570
Высокожелезистый аморфный	25	1,56	83	2,4	5,0	2200	415
Электротехническая сталь 3% Si	50	1,90	85	6,0	2,7	8400	750
Электротехническая сталь 6,5% Si	50	1,30	63	45	1,2	5800	700

■ Таблица 8. Сравнение потерь в стали сердечника статора из различных материалов для синхронного генератора 100 кВт, 67 000 мин⁻¹

Параметр	Горячекатаная сталь 1521	Аморфная сталь ГГ440В
Толщина листов стали, мм	0,2	0,025
Удельные потери, Вт/кг	$12,5 \cdot 1,7 \cdot B^2 \cdot (f/400)^2$	$1,2 \cdot 10^{-3} \cdot B^{1,6} \cdot f^{1,1}$
Потери в спинке статора, Вт	385,7	50,6
Потери в зубцах статора, кВт	43,7	11,5
Потери в стали статора, кВт	429,4	62,1
Суммарные потери, кВт	1281,7	587,7
КПД, %	0,987	0,994

коскоростных электромеханических преобразователей энергии. Сравнение характеристик наноструктурированного сплава Finemet с электротехнической сталью дано в табл. 7.

Применение отечественного аморфного сплава производства «Гаммамед» [12] для сердечника статора высокоскоростного мини-турбогенератора 100 кВт, 67 000 мин⁻¹ уменьшает потери в стали почти в 7 раз и увеличивает КПД на 1,3 %. Расчеты представлены в табл. 8.

Повышение параметров постоянных магнитов

Отечественной промышленностью выпускаются спеченные постоянные магниты из сплавов Nd-Fe-B с максимальным энергетическим произведением $(BH)_{\max} = 280 - 320$ кДж/м³, в то время как ведущие фирмы Японии, Китая и Германии уже более 15 лет поставляют на рынок такие магниты с $(BH)_{\max} \geq 400$ кДж/м³. При проектировании опытных образцов турбогенераторов с постоянными магнитами нами использованы редкоземельные постоянные магниты Nd-Fe-B, обладающие остаточной магнитной индукцией на уровне 1,14 Тл, коэрцитивной силой по индукции порядка 900 кА/м, коэрцитивной силой по намагниченности в диапазоне 900÷1750 кА/м, максимальным энергетическим произведением 250 кДж/м³.

Проблема недостаточно высокого уровня свойств спеченных магнитов Nd-Fe-B, изготавливаемых российскими предприятиями, заключается в несовершенной технологии их производства. Основным недостатком используемых технологий является загрязнение химически активных порошков кислородом, влагой и углеродом на стадии их измельчения с последующим образованием оксидов, гидроокислов и карбидов неодима при спекании. С использованием специализированного оборудования на ФГУП «Уральский электромеханический завод» реализован проект по разработке прогрессивного низкокислородного технологического процесса [13]. Оптимизация технологических параметров на каждом этапе процесса позволила реализовать высокоэнергоемкие магниты со следующими свойствами: $B_r \geq 1,41$ Тл; $H_c \geq 715$ кА/м; $(BH)_{\max} \geq 400$ кДж/м³ и рабочей температурой $T \geq 80$ °С, а также высококоэрцитивные магниты с $B_r \geq 1,25$ Тл; $H_c \geq 1990$ кА/м; $(BH)_{\max} \geq 300$ кДж/м³ и $T \geq 160$ °С. Содержание кислорода в этих магнитах не превышает 0,2 вес. %, а степень текстуры составляет не менее 95 %. Свойства полученных магнитов соответствуют мировому уровню, а их значения максимального энергетического произведения на 25 % превышают характеристики лучших отечественных промышленных аналогов.

Нами рассматривалась возможность повышения энергетических характеристик постоянных магнитов за счет нанесения клевого слоя с наночастицами железа. Синтез наночастиц железа происходит в среде инертного газа, и для защиты от агрегации и роста частиц необходима связующая матрица. Характеристики намагниченности клевого состава указывают на улучшение магнитных свойств, однако применение клевого слоя на поверхности постоянного магнита типа Nd-Fe-B практически не повлияло на кривую намагниченности постоянного магнита и не может быть признано эффективным способом повышения энергетических характеристик магнитов.

В настоящее время проблемы повышения коэрцитивной силы Nd-Fe-B связаны с легированием сплавов Nd-Fe-B алюминием, гадолинием, ванадием. Намагниченность насыщения магнитотвердой фазы Nd-Fe-B ухудшается при любом из типов легирования, поэтому допустима минимальная модификация сплава. Установлено благоприятное влияние добавки Nd-Co на величину коэрцитивной силы (рост 8 %) для магнитов, легированных 0,2 масс. % Nd-Co.

Интерес представляют исследования совершенствования магнитных свойств материалов за счет замещения части неодима (Nd) на диспрозий (Dy), увеличивающего абсолютное значение коэрцитивной силы спеченных магнитов благодаря повышению поля анизотропии магнитотвердой фазы [1].

Исследованиями ФГУП ВНИИНМ наноструктурных высокоэнергетических постоянных магнитов Nd-Fe-B установлено, что максимальная энергия магнитов достигается при размере нанокристаллитов 20–30 нм. Причем максимум имеет островыраженный характер: при размере кристаллитов в диапазоне от 15 до 40 нм максимальная энергия снижается в 4 раза.

Расчеты, выполненные при проектировании высокооборотного мини-турбогенератора 100 кВт, 67 000 мин⁻¹, показывают значительное влияние характеристик постоянных магнитов на параметры мини-турбогенератора. Изменение параметров магнита с $B_r = 1,05$ Тл, $H_c = 750$ кА на $B_r = 1,20$ Тл, $H_c = 900$ кА позволяет уменьшить высоту магнита на 20 %, активную длину на 5 %, объем магнитов на 26 %, снизить напряженность бандажного цилиндра.

Заключение

1. Для систем децентрализованной энергетики перспективным высокооборотным турбогенератором является синхронная машина с возбуждением от постоянных высококоэрцитивных магнитов нового поколения Nd-Fe-B.

2. Для повышения технико-экономических показателей высокооборотных турбогенераторов децентрализованной энергетики должны быть использованы новые, полученные с помощью нанотехнологий, материалы, в том числе немагнитные стали повышенной прочности, антифрикционные покрытия поверхности ротора, аморфные и наноструктурированные металлические сплавы для сердечника статора, наноструктурные высокоэнергетические постоянные магниты из сплава Nd-Fe-B с улучшенными параметрами.

3. Применение высокопрочных материалов для бандажного стакана ротора, таких как жаропрочные сплавы на никелевой основе типа ХН68ВКТЮ и ХН63МБ, прецизионные сплавы на кобальтовой основе типа 40КХНМ и 40КХНМВТЮ, увеличение прочности стали в 3–4 раза за счет нанотехнологии микролегирования стали нитридными фазами в сочетании с нанотехнологиями пластической деформации позволит достичь предела текучести 1600–1700 МПа и обеспечить оптимальные соотношения геометрических размеров ротора турбогенератора.

4. При переходе с электротехнической горячекатаной тонколистовой стали марки 1521 толщиной 0,2 мм на аморфные и нанокристаллические сплавы (94ЖСР-А, 5БСДР, Finemet, Nanoglass, Vitroperm) возможно снижение потерь в сердечнике статора в 2–3 раза.

5. По результатам наших исследований потери на трение бочки ротора о воздух составляют 0,6–1,0 % полезной мощности турбогенератора, так как они пропорциональны частоте вращения в третьей степени. Снижение механических потерь в высокооборотных машинах может быть достигнуто благодаря применению антифрикционных покрытий.

6. Наноструктурирование высокоэнергетических постоянных магнитов Nd-Fe-B позволяет при размере нанокристаллитов 20–30 нм достичь в 4 раза большей максимальной энергии.

7. Нанотехнологии способны обеспечить создание высокооборотных турбогенераторов для децентрализованной энергетики, обладающих высокими технико-экономическими параметрами.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-08-00287_а.

Литература

1. **Перспективный турбогенератор для децентрализованной (локальной) энергетики** / Я. Б. Данилевич, В. А. Жабров, В. Н. Антипов, И. Ю. Кручинина, Ю. Ф. Хозиков, А. В. Иванова // Изв. РАН. Энергетика. 2009. № 4. С. 89–97.
2. <http://www.r-gaz.ru/capstone.html> (дата обращения: 17.02.2012).
3. <http://www.r-gaz.ru/elliott.html> (дата обращения: 20.02.2012).
4. **Патент на изобретение № 2320064. Ротор синхронной электрической машины** / Данилевич Я. Б., Антипов В. Н., Грозов А. Д.; Заявл. 05.10.2006; Опубл. 20.03.2008, Бюл. № 8. 1 с.
5. **Данилевич Я. Б., Антипов В. Н., Кручинина И. Ю., Хозиков Ю. Ф.** Турбогенераторы малой мощности для децентрализованных систем энергообеспечения: учеб. пособие. — СПб.: Наука, 2009. — 102 с.
6. **Панфилова Л. М., Смирнов Л. А.** Конструкционные в наноструктурном состоянии микролигированные стали будущего // Материалы второго Всерос. совещания ученых, инженеров и производителей в области нанотехнологий. Москва, 15 мая 2008 г. СПб.: Лемма, 2008. С. 58–59.
7. **Агошков О. Г.** Современные энерго- и ресурсосберегающие технологии. Общая характеристика фтортезидов: препринт / БГТУ «Военмех» им. Д. Ф. Устинова; ООО «Консалтинг новые технологии». — СПб., 2008. — 4 с.
8. **Данилевич Я. Б., Антипов В. Н., Кручинина И. Ю.** и др. Перспективные электромеханические преобразователи энергии на основе новых материалов и покрытий // Электротехника. 2010. № 9. С. 2–9.
9. **Данилевич Я. Б., Антипов В. Н., Кручинина И. Ю., Московская В. В.** Органосиликатные покрытия быстроходного ротора турбогенератора // Тр. XXI Всерос. совещания по температуроустойчивым функциональным покрытиям. СПб., 26–28 апреля 2010 г. С. 22–23.
10. **Камчатский Т.** Сверхскользящий материал // Энергетика и промышленность России. 2009. № 01–02 (117–118): новые технологии.
11. **Данилевич Я. Б., Антипов В. Н., Штайнле Л. Ю.** Гидрогенератор с возбуждением от постоянных магнитов // Энергетика. 2010. № 2. С. 5–7.
12. <http://www.gammamet.ru/ru/gm440b.htm> (дата обращения: 20.02.2012).
13. **Попов А. Г.** и др. Низкоскоростная технология получения высокоэнергоемких постоянных магнитов на основе сплавов Nd-Fe-B // Научное наследие академика С. В. Вонсовского: тез. докл. междунар. конф., Россия, Екатеринбург, 15 октября 2010 г. С. 53.

УДК 621.311

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА ОПЕРАТИВНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ ЕВРОПЕЙСКОГО ОПЕРАТОРА ПЕРЕДАЮЩЕЙ СЕТИ

Д. В. Чубраев,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В современной фирме-операторе передающей сети в условиях развития рынка и широкого внедрения возобновляемой энергетики одними из основных стали процессы оперативного планирования нового поколения. В статье описывается развитие концепции реализации и автоматизации процессов оперативного планирования на фирме Swissgrid, являющейся системным оператором швейцарской передающей сети и координатором энергетического блока «Юг» европейской объединенной сети.

Ключевые слова — оперативное планирование, система планирования, оператор передающей сети, SCADA, EMS.

Введение

В течение многих десятилетий основной задачей организации управления энергосистемой было получение данных телеметрии в достаточном количестве и с необходимым качеством в целях определения состояния системы и обеспечения возможности управления ею. С начала 2000-х гг. вследствие введения в Европе энергетического рынка и перехода от вертикальной интеграции электроэнергетической отрасли к раздельным рыночным ролям ситуация значительно изменилась. Последовавшее за введением рынка резкое повышение международного энергообмена и, как следствие, интенсификация и существенное перераспределение транзитных энергетических потоков в системе привели к изменению режимов работы сети, в результате чего повысилась неопределенность состояния энергосистемы в ближайшем (через 15–30 мин) будущем. Ситуация дополнительно усложнилась в результате широкого распространения возобновляемых источников энергии при одновременном снижении оперативного резерва передающих мощностей с 20 % в 1990-х гг. до 5 % к 2010 г., имевшим целью повышение рентабельности энергосистемы. Эти и ряд других факторов усложнили работу диспетчеров системных операторов передающих сетей (Transmission System Operator — TSO), что, в свою очередь, привело к ряду проблем в европейской объединенной сети, вплоть до

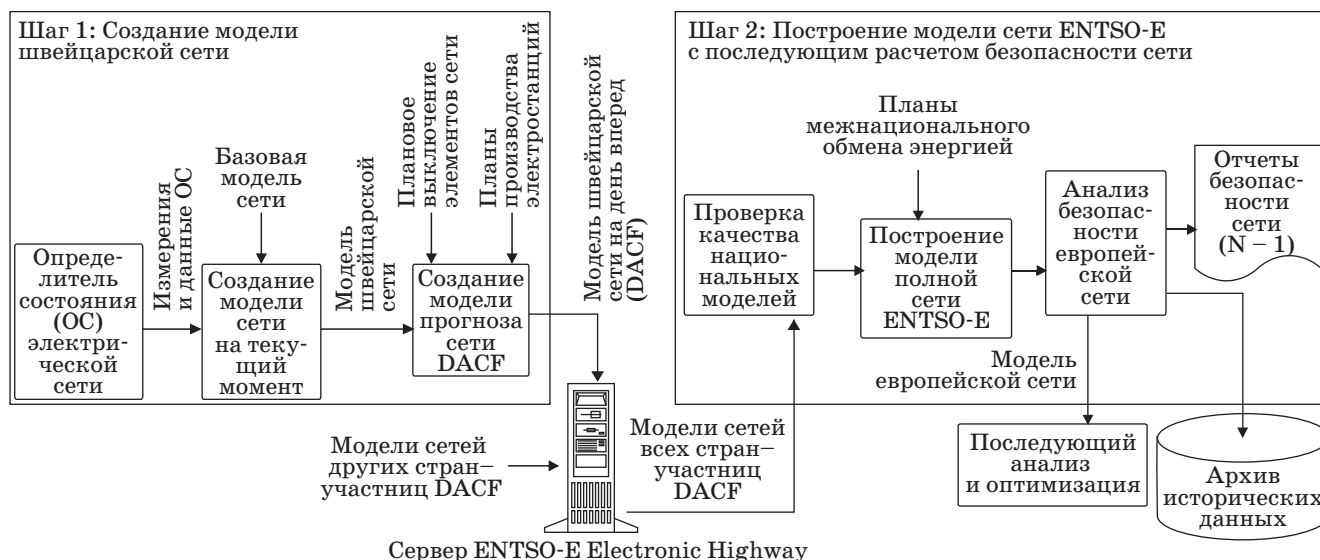
национальных и интернациональных блэкаутов в 2003–2005 гг.

Начиная с этого времени новым неотъемлемым элементом управления энергосистемой становится оперативное планирование. Его задачей является сбор и анализ всей доступной информации о предполагаемом состоянии сети в будущем. Результаты анализа передаются диспетчеру, чтобы подготовить его не только к возможным проблемам в течение смены, но и к своевременному принятию мер по устранению ожидаемых проблем (например, вводу ограничений на производство энергии в определенных регионах еще за день до события).

Первые решения для оперативного планирования строились, аналогично системам управления, на национальном принципе, однако скоро стало понятно, что международный характер процессов в объединенной энергосистеме требует новых подходов, основанных на международной кооперации.

Первым шагом в направлении международного европейского сотрудничества в области оперативного планирования стала разработка и внедрение в начале 2000-х гг. процесса предсказания перегрузок сети на день вперед (Day-Ahead Congestion Forecast — DACF) [1] (рис. 1).

Дальнейшая активизация деятельности участников рынка и введение в эксплуатацию все большего объема источников возобновляемой энергии (в первую очередь, ветроэнергетических устано-



■ **Рис. 1.** Схема реализации фирмой Swissgrid европейского процесса планирования безопасности на день вперед (ENTSO-E DACF). © Swissgrid, 2005–2012

вок на северном побережье Германии и Голландии и западном побережье Испании) привели к повышению непредсказуемости изменений энергопотоков, что, в свою очередь, в сочетании с не отвечающими более современным требованиям приложениями оперативного планирования у ряда системных операторов сыграло существенную роль в возникновении и распространении блэкаута европейской континентальной сети 4 ноября 2006 г.

Начиная с этого момента вопрос оперативного планирования стал не только технической задачей, стоящей перед системными операторами передающих сетей и поставщиками соответствующего программного обеспечения, но и политическим вопросом, взятым под контроль комиссией Евросоюза.

Системный оператор швейцарской высоковольтной передающей сети фирма Swissgrid, являясь пионером в области организации и автоматизации процессов DACF [2–4], пользуется заслуженным авторитетом в вопросах разработки систем оперативного планирования. За время, прошедшее с момента ввода на фирме в эксплуатацию первой в Европе полностью автоматизированной системы моделирования и анализа сети согласно требованиям процесса DACF, был накоплен богатый опыт, легший в основу концепции системы оперативного планирования нового поколения, которая и рассматривается в данной статье.

Общеввропейская ситуация

За 8 лет, прошедших после ввода в оперативную эксплуатацию системы предсказания перегрузок DACF, европейская объединенная сеть

претерпела существенные изменения: проведена оптимизация процессов DACF; сформированы требования к качеству моделей; увеличено до шести количество временных пунктов, для которых системные операторы обязаны поставлять модели; принято решение о переходе на новый формат описания модели сети CIM-XML и др.

За эти годы организация UCTE (Union for the Coordination of Transmission of Electricity) была преобразована в ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity), объединяющую не только операторов синхронной сети континентальной Европы, но и операторов скандинавских сетей, сетей стран Балтии, а также операторов Великобритании и Ирландии.

В декабре 2008 г. подгруппой ENTSO-E, объединяющей TSO Центральной и Восточной Европы (Central and Eastern Europe — CEE), был образован Союз безопасности системных операторов (TSO Security Cooperation — TSC), поставивший своей целью разработку новых эффективных процессов предсказания перегрузок в сети и создание соответствующей информационной системы нового поколения. Основное внимание при этом было уделено разработке и внедрению концепции коллективной безопасности, повышающей ответственность каждого члена Союза. Согласно этой концепции разработан децентрализованный процесс с ротацией роли оператора между участниками процесса, для поддержки которого была спроектирована и создана распределенная система моделирования и анализа европейской передающей сети (Common Tool for Data Exchange and Security Assessment — CTDS). Многие из наработок фирмы Swissgrid, полученных

в процессе создания системы анализа безопасности сети, были использованы при написании спецификации системы CTDS и во время ее реализации.

Основной целью системы CTDS является возможность совместного анализа и оптимизации европейской сети всеми участниками Союза. При анализе используются модели DACF всех стран континентальной Европы, при этом страны — участницы союза TSC поставляют модели повышенного качества.

Процессы CTDS, являясь дальнейшим развитием процессов ENTSO-E DACF, концентрируются на «склейке» (merging) единой модели континентальной европейской сети, оставляя отдельных системных операторов свободными в выборе средств и процессов моделирования национальных сетей. Кроме того, TSO Западной Европы не участвуют напрямую в процессе TSC и, таким образом, потенциал процесса не реализуется в полной мере.

Напротив, TSO Центральной и Западной Европы (Central and Western Europe — CWE) создали свой подход к обеспечению безопасности сети, основанный на централистском подходе. Технические решения CWE характеризуются большей простотой (используется традиционная система управления и анализа сети SCADA/EMS), что упрощает реализацию, но оставляет открытым вопрос ответственности за принятие мер, лежащих, как и прежде, на национальных системных операторах.

Поскольку системообразующая сеть континентальной Европы физически не разделена на западную и восточную, разделение процессов безопасности требует некоего единого базиса, которым и является до настоящего времени процесс ENTSO-E DACF, уже не во всем отвечающий потребностям операторов европейской сети и возможностям современных ИТ-систем и ограничивающий обе европейские инициативы регионов CEE и CWE. В частности, следует упомянуть существенные ограничения используемого при обмене моделями формата описания сети DEF 2.0.

Для решения возникающих проблем на общеевропейском уровне производится ряд действий, имеющих цель, с одной стороны, улучшить базовый процесс DACF (в частности, переход на международный стандарт моделирования сети CIM (Common Information Model) и производный от него формат обмена данными CIM-XML), а с другой — создать на базе процессов CEE и CWE единый европейский процесс, обладающий достоинствами обоих решений.

Таким образом, на настоящий момент ситуация в области европейского оперативного планирования весьма сложная и неоднозначная, ха-

рактеризующаяся существованием нескольких систем и форматов моделирования сети, несколькими параллельными идущими проектами и многими параллельными инициативами с лоббированием рядом фирм национальных политических интересов.

В этой ситуации сложность представляет как выбор правильной стратегии при определении процессов оперативного планирования, так и разработка требований к соответствующей информационной системе. Очевидным является требование высокой гибкости новой системы с целью обеспечить осуществление любых реалистичных сценариев развития в соответствии с политикой безопасности Евросети.

Состояние систем планирования на фирме Swissgrid

Основоположник европейской объединенной энергосистемы (первое международное соединение 220 кВ в 1958 г., так называемая «Звезда Лауфенбурга»), фирма Swissgrid играет ведущую роль во всех европейских инициативах. Так, она является участником CEE TSC и, соответственно, активно участвует в разработке, внедрении и дальнейшем развитии системы CTDS и связанных с ней процессов.

Находясь в центре Европы, швейцарская сеть существенно зависит от транзитных потоков, являющихся результатом европейских энерготоргов, что повышает роль процессов оперативного планирования и выдвигает особенно высокие требования к системе оперативного планирования самой фирмы.

Фирма Swissgrid разработала первую в Европе полностью автоматизированную систему планирования на день вперед, поэтому обладает богатыми наработками в этой области, пользующимися неизменным интересом со стороны европейских операторов. Система успешно эксплуатируется и интегрирована в ИТ-инфраструктуру фирмы. Персонал обучен работе с использованными в системе программными продуктами.

В 2005 г. были проведены практические испытания новой системы оптимизации швейцарской сети на день вперед [5], легшей в основу систем оптимизации напряжений и оптимизации нагрузки линий, используемых на фирме в настоящее время.

В 2009 г. в рамках введения энергорынка в Швейцарии персонал фирмы получил современный комплекс поддержки рынка системных услуг [6], который также является важным поставщиком данных для системы оперативного планирования (в первую очередь, данных о планировании производства и резервировании системных услуг на электростанциях).

В настоящее время на фирме проводится реализация новой системы управления сетью и системы управления энергией (SCADA/EMS). Система оперативного планирования не является частью системы управления, но должна иметь с ней ряд интерфейсов (например, передачу в систему планирования результатов измерений от системы управления и расчетов определителя состояния сети).

Требования, предъявляемые к системе

Практика показывает, что требования к современной системе оперативного планирования сети, как и к большинству программных систем, подвержены постоянной модификации. В случае рассматриваемой системы среди факторов, определяющих модификацию, можно назвать связанные с введением энергетического рынка постоянные изменения и усложнения процессов в сети, изменения внутренних структур фирм-производителей энергии, смену стандартов в области передачи информации и др.

Обсуждаемые программные комплексы активно используют численные методы решения систем дифференциальных уравнений для расчета установившихся режимов работы сети. При этом расчеты производятся для большого числа случаев в течение ограниченного времени (в особенности, в процессе оптимизационных расчетов), что выдвигает повышенные по сравнению с системами моделирования требования к эффективности вычислений и, что не менее важно, к эффективности процесса внесения пользователем системы изменений в модели.

Таким образом, основная сложность состоит в необходимости сочетания системой высокой гибкости с высокой надежностью, эффективностью и удобством пользования.

На основе исходной ситуации были сформулированы главные требования к новой информационной системе.

1. Поддержка основных концепций, сформулированных для системы анализа безопасности сети еще на ранних стадиях разработки и подтвердивших свою целесообразность [3, 4]:

а) использование наиболее актуальных данных процесса при создании моделей планирования;

б) использование наиболее полной информации о собственной сети и остальных частях европейской сети (работа с полной моделью европейской сети);

в) создание на всех этапах планирования консистентных моделей в стандартном промышленном формате (например, PSSE RAW);

г) использование максимально достижимого качества расчета (полный анализ сети в режиме

переменного тока с использованием пределов реактивной мощности, полный расчет безопасности $N - 1$ для всех элементов швейцарской сети и окружающей ее зоны, расчет каскадных отключений, расчет сценариев $N - k$, анализ угла защиты повторного включения линии и т. д.);

д) использование единого ядра для производства анализа на всех ступенях расчета;

е) использование только продуктов, доступных на рынке программного обеспечения (полный отказ от разработки базовых продуктов).

2. Обеспечение гибкости при необходимости изменения параметров расчетных алгоритмов.

3. Обеспечение гибкости при необходимости изменения логики или временных параметров бизнес-процесса.

4. Обеспечение выполнения операций как в ручном, так и в автоматическом и полуавтоматическом режиме.

5. Интеграция как с находящейся в эксплуатации, так и с новой системой управления сетью.

6. Развитый интерфейс пользователя с поддержанием ролей процесса (инженер планирования, инженер поддержки приложения, IT-специалист).

7. Реализация самомониторинга системы с возможностью оповещения персонала.

8. Обеспечение требований надежности системы.

9. Обеспечение расширяемости системы.

Кроме того, система должна отвечать требованиям современной IT-архитектуры, требованиям безопасности, требованиям масштабируемости (fit-for-purpose), поддерживать виртуальные IT-платформы и т. д.

Таким образом, в настоящее время основная сложность перемещается из области разработки функциональности системы для поддержания какого-то определенного процесса планирования в область создания гибкой, надежной и эффективной системы, которая была бы в состоянии адаптироваться к постоянно меняющимся требованиям процесса.

Бизнес-процесс оперативного планирования

Основой бизнес-процесса оперативного планирования является последовательное приближение во времени к точке, являющейся целью прогноза, с одновременным повышением качества и достоверности данных, используемых для прогноза состояния сети (рис. 2).

Существенные изменения за время эксплуатации претерпела концепция работы персонала с системой. Если в 2003 г. система DACF создавалась с учетом минимального участия инженерного персонала в процессе расчета и анализа сети

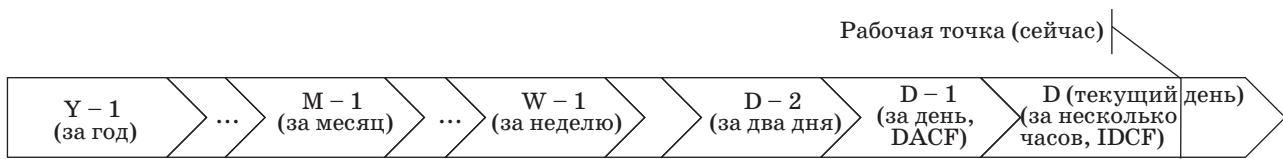


Рис. 2. Различные временные горизонты процесса оперативного планирования

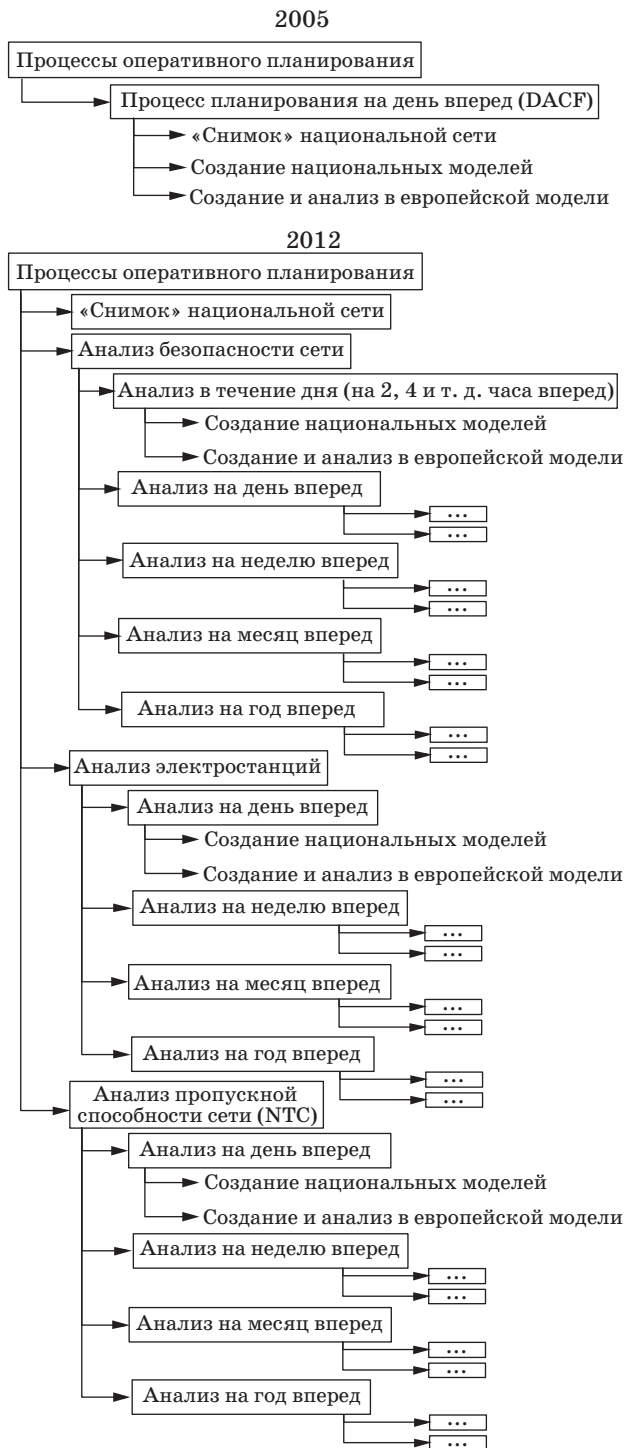


Рис. 3. Сопоставление процессов оперативного планирования на фирме Swissgrid в 2005 и 2012 гг. © Swissgrid, 2012

при обеспечении системой хорошего качества результата, то к настоящему времени ситуация кардинально изменилась: теперь ожидается получение отличного результата моделирования при интенсивном вовлечении инженера в процесс планирования при условии поддержки его высокоинтегрированными средствами автоматизации.

Объясняется это резким ростом роли оперативного планирования, сопровождаемого, в частности, ростом числа инженеров планирования сети с двух в 2003 г. до более двадцати к 2012 г., из которых восемь занимаются исключительно задачами оперативного планирования. При этом многократно выросло как число процессов планирования, так и их сложность (рис. 3).

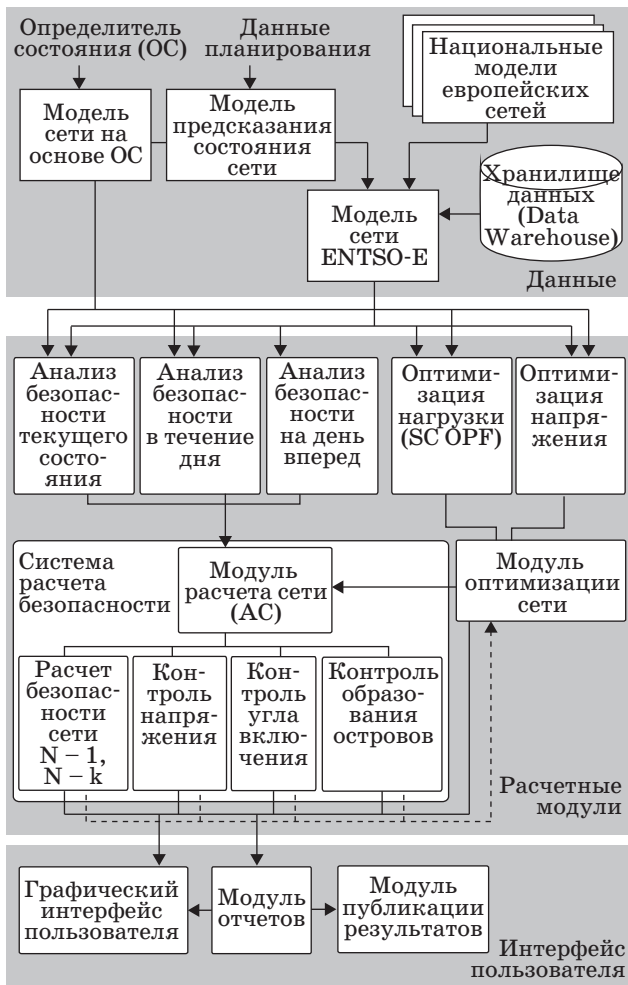
Общее техническое решение

Разработанное решение сочетает хорошо зарекомендовавшие себя элементы дизайна существующей системы с полностью новым дизайном бизнес-логики и IT-дизайном.

Общая концепция системы основывается на принципах [2, 3], определенных при разработке системы DACF. Основой подхода является использование в процессе планирования моделей, созданных на базе данных реального времени, получаемых из системы SCADA/EMS, и использование для анализа сети во всех процессах расчетного модуля одного типа и (где возможно) одной конфигурации (рис. 4).

Еще на этапе разработки системы DACF в 2003 г. было решено использовать базу системы моделирования и анализа сети только из числа стандартных продуктов, представленных на рынке как для того, чтобы иметь в распоряжении наиболее полно протестированные программы, так и для того, чтобы пользоваться усовершенствованиями, вносимыми в продукт в процессе развития. Данный подход хорошо показал себя за все время эксплуатации системы, хотя и создает некоторые ограничения при внесении изменений в базовый продукт.

Требования независимости системы от одного поставщика приводят к необходимости модульного дизайна. Данный подход хорошо согласуется с условием гибкости системы. В системе первого поколения количество модулей равнялось пяти (см. рис. 1):



■ Рис. 4. Общая структура системы оперативного планирования фирмы Swissgrid. © Swissgrid, 2005–2012

- модуль создания снимка сети;
- модуль предсказания сети на день вперед;
- модуль проверки качества европейских моделей, склейки и анализа сети;
- два модуля преобразования формата моделей.

За время эксплуатации системы стало очевидно, что такой дизайн недостаточен для покрытия все возрастающих требований процессов оперативного планирования. Кроме того, наличие значительного по количеству и сходного (но не идентичного) по содержанию числа процессов (см. рис. 3) выдвинуло новые по сравнению с 2003 г. требования к дизайну системы.

Проведенный при разработке концепции новой системы анализ показал, что все существующие и ожидаемые в ближайшее время процессы автоматизированного анализа сети могут быть созданы на базе 18 основных модулей, ответственных, например, за создание базовой модели сети, изменение топологии сети, изменение рабо-



■ Рис. 5. Модульное построение процесса на примере создания модели предсказания состояния сети. © Swissgrid, 2005–2012

чих точек генераторов, балансировку сети, анализ безопасности сети, создание отчетов и др.

На рис. 5 изображен процесс создания прогноза сети на день вперед. В исходном дизайне 2003 г. это был один модуль, в новом дизайне для реализации процесса используются семь модулей в разной комбинации и конфигурации и при моделировании других процессов планирования.

Основное отличие модулей от функций встроенной автоматизации базовой системы заключается в возможности контролировать модули с помощью внешней системы автоматизации процесса (work flow automation system).

Модульное построение системы налагает также особые требования на межмодульные интерфейсы, так как именно они в дальнейшем будут определять возможности расширения системы и простоту замены ее отдельных частей. Обмен информацией между отдельными модулями может производиться только согласно утвержден-

ным заказчиком интерфейсам. Использование скрытых или недокументированных интерфейсов между модулями нарушит принципы взаимозаменяемости и свободной комбинации модулей системы.

Архитектура IT-системы

Существующая система, решение для замены которой рассматривается в данной статье, является результатом эволюционного развития. При этом каждый новый процесс добавлялся к уже созданным в зависимости от финансовой целесообразности и из соображений минимальных затрат на реализацию. С широким внедрением в последние несколько лет технологий виртуализации и накоплением опыта по их использованию для промышленных приложений появилась возможность пересмотреть положения исходной архитектуры рассматриваемой системы.

Основой нового дизайна послужили следующие требования информатики:

- возможность простого добавления или удаления новых процессов, которые могут иметь разных владельцев со стороны бизнеса и, соответственно, должны минимально интерферировать друг с другом;

- обеспечение финансовой прозрачности используемых решений (стоимость аппаратного и программного обеспечения, поддержка со стороны поставщика и собственных IT-специалистов и т. д.);

- обеспечение оптимальной модели лицензирования используемых программных продуктов (сочетание максимальной гибкости с минимальной стоимостью лицензий);

- обеспечение высокой надежности работы системы;

- обеспечение требований поддерживаемости системы (стандартизация используемых продуктов и их конфигураций);

- обеспечение требований безопасности;
- обеспечение гибкой организации производственного процесса с возможностью перераспределения ролей инженеров и операторов как внутри групп, так и между группами и отделами.

В результате проведенного анализа была принята следующая архитектура системы:

- IT-система состоит из унифицированных редундантных «спарок», представляющих собой пары виртуальных серверов с идентичной конфигурацией (включая идентичные бизнес-приложения);

- лицензирование всех используемых продуктов производится с пары серверов лицензий;

- управление процессами и обмен данными внутри системы организован с использованием

системы управления рабочими потоками (workflows);

- доступ ко всем данным и процессам с любых рабочих мест возможен, но контролируется с помощью системы безопасности доступа к данным.

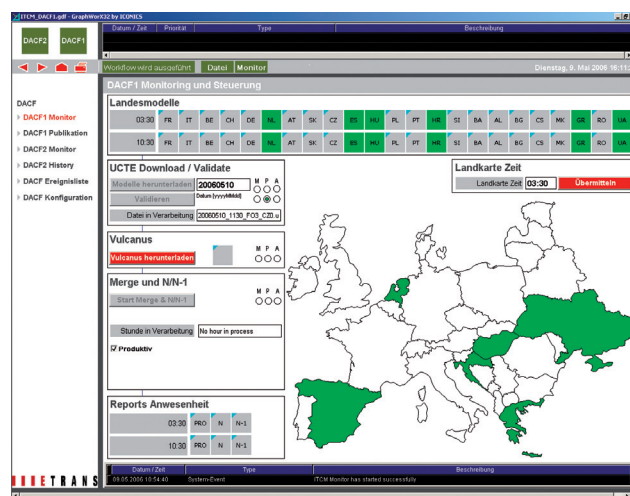
Интерфейс пользователя

Как было отмечено выше, за последние годы выросли как сложность процесса, так и требования к повышению эффективности работы инженеров планирования. Соответственно, существенно изменилась роль пользователя в процессе работы с системой и, как следствие, требования к интерфейсу пользователя системы.

От системы первого поколения (2003–2006 гг.) ожидалось полностью автоматическое выполнение процесса, требования к интерфейсу пользователя были ограничены отчетами системы о результатах расчета сети и интерфейсом инженера-программиста, ответственного за рабочие потоки.

В системе второго поколения (2006–2012 гг.) существенно выросла роль инженера планирования, который на начальном этапе (2006–2009 гг.) в основном отвечал за контроль входящих данных от международных участников процесса, своевременный запуск автоматических процедур расчета, анализ результатов и принятие мер по обеспечению безопасности сети. Соответственно, системе потребовался развитый интерфейс отображения состояния и данных процесса. Для решения этой задачи была разработана концепция мониторинга данных с учетом временных границ соответствующих шагов процесса (рис. 6).

На следующем этапе (2009–2012 гг.) оперативное планирование было выделено в отдельную ор-



■ **Рис. 6.** Пример интерфейса пользователя системы оперативного планирования фирмы Swissgrid в 2007 г. © Swissgrid, 2007–2012



■ **Рис. 7.** Примеры интерфейса пользователя системы оперативного планирования фирмы Swissgrid. © Swissgrid, 2005–2012

ганизационную структуру, которой требовались более развитые инструменты планирования. На этом этапе началась интеграция системы мониторинга и управления процессом с системой моделирования и расчета сети. Кроме того, была повышена плотность представления информации и изменена структура ее организации.

Следующим этапом является решение, разрабатываемое в рамках создания системы, рассматриваемой в данной статье, и предназначенное полностью заменить или интегрировать все используемые в настоящий момент на фирме приложения оперативного планирования. В рамках этой работы одной из основных задач станет еще более глубокая интеграция системы моделирования и анализа сети с системой автоматизации и контроля процесса моделирования (рис. 7).

Заключение

Система оперативного планирования является необходимым инструментом каждого оператора передающей сети. Рассмотренный в данной статье программный комплекс оперативного планирования является следующим шагом на пути автоматизации процесса оперативного управления сетью, его использование предполагается в течение 2013–2015 гг., после чего ему на смену должна прийти система следующего (третьего) поколения.

Отличительными чертами системы оперативного планирования третьего поколения, по оценкам специалистов фирмы Swissgrid, можно считать:

- высокую интеграцию с европейскими платформами планирования и рынка;

- встроенную поддержку унифицированной структуры данных CIM;

- встроенную возможность работы с проектами (планирование строительства новых ЛЭП, электростанций, подстанций и другого оборудования энергосистемы);

- поддержку стандартных процессов оперативного планирования с возможностью их параметризации пользователем;

- развитый графический интерфейс не только для представления сети, но и для управления процессом и визуализации результатов анализа.

Обсуждаемый в данной статье программный комплекс является одним из наиболее современных в Европе и, как и все разработки фирмы Swissgrid в этой области, пользуется большим интересом со стороны европейских операторов сети и разработчиков технических решений. Рассматриваемая система может представлять интерес и для российских специалистов, так как процессы планирования и управления в российской энергосистеме сходны с европейскими.

Литература

1. ENTSO-E Operational Planning and Scheduling Network Code (OP&S NC). www.entsoe.eu/resources/network-codes/operational-planning-scheduling (дата обращения: 30.03.2012).
2. Tchoubraev D., Singh N., Chan K. H. et al. Advanced Automated Approach for Interconnected Power System Congestion Forecast // Proc. of conf. MedPower 2004, Cyprus, 2004. С. 141–147.
3. Singh N., Tchoubraev D. Operational Security Analysis of Interconnected European Network in Liberalized Market // Proc. of conf. PowerTech 2005, St. Petersburg, Russia, 2005. P. 1–7.
4. Чубраев Д. В., Сингх Н. Программный комплекс определения перегрузок на этапе краткосрочного планирования режима эксплуатации сети // Информационно-управляющие системы. 2005. № 6. С. 23–29.
5. Emery M., Karpatchev A., Tchoubraev D. Congestion Management at ETRANS // Proc. of conf. CIGRE, New Orleans, USA, 2005. P. 370–377.
6. Чубраев Д. В. Информационный комплекс поддержки рынка системных услуг // Энергетика. 2010. № 6. С. 157–169.

УДК 517.977.58

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РЕШЕНИЙ ЛИНЕЙНО-КВАДРАТИЧНЫХ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

О. И. Костюкова,

доктор физ.-мат. наук, профессор

Институт математики Национальной академии наук Беларуси, г. Минск

Н. М. Федорцова,

главный инженер проекта

Конструкторско-технический центр Белорусской железной дороги, г. Минск

Рассматривается однопараметрическая линейно-квадратичная задача оптимального управления с особыми участками. Исследуются свойства решений данной задачи в окрестности нерегулярного параметра. Показано, что в нерегулярном случае при достаточно малых возмущениях параметра может измениться структура решения задачи. Приведены условия, позволяющие определить структуру решения задачи при возмущенном значении параметра, используя решение невозмущенной задачи.

Ключевые слова — оптимальное управление, параметрическая оптимизация, возмущенные задачи, линейно-квадратичные задачи, особые участки.

Введение

В процессе изучения многих физических, химических, экономических и других закономерностей часто возникают задачи с параметрами, решение которых позволяет исследовать соответствующий процесс в зависимости от значений параметра. В настоящее время, среди прочих, областью активных исследований являются параметрические задачи оптимального управления, интерес к которым достаточно велик со стороны промышленности.

Несмотря на большую распространенность параметрических задач, научные исследования, как правило, проводятся в регулярных случаях [1–5]. Условия нерегулярности в настоящее время мало исследованы, поскольку процесс их исследования сопряжен с трудностями, связанными с изменением структуры решения задачи (т. е. количества точек переключения и особых участков).

Цель настоящей работы — провести исследование свойств решений линейно-квадратичной задачи оптимального управления с особыми участками в окрестности нерегулярного параметра.

Постановка задачи

В классе измеримых функций $u(t)$, $t \in T = [0, t_*]$, рассмотрим семейство параметрических задач оптимального управления $OC(\alpha)$, $\alpha \in E(\alpha_0)$:

$$OC(\alpha): \begin{cases} \frac{1}{2} \int_0^{t_*} \mathbf{x}^T(t) \mathbf{D} \mathbf{x}(t) dt + \mathbf{c}^T \mathbf{x}(t_*) \rightarrow \min; \\ \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A} \mathbf{x}(t) + \mathbf{b} u(t), \quad \mathbf{x}(0) = \mathbf{x}_0(\alpha); \\ \mathbf{H} \mathbf{x}(t_*) = \mathbf{g}, \quad |u(t)| \leq 1, \quad t \in T, \end{cases} \quad (1)$$

где α — параметр семейства; $E(\alpha_0) = [\alpha_0 - \delta, \alpha_0 + \delta]$, α_0 — фиксированное число, $\delta > 0$ — достаточно малое число; $\mathbf{x} = \mathbf{x}(t)$ — n -вектор состояния; $\mathbf{D} \in R^{n \times n}$ ($\mathbf{D} = \mathbf{D}^T \geq 0$), $\mathbf{A} \in R^{n \times n}$; $\mathbf{H} \in R^{m \times n}$, $\mathbf{c} \in R^n$, $\mathbf{b} \in R^n$, $\mathbf{g} \in R^m$ — заданные матрицы и векторы; $u = u(t)$ — скалярное управление; $\mathbf{x}_0(\alpha) \in R^n$ — заданная достаточно гладкая функция параметра α ; $\mathbf{b}^T \mathbf{D} \mathbf{b} \neq 0$.

Предположение 1. Выполняются следующие условия:

$$\text{rank}(\mathbf{H} \mathbf{b}, \mathbf{H} \mathbf{A} \mathbf{b}, \dots, \mathbf{H} \mathbf{A}^{n-1} \mathbf{b}) = m,$$

$$\begin{aligned} g \in \text{int}\{z \in \mathbb{R}^m : z = Hx(t_*), \dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t), \\ x(0) = x_0(\alpha_0), |u(t)| \leq 1, t \in T\}. \end{aligned}$$

Понятие допустимого $u_\alpha(\cdot)$ и оптимального $u_\alpha^0(\cdot)$ управлений и соответствующих им траекторий $x_\alpha(\cdot)$, $x_\alpha^0(\cdot)$ при фиксированном значении параметра α вводятся стандартно [6]. Результаты из работы [7] позволяют утверждать, что задача (1) имеет решение, если существуют допустимые управления.

Требуется найти решения возмущенных задач $OC(\alpha)$, $\alpha \in E(\alpha_0)$, и описать их свойства, используя известное решение невозмущенной задачи $OC(\alpha_0)$.

Условия оптимальности. Структура и определяющие элементы

Используя результаты из работы [6], можно доказать принцип максимума.

Пусть выполняется предположение 1 и $\alpha \in E(\alpha_0)$. Тогда для оптимальности допустимых управлений $u_\alpha^0(\cdot)$ и траектории $x_\alpha^0(\cdot)$ необходимо и достаточно существование такого m -вектора $y(\alpha)$, что вдоль решения $\psi_\alpha^0(t)$, $t \in T$, сопряженной системы

$$\dot{\psi}(t) = -A^T \psi(t) + D x_\alpha^0(t), \quad \psi(t_*) = H^T y(\alpha) - c \quad (2)$$

выполняются соотношения

$$\psi_\alpha^{0T}(t) b u_\alpha^0(t) = \max_{|u| \leq 1} \psi_\alpha^{0T}(t) b u, \quad t \in T. \quad (3)$$

Рассмотрим оптимальное управление $u_\alpha^0(\cdot)$ и соответствующую ему траекторию $x_\alpha^0(\cdot)$ задачи (1), а также вектор $y(\alpha)$, удовлетворяющий (2), (3). Найдем соответствующее им решение $\psi_\alpha^0(t)$, $t \in T$, сопряженной системы (2) и построим функцию коуправления

$$\Delta_\alpha(t) = \psi_\alpha^{0T}(t) b, \quad t \in T. \quad (4)$$

В общем случае функция (4) имеет изолированные нули, а также существуют особые участки, где она обращается тождественно в нуль:

$$\Delta_\alpha(t) \equiv 0, \quad t \in [\tau_i(\alpha), \tau^i(\alpha)] \subset T, \quad \tau_i(\alpha) < \tau^i(\alpha), \quad i = \overline{1, p(\alpha)}.$$

Здесь $p(\alpha)$ — количество отрезков $[\tau_i(\alpha), \tau^i(\alpha)]$, где функция коуправления обращается тождественно в нуль. Далее без ограничения общности будем считать, что $\tau_1(\alpha) > 0$, $\tau^{p(\alpha)}(\alpha) < t_*$.

Из принципа максимума следует, что вне особых участков управление $u_\alpha(\cdot)$ принимает граничные значения ± 1 , а на особых участках лежит в диапазоне от -1 до $+1$.

Обозначим через $t_{ij}(\alpha)$, $j = \overline{1, s_i(\alpha)}$, $i = \overline{0, p(\alpha)}$ (здесь и далее считаем, что множество индексов $j = s, k$ пусто, если $k < s$), изолированные нули функции коуправления, которые упорядочим следующим образом:

$$\begin{aligned} t_{ij}(\alpha) < t_{ij+1}(\alpha), \quad j = \overline{1, s_i(\alpha)-1}, \quad i = \overline{0, p(\alpha)}, \\ 0 \leq t_{01}(\alpha), \quad t_{p(\alpha)s_{p(\alpha)}(\alpha)}(\alpha) \leq t_*; \\ \tau^i(\alpha) < t_{i1}(\alpha), \quad i = \overline{1, p(\alpha)}, \\ t_{is_i(\alpha)}(\alpha) < \tau_{i+1}(\alpha), \quad i = \overline{0, p(\alpha)-1}. \end{aligned}$$

Известно [8], что в общем случае может иметь место соотношение $s_0(\alpha) + s_1(\alpha) + \dots + s_{p(\alpha)}(\alpha) + p(\alpha) = \infty$, однако в данной работе будем считать, что выполняется следующее предположение.

Предположение 2. Верны соотношения $p(\alpha) < \infty$, $s_i(\alpha) < \infty$, $i = \overline{0, p(\alpha)}$.

Отметим, что если ограничения задачи $OC(\alpha)$ удовлетворяют предположению 1 и $p(\alpha) \neq 0$, то можно показать, что существует единственный вектор $y(\alpha)$, удовлетворяющий (2), (3). Далее будем считать, что $p(\alpha) \geq 1$. Случай $p(\alpha) = 0$ (когда оптимальное управление — релейное) исследуется по аналогии с работой [9].

Определение 1. Значение параметра α и оптимальное управление $u_\alpha^0(\cdot)$ будем называть регулярными, если выполняются следующие условия:

- 1) $\Delta_\alpha(0) \neq 0$, $\Delta_\alpha(t_*) \neq 0$;
- 2) $\partial \Delta_\alpha(\tau) / \partial t \neq 0$, $\tau \in \{t_{ij}(\alpha), j = \overline{1, s_i(\alpha)}, i = \overline{0, p(\alpha)}\}$;
- 3.1) $|u_\alpha^0(t)| < 1$, $t \in (\tau_i(\alpha), \tau^i(\alpha))$, $i = \overline{1, p(\alpha)}$;
- 3.2) $|u_\alpha^0(\tau_i(\alpha) + 0)| < 1$, $|u_\alpha^0(\tau^i(\alpha) - 0)| < 1$, $i = \overline{1, p(\alpha)}$.

Положим $P(\alpha) = \{0, 1, \dots, p(\alpha)\}$,

$$l_i(\alpha) = u_\alpha^0(\tau^i(\alpha) + 0), \quad i \in P(\alpha), \quad \varphi(\alpha) := \psi_\alpha^0(0).$$

Рассмотрим совокупности параметров

$$\begin{aligned} S(\alpha) &= \{p(\alpha), l_i(\alpha), s_i(\alpha), i \in P(\alpha)\}, \\ \theta(\alpha) &= (t_{ij}(\alpha), j = \overline{1, s_i(\alpha)}, i \in P(\alpha), \\ &\tau_i(\alpha), \tau^i(\alpha), i = \overline{1, p(\alpha)}; \varphi(\alpha); y(\alpha)). \end{aligned}$$

Определение 2. Множества $S(\alpha)$ и $\theta(\alpha)$ назовем структурой и определяющими элементами задачи $OC(\alpha)$ соответственно.

Далее будет показано, что по определенным множествам $S(\alpha)$ и $\theta(\alpha)$ можно однозначно восстановить управление $u_\alpha^0(\cdot)$ задачи $OC(\alpha)$ и проверить его оптимальность. Таким образом, задача построения решений возмущенных задач $OC(\alpha)$ сводится к построению конечномерных наборов данных $S(\alpha)$ и $\theta(\alpha)$.

Свойства решений возмущенных задач $OC(\alpha)$ в окрестности регулярного параметра

Рассмотрим совокупность параметров (далее — структура) $S = \{p, l_i, s_i, i \in P\}$, где $p \geq 1$, $P = \{0, \dots, p\}$; $l_i = 1$, $s_i \geq 0$, $i \in P$; p и s_i , $i \in P$ — целые числа.

Используя структуру S , введем $\left(\sum_{i=0}^p s_i + 2p + n + m \right)$ -вектор параметров $\theta = (t_{ij}, j = \overline{1, s_i}, i \in P, \tau_i, \tau^i, i = \overline{1, p}; \varphi; y), \varphi \in R^n, y \in R^m$, таким образом, чтобы выполнялись неравенства

$$\begin{aligned} 0 &\leq t_{01} < t_{02} < \dots < t_{0s_0} < \tau_1; \\ \tau^p &< t_{p1} < t_{p2} < \dots < t_{ps_p} \leq t_*; \\ \tau^i &< t_{ij} < t_{ij+1} < \tau_{i+1}, \quad j = \overline{1, s_i - 1}, \quad i = \overline{1, p - 1}. \end{aligned}$$

Введем обозначения

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_0 &= \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{O}_{n \times n} \\ \mathbf{D} & -\mathbf{A}^T \end{pmatrix} \in R^{2n \times 2n}, \quad \mathbf{A}_* = \mathbf{A}_0 + \gamma \mathbf{q}^T \in R^{2n \times 2n}, \\ \tilde{\mathbf{H}} &= \begin{pmatrix} \mathbf{H} & \mathbf{O}_{m \times n} \\ \mathbf{O}_{n \times n} & \mathbf{E}_n \end{pmatrix} \in R^{(m+n) \times 2n}, \\ \gamma &= \begin{pmatrix} \mathbf{b} \\ \mathbf{0}_n \end{pmatrix} \in R^{2n \times 1}, \quad \beta = \begin{pmatrix} \mathbf{0}_n \\ \mathbf{b} \end{pmatrix} \in R^{2n \times 1}, \\ \mathbf{q}^T &= -\frac{\beta^T \mathbf{A}_0^2}{\beta^T \mathbf{A}_0 \gamma} \in R^{1 \times 2n}, \quad \mu(y) = \begin{pmatrix} \mathbf{g} \\ \mathbf{H}^T y - \mathbf{c} \end{pmatrix} \in R^{(m+n) \times 1}. \end{aligned}$$

Обозначим через $\mathbf{z}(S, \theta, \alpha|t), t \in T$, траекторию системы

$$\dot{\mathbf{z}} = \begin{cases} \mathbf{A}_0 \mathbf{z} + \gamma (-1)^j l_i, & t \in [t_{ij}, t_{ij+1}[, j = \overline{0, s_i}, i \in P, \\ \mathbf{A}_* \mathbf{z}, & t \in \bigcup_{i=1}^p [\tau_i, \tau^i[, \\ \mathbf{z}(S, \theta, \alpha|0) = \begin{pmatrix} \mathbf{x}_0(\alpha) \\ \varphi \end{pmatrix}, \end{cases} \quad (5)$$

$$t_{i0} = \tau^i, \quad t_{is_i+1} = \tau_{i+1}, \quad i \in P, \quad \tau^0 = 0, \quad \tau_{p+1} = t_*.$$

Введем в рассмотрение $\left(m + n + 2p + \sum_{i=0}^p s_i \right)$ -вектор-функцию

$$\Psi(S, \theta, \alpha) = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{H}} \mathbf{z}(S, \theta, \alpha|t_*) - \mu(y) \\ \beta^T \mathbf{z}(S, \theta, \alpha|t_{ij}), \quad j \in V_i, \quad i \in P \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где $V_0 = \{1, \dots, s_0 + 1\}, V_i = \{0, \dots, s_i + 1\}, i = \overline{1, p - 1}, V_p = \{0, \dots, s_p\}$.

Подчеркнем, что вид вектора θ и вектор-функции (6), а также их размерности задаются параметрами $l_i, s_i, i \in P$ и p , которые определяются структурой S и считаются известными.

Пусть α_0 — регулярное значение параметра. В работе [10] была сформулирована и доказана следующая теорема, описывающая свойства решений $u_{\alpha_0}^0(\cdot)$ задач $OC(\alpha), \alpha \in E(\alpha_0)$, в окрестности параметра α_0 .

Теорема 1. Пусть выполняются предположения 1, 2. Предположим, что задача $OC(\alpha_0)$ имеет оптимальное регулярное управление $u_{\alpha_0}^0(\cdot)$ со структурой

$$\begin{aligned} S(\alpha_0) = S^0 &= \{p(\alpha_0) = p^0, l_i(\alpha_0) = l_i^0, \\ s_i(\alpha_0) &= s_i^0, i \in P(\alpha_0) = P^0\} \end{aligned} \quad (7)$$

и определяющими элементами

$$\begin{aligned} \theta(\alpha_0) = \theta^0 &= (t_{ij}(\alpha_0) = t_{ij}^0, j = \overline{1, s_i^0}, i \in P^0, \\ \tau_i(\alpha_0) = \tau_i^0, \tau^i(\alpha_0) &= \tau^i{}^0, i = \overline{1, p^0}; \varphi(\alpha_0); y(\alpha_0)). \end{aligned} \quad (8)$$

Тогда при $\alpha \in E(\alpha_0)$:

1) решения $u_{\alpha}^0(\cdot)$ задач $OC(\alpha)$ имеют постоянную структуру $S(\alpha) = S^*$:

$$\begin{aligned} S^* = S(\alpha_0) &= \{p^* := p(\alpha_0), l_i^* := l_i(\alpha_0), \\ s_i^* &:= s_i(\alpha_0), i \in P^* := P(\alpha_0)\}; \end{aligned}$$

2) существует единственная непрерывно дифференцируемая вектор-функция

$$\begin{aligned} \theta^*(\alpha) &= (t_{ij}(\alpha), j = \overline{1, s_i^*}, i \in P^*, \\ \tau_i(\alpha), \tau^i(\alpha), & i = \overline{1, p^*}; \varphi(\alpha); y(\alpha)), \end{aligned} \quad (9)$$

удовлетворяющая соотношениям

$$\Psi(S^*, \theta^*(\alpha), \alpha) = 0, \quad \alpha \in E(\alpha_0), \quad \theta^*(\alpha_0) = \bar{\theta}^*, \quad (10)$$

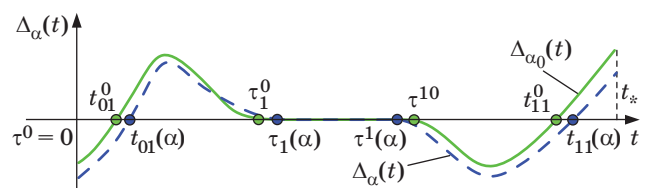
где $\bar{\theta}^* = \theta^0$;

3) оптимальное управление $u_{\alpha}^0(\cdot)$ задачи $OC(\alpha)$ находится по правилу

$$\begin{aligned} u_{\alpha}^0(t) &= (-1)^j l_i^*, \quad t \in [t_{ij}(\alpha), t_{ij+1}(\alpha)[, \\ j = \overline{0, s_i^*}, i \in P^*, & u_{\alpha}^0(t) = \mathbf{q}^T \mathbf{z}(S^*, \theta^*(\alpha), \alpha|t), \\ t \in \bigcup_{i=1}^p & [\tau_i(\alpha), \tau^i(\alpha)[, \end{aligned} \quad (11)$$

где $t_{i0}(\alpha) \equiv \tau^i(\alpha), t_{is_i^*+1}(\alpha) \equiv \tau_{i+1}(\alpha), i \in P^*, \tau^0(\alpha) \equiv 0, \tau_{p^*+1}(\alpha) \equiv t_*$, а $\mathbf{z}(S^*, \theta^*(\alpha), \alpha|t), t \in T$ — решение системы (5).

В регулярном случае при достаточно малых возмущениях параметра α_0 характер поведения функций $\Delta_{\alpha}(t), t \in T, \alpha \in E(\alpha_0)$ (рис. 1, пунктирная



■ Рис. 1. Поведение функции коуправления при возмущении регулярного значения параметра α_0

линия) не меняется по отношению к характеру поведения функции $\Delta_{\alpha_0}(t)$, $t \in T$ (рис. 1, сплошная линия). Задачи $OC(\alpha)$, $\alpha \in E(\alpha_0)$, имеют ту же структуру, что и задача $OC(\alpha_0)$, но отличные от θ^0 векторы определяющих элементов $\theta(\alpha)$.

Свойства решений возмущенных задач $OC(\alpha)$ в окрестности нерегулярного параметра

Пусть для фиксированного значения параметра α_0 известны структура (7) и определяющие элементы (8) задачи $OC(\alpha_0)$. В данном разделе исследуем свойства решений $u_{\alpha}^0(t)$ задач $OC(\alpha)$, $\alpha \in E(\alpha_0)$, в окрестности нерегулярного параметра α_0 . Для определенности будем рассматривать только правостороннюю окрестность $E^+(\alpha_0)$ точки α_0 . Левосторонняя окрестность исследуется аналогичным образом.

Исследования проводятся при следующих предположениях:

1) при $\alpha = \alpha_0$ нарушается только одно из условий регулярности, приведенных в определении 1, остальные условия регулярности выполняются;

2) при $\alpha = \alpha_0$ для точки $\tilde{t} \in T$, где нарушаются условия регулярности, справедливы указанные ниже предположения:

если $\tilde{t} \in [\tau_{i_0}(\alpha), \tau^{i_0}(\alpha)]$, где $1 \leq i_0 \leq p(\alpha)$, то:

- при $\tilde{t} \neq \tau_{i_0}(\alpha) \vee \tau^{i_0}(\alpha)$ из $|u_{\alpha}^0(\tilde{t})| = 1$ следует, что $\partial^2 u_{\alpha}^0(\tilde{t}) / \partial t^2 \neq 0$;
- при $\tilde{t} = \tau_{i_0}(\alpha)$ из $|u_{\alpha}^0(\tau_{i_0}(\alpha) + 0)| = 1$ следует, что $\partial u_{\alpha}^0(\tau_{i_0}(\alpha) + 0) / \partial t \neq 0$;
- при $\tilde{t} = \tau^{i_0}(\alpha)$ из $|u_{\alpha}^0(\tau^{i_0}(\alpha) - 0)| = 1$ следует, что $\partial u_{\alpha}^0(\tau^{i_0}(\alpha) - 0) / \partial t \neq 0$;

если $\tilde{t} \in [\tau^{i_0}(\alpha), \tau_{i_0+1}(\alpha)]$, где $0 \leq i_0 \leq p(\alpha)$, то:

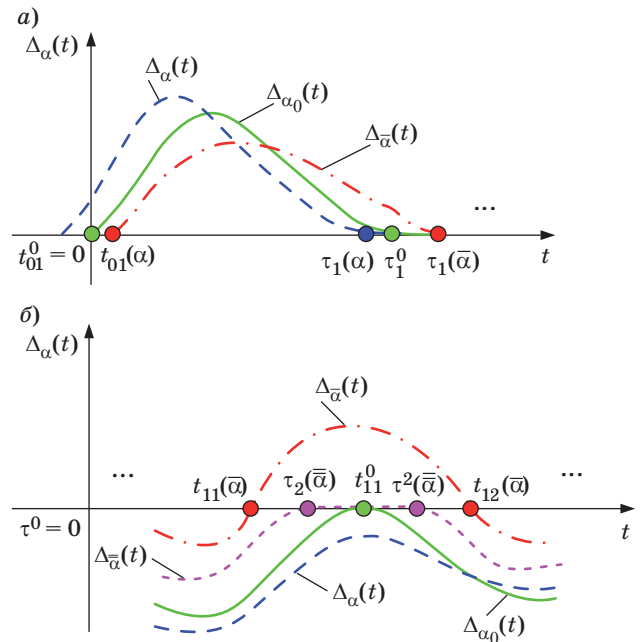
- при $\tilde{t} \neq 0 \vee t_*$ из $\Delta_{\alpha}(\tilde{t}) = 0$, $\partial \Delta_{\alpha}(\tilde{t}) / \partial t = 0$ следует, что $\partial^2 \Delta_{\alpha}(\tilde{t}) / \partial t^2 \neq 0$;
- при $\tilde{t} = 0 \vee t_*$ из $\Delta_{\alpha}(\tilde{t}) = 0$ следует, что $\partial \Delta_{\alpha}(\tilde{t}) / \partial t \neq 0$.

Случай нарушения условия регулярности 1

Рассмотрим случай, когда при $\alpha = \alpha_0$ условие регулярности 1 нарушается в начальной точке $\tilde{t} = t_{01}^0 = 0$ временного интервала: $\Delta_{\alpha_0}(0) = 0$ (рис. 2, а, сплошная линия). Случай $\Delta_{\alpha_0}(t_*) = 0$ рассматривается аналогично.

При достаточно малых возмущениях параметра α_0 может реализоваться одна из следующих ситуаций.

I. При $\alpha \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$ структура $S(\alpha) = S^I$ задач $OC(\alpha)$ изменится по отношению к структуре S^0 (7) задачи $OC(\alpha_0)$, поскольку граничная точка $\tilde{t} = t_{01}^0 = t_{01}(\alpha_0) = 0$, в которой нарушилось условие регулярности, выйдет за границу интервала



■ Рис. 2. Поведение функции коуправления при возмущении нерегулярного значения параметра α_0 : а — в окрестности точки $t_{01}^0 = 0$; б — в окрестности точки \tilde{t}

управления, не породив новой точки переключения управления (рис. 2, а, пунктирная линия). Новая структура будет иметь следующий вид:

$$S^I = \{p^I, l_i^I, s_i^I, i \in P^I\}, \quad (12)$$

$$p^I = p^0, P^I = P^0, l_i^I = l_i^0, i \in P^I,$$

$$s_0^I = s_0^0 - 1, s_i^I = s_i^0, i = 1, \overline{P^I}.$$

II. При $\bar{\alpha} \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$ структура $S(\bar{\alpha}) = S^{II}$ задач $OC(\bar{\alpha})$ изменится по отношению к структуре S^0 задачи $OC(\alpha_0)$, поскольку граничная точка $\tilde{t} = t_{01}^0 = 0$, в которой нарушилось условие регулярности, породит новую точку переключения управления — изолированный нуль функции коуправления (рис. 2, а, штрихпунктирная линия). Новая структура будет выглядеть следующим образом:

$$S^{II} = \{p^{II}, l_i^{II}, s_i^{II}, i \in P^{II}\},$$

$$p^{II} = p^0, P^{II} = P^0, l_0^{II} = -l_0^0, l_i^{II} = l_i^0, i = 1, \overline{P^{II}},$$

$$s_i^{II} = s_i^0, i \in P^{II}.$$

Надо определить, какая из ситуаций — I или II — будет иметь место при возмущении параметра α_0 . Для этого по имеющейся в данный момент информации, используя момент $\tilde{t} = 0$ и структуру S^I (12), подсчитаем вектор

$$Z = \left(\frac{\partial z(S^I, \theta^{I0}, \alpha_0 | \tilde{t})}{\partial \theta^I} \frac{d\theta^I(\alpha_0)}{d\alpha} + \frac{\partial z(S^I, \theta^{I0}, \alpha_0 | \tilde{t})}{\partial \alpha} \right). \quad (13)$$

Здесь $z(S^I, \theta^I, \alpha|t)$ — решение системы (5),

$$\theta^I = (t_{ij}, j = \overline{1, s_i^I}, i \in P^I, \tau_i, \tau^i, i = \overline{1, p^I}; \varphi; y),$$

$$\varphi \in R^n, y \in R^m, \quad (14)$$

вектор-функция

$$\theta^I(\alpha) = (t_{ij}^I(\alpha), j = \overline{1, s_i^I}, i \in P^I,$$

$$\tau_i^I(\alpha), \tau^i(\alpha), i = \overline{1, p^I}; \varphi^I(\alpha); y^I(\alpha)) \quad (15)$$

сформирована с использованием структуры S^I и удовлетворяет соотношениям

$$\Psi(S^I, \theta^I(\alpha), \alpha) = 0, \quad \alpha \in E(\alpha_0), \quad \theta^I(\alpha_0 + 0) = \theta^{I0}, \quad (16)$$

$$\theta^{I0} = (t_{0j}^0, j = \overline{2, s_0^0}, t_{ij}^0, j = \overline{1, s_i^0}, i = \overline{1, p^0},$$

$$\tau_i^0, \tau^i, i = \overline{1, p^0}; \varphi(\alpha_0); y(\alpha_0))$$

— вектор, построенный по компонентам вектора θ^0 (8) определяющих элементов задачи $OC(\alpha_0)$.

Следующая теорема описывает свойства решений $u_\alpha^0(\cdot)$ задач $OC(\alpha)$, $\alpha \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$, в окрестности нерегулярного значения параметра α_0 .

Теорема 2. Пусть выполняются предположения 1, 2. Предположим, что для задачи $OC(\alpha_0)$ со структурой $S(\alpha_0)$ (7) и определяющими элементами $\theta(\alpha_0)$ (8) нарушается условие регулярности 1: $t_{01}^0(\alpha_0) = 0$, и число $\nu := u_{\alpha_0}^0(+0)\beta^T Z \neq 0$. Тогда при $\alpha \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$:

1) задачи $OC(\alpha)$ имеют постоянную структуру $S(\alpha) = S^*$, которая при $\nu > 0$ имеет вид (случай I)

$$S^* = \{p^* := p^I, l_i^* := l_i^I, s_i^* := s_i^I, i \in P^* := P^I\},$$

а при $\nu < 0$ имеет вид (случай II)

$$S^* = \{p^* := p^{II}, l_i^* := l_i^{II}, s_i^* := s_i^{II}, i \in P^* := P^{II}\};$$

2) существует единственная непрерывно дифференцируемая вектор-функция $\theta^*(\alpha)$ (9), удовлетворяющая соотношениям (10), где $\bar{\theta}^* = \theta^{I0}$ при $\nu > 0$ и $\bar{\theta}^* = \theta^0$ при $\nu < 0$;

3) оптимальное управление $u_\alpha^0(\cdot)$ задачи $OC(\alpha)$ находится по правилу (11).

Для доказательства теоремы в каждом из случаев — I и II — применяется классическая теорема о неявных функциях, поскольку $\Psi(S^*, \bar{\theta}^*, \alpha_0) = 0$, $\det(\partial\Psi(S^*, \bar{\theta}^*, \alpha_0) / \partial\bar{\theta}^*) \neq 0$, где вектор параметров

$$\theta^* = (t_{ij}, j = \overline{1, s_i^*}, i \in P^*, \tau_i, \tau^i, i = \overline{1, p^*}; \varphi; y),$$

$$\varphi \in R^n, y \in R^m$$

сформирован с использованием структуры S^* .

Случай нарушения условия регулярности 2

Рассмотрим случай, когда при $\alpha = \alpha_0$ условие регулярности 2 нарушается в точке $\tilde{t} = t_{kr}^0 : \Delta_{\alpha_0}(t_{kr}^0) = \partial\Delta_{\alpha_0}(t_{kr}^0) / \partial t = 0$, $t_{kr}^0 \in (\tau^{k0}, \tau_{k+1}^0) \in T$, $r \in \{1, \dots, s_k^0\}$, $k \in P^0$ (рис. 2, б, сплошная линия, $k = r = 1$).

При возмущении α_0 может реализоваться одна из следующих ситуаций.

I. При $\alpha \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$ структура $S(\alpha) = S^I$ задач $OC(\alpha)$ изменится по отношению к структуре S^0 (7) задачи $OC(\alpha_0)$, поскольку нуль коуправления $\tilde{t} = t_{kr}^0$ не породит новой точки переключения управления (рис. 2, б, крупнопунктирная линия). Новая структура будет выглядеть следующим образом:

$$S^I = \{p^I, l_i^I, s_i^I, i \in P^I\}, \quad (17)$$

$$p^I = p^0, P^I = P^0, l_i^I = l_i^0, i \in P^I,$$

$$s_i^I = s_i^0, i \in P^I \setminus k, s_k^I = s_k^0 - 1.$$

II. При $\bar{\alpha} \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$ структура $S(\bar{\alpha}) = S^{II}$ задач $OC(\bar{\alpha})$ изменится по отношению к структуре S^0 задачи $OC(\alpha_0)$, поскольку нуль коуправления $\tilde{t} = t_{kr}^0$ породит две новые точки переключения управления — изолированные нули функции коуправления (рис. 2, б, штрихпунктирная линия). Новая структура будет выглядеть следующим образом:

$$S^{II} = \{p^{II}, l_i^{II}, s_i^{II}, i \in P^{II}\},$$

$$p^{II} = p^0, P^{II} = P^0, l_i^{II} = l_i^0, i \in P^{II},$$

$$s_i^{II} = s_i^0, i \in P^{II} \setminus k, s_k^{II} = s_k^0 + 1.$$

III. При $\bar{\bar{\alpha}} \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$ структура $S(\bar{\bar{\alpha}}) = S^{III}$ задач $OC(\bar{\bar{\alpha}})$ изменится по отношению к структуре S^0 задачи $OC(\alpha_0)$, поскольку нуль коуправления $\tilde{t} = t_{kr}^0$ породит отрезок, на котором функция коуправления обращается тождественно в нуль (рис. 2, б, мелкопунктирная линия). Новая структура будет выглядеть следующим образом:

$$S^{III} = \{p^{III}, l_i^{III}, s_i^{III}, i \in P^{III}\},$$

$$p^{III} = p^0 + 1, P^{III} = P^0 \cup p^{III}, l_k^{III} = l_k^0,$$

$$l_{k+1}^{III} = u_{\alpha_0}^0(\tilde{t} + 0), s_k^{III} = r - 1, s_{k+1}^{III} = s_k^0 - r,$$

$$l_i^{III} = l_i^0, s_i^{III} = s_i^0, i \in \{0, 1, \dots, k-1\}, l_i^{III} = l_{i-1}^0,$$

$$s_i^{III} = s_{i-1}^0, i \in \{k+2, \dots, p^{III}\}.$$

Для того чтобы определить, какая из упомянутых ситуаций будет иметь место, подсчитаем вектор Z по правилам (13)—(16), используя структуру S^I (17), момент $\tilde{t} = t_{kr}^0$ и вектор

$$\theta^{I0} = (t_{ij}^0, j = \overline{1, s_i^0}, i = \overline{0, k-1}, t_{kj}^0,$$

$$j \in \{1, \dots, s_k^0\} \setminus r, t_{ij}^0, j = 1, \overline{s_i^0}, i = k+1, p^0, \\ \tau_i^0, \tau^{i0}, i = 1, p^0; \varphi(\alpha_0); \mathbf{y}(\alpha_0).$$

Обозначим

$$\xi := \frac{|\partial^2 \Delta_{\alpha_0}(\tilde{t}) / \partial t^2|}{2\mathbf{b}^T \mathbf{D} \mathbf{b}} > 0, \nu := \text{sign} \left(\frac{\partial^2 \Delta_{\alpha_0}(\tilde{t})}{\partial t^2} \right) \beta^T \mathbf{Z}.$$

Доказана следующая теорема.

Теорема 3. Пусть выполняются предположения 1, 2. Предположим, что задача $OC(\alpha_0)$ имеет оптимальное нерегулярное управление $u_{\alpha_0}^0(\cdot)$ со структурой $S(\alpha_0)$ (7) и определяющими элементами $\theta(\alpha_0)$ (8), и для нее нарушается условие регулярности 2: $\partial \Delta_{\alpha_0}(t_{kr}^0) / \partial t = 0$, и числа $\nu \neq 0$, $\xi \neq 1$. Тогда при $\alpha \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$:

1) задачи $OC(\alpha)$ имеют постоянную структуру $S(\alpha) = S^*$, которая:

— при $\nu > 0$ имеет вид (случай I)

$$S^* = \{p^* := p^I, l_i^* := l_i^I, s_i^* := s_i^I, i \in P^* := P^I\};$$

— при $\nu < 0$, $\xi > 1$ имеет вид (случай II)

$$S^* = \{p^* := p^{II}, l_i^* := l_i^{II}, s_i^* := s_i^{II}, i \in P^* := P^{II}\};$$

— при $\nu < 0$, $0 < \xi < 1$ имеет вид (случай III)

$$S^* = \{p^* := p^{III}, l_i^* := l_i^{III}, s_i^* := s_i^{III}, i \in P^* := P^{III}\};$$

2) существует единственная непрерывно дифференцируемая вектор-функция $\theta^*(\alpha)$ (9), удовлетворяющая соотношениям (10), где $\bar{\theta}^* = \theta^{I0}$ при $\nu > 0$; $\bar{\theta}^* = \theta^{II0}$ при $\nu < 0$, $\xi > 1$ и $\bar{\theta}^* = \theta^{III0}$ при $\nu < 0$, $0 < \xi < 1$;

$$\theta^{II0} = \theta^{II}(\alpha_0) = \left(t_{ij}^0, j = \overline{1, s_i^0}, i = \overline{0, k-1}, t_{kj}^0, \right.$$

$$j = \overline{1, r}, t_{kj}^0, j = r, s_k^0, t_{ij}^0, j = \overline{1, s_i^0},$$

$$\left. i = \overline{k+1, p^0}, \tau_i^0, \tau^{i0}, i = \overline{1, p^0}; \varphi(\alpha_0); \mathbf{y}(\alpha_0) \right),$$

$$\theta^{III0} = \theta^{III}(\alpha_0) = \left(t_{ij}^0, j = \overline{1, s_i^0}, i = \overline{0, k-1}, t_{kj}^0, \right.$$

$$\left. j = \overline{1, r-1}, t_{kj}^0, j = r+1, s_k^0, t_{ij}^0, j = \overline{1, s_i^0}, i = \overline{k+1, p^0}, \right.$$

$$\left. \tau_i^0, \tau^{i0}, i = \overline{1, k}, \tilde{t}, \tilde{\tau}, \tau_i^0, \tau^{i0}, i = \overline{k+1, p^0}; \varphi(\alpha_0); \mathbf{y}(\alpha_0) \right);$$

3) оптимальное управление $u_{\alpha}^0(\cdot)$ задачи $OC(\alpha)$ находится по правилу (11).

В случае I для доказательства существования функции $\theta^*(\alpha)$, удовлетворяющей соотношениям (10) с $\bar{\theta}^* = \theta^{I0}$, используется классическая теорема о неявных функциях. Неравенство $\nu > 0$ позволяет доказать, что для управления $u_{\alpha}^0(\cdot)$, построенного согласно (11), выполняются условия принципа максимума.

В случае II матрица Якоби уравнений (10) при $\theta = \theta^{II0}$ является вырожденной. Для доказатель-

ства существования функции $\theta^*(\alpha)$, удовлетворяющей соотношениям (10) с $\bar{\theta}^* = \theta^{II0}$, в векторе θ^* делается замена переменных $t_{kr+1} \rightarrow t_{kr} + \Delta t$, и в уравнениях (10) равенство $\beta^T \mathbf{z}(S^*, \theta^*(\alpha)|_{t_{kr+1}}) = 0$ заменяется равенством $\beta^T (\mathbf{z}(S^*, \theta^*(\alpha)|_{t_{kr} + \Delta t}) - \mathbf{z}(S^*, \theta^*(\alpha)|_{t_{kr}})) / \Delta t = 0$. Доказывается, что для новой системы уравнений и нового вектора параметров применима теорема о неявных функциях, из которой с учетом сделанных эквивалентных замен следует существование требуемой функции $\theta^*(\alpha)$. Неравенство $\nu < 0$ позволяет доказать, что компоненты $t_{kr}(\alpha)$, $t_{kr+1}(\alpha)$ вектор-функции $\theta^*(\alpha)$ удовлетворяют неравенству $t_{kr}(\alpha) < t_{kr+1}(\alpha)$. Неравенство $\xi > 1$ позволяет доказать, что вдоль управления $u_{\alpha}^0(\cdot)$, построенного по правилам (11), выполняются условия принципа максимума.

В случае III схема доказательства теоремы аналогична случаю II. Для доказательства существования функции $\theta^*(\alpha)$, удовлетворяющей соотношениям (10) с $\bar{\theta}^* = \theta^{III0}$, в векторе θ^* делается замена переменных $\tau^k \rightarrow \tau_k + \Delta \tau$, и в уравнениях (10) равенство $\beta^T \mathbf{z}(S^*, \theta^*(\alpha)|_{\tau^k}) = 0$ заменяется равенством $\beta^T (\mathbf{z}(S^*, \theta^*(\alpha)|_{\tau_k + \Delta \tau}) - \mathbf{z}(S^*, \theta^*(\alpha)|_{\tau_k})) / \Delta \tau = 0$. Для новой системы уравнений и нового вектора параметров применима теорема о неявных функциях, из которой с учетом сделанных эквивалентных замен следует существование требуемой функции $\theta^*(\alpha)$. Неравенство $\nu < 0$ позволяет доказать, что компоненты $\tau_k(\alpha)$, $\tau^k(\alpha)$ вектор-функции $\theta^*(\alpha)$ удовлетворяют неравенству $\tau_k(\alpha) < \tau^k(\alpha)$. Неравенство $\xi < 1$ позволяет доказать, что вдоль управления $u_{\alpha}^0(\cdot)$, построенного по правилам (11), выполняются условия принципа максимума.

Отметим, что в отличие от других случаев нарушения условий регулярности, в рассматриваемом случае существует три альтернативных варианта поведения функции коуправления при возмущении параметра α_0 .

Случай нарушения условия регулярности 3.1

Рассмотрим случай, когда при $\alpha = \alpha_0$ условие регулярности 3.1 нарушается в точке $\tilde{t} \in (\tau_k^0, \tau^{k0})$. Для определенности будем считать, что $u_{\alpha_0}^0(\tilde{t}) = 1$ (рис. 3, а, б, сплошные линии). Случай $u_{\alpha_0}^0(\tilde{t}) = -1$ рассматривается аналогично.

Возможна одна из следующих ситуаций.

I. При $\alpha \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$ структура $S(\alpha) = S^I$ задачи $OC(\alpha)$ не изменится по отношению к структуре S^0 (7) задачи $OC(\alpha_0)$ (рис. 3, а, пунктирные линии):

$$S^I = \{p^I, l_i^I, s_i^I, i \in P^I\}, \quad (18)$$

$$p^I = p^0, l_i^I = l_i^0, s_i^I = s_i^0, i \in P^I = P^0.$$

II. При $\alpha \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$ структура $S(\alpha) = S^{II}$ задачи $OC(\alpha)$ изменится по отношению к структуре S^0

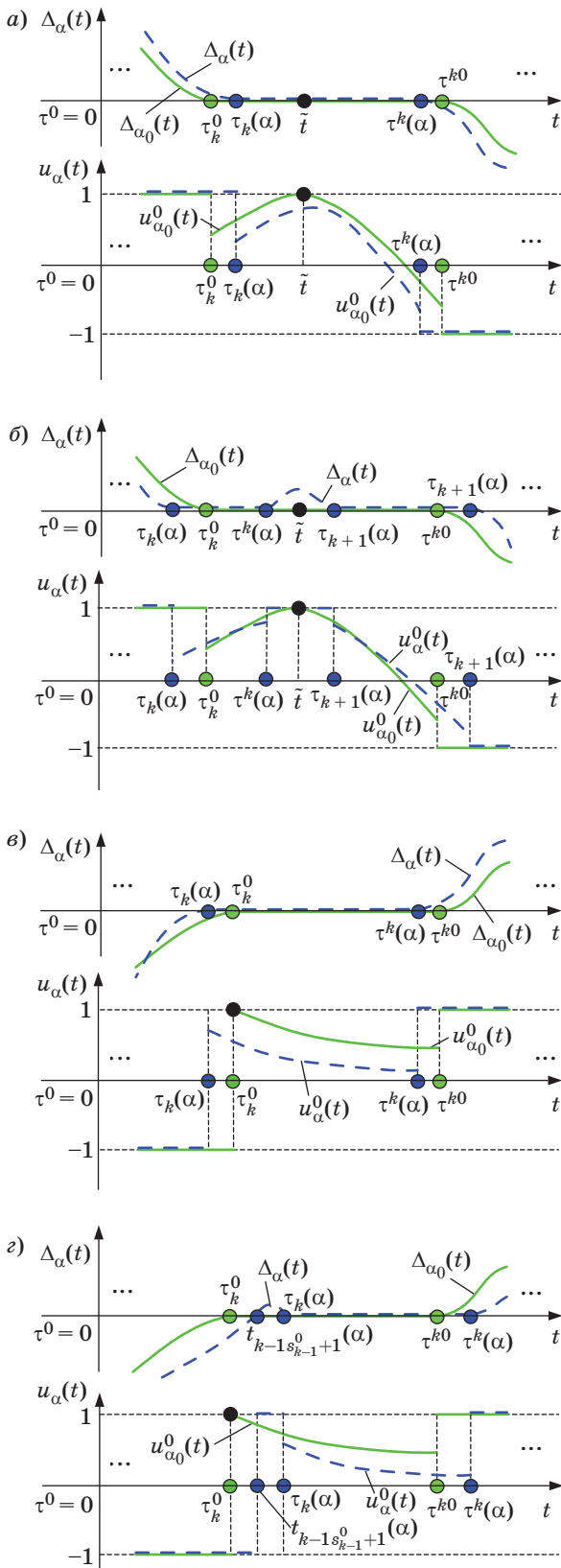


Рис. 3. Поведение функций коуправления и управления при возмущении нерегулярного значения параметра α_0 : а, б — в окрестности точки \tilde{t} ; в, г — в окрестности точки τ_k^0

задачи $OC(\alpha_0)$ (рис. 3, б, пунктирные линии), поскольку особый участок $[\tau_k^0, \tau^{k0}]$ распадается на два: $[\tau_k(\alpha), \tau^k(\alpha)]$ и $[\tau_{k+1}(\alpha), \tau^{k+1}(\alpha)]$, $\tau_k(\alpha_0 + 0) = \tau_k^0$, $\tau^{k+1}(\alpha_0 + 0) = \tau^{k0}$, $\tau^k(\alpha_0 + 0) = \tau_{k+1}(\alpha_0 + 0) = \tilde{t}$. Новая структура будет выглядеть следующим образом:

$$S^\Pi = \{p^\Pi, l_i^\Pi, s_i^\Pi, i \in P^\Pi\},$$

$$p^\Pi = p^0, P^\Pi = P^0 \cup p^\Pi, l_i^\Pi = l_i^0, s_i^\Pi = s_i^0,$$

$$i \in \{0, 1, \dots, k-1\}, s_k^\Pi = 0, l_k^\Pi = 1,$$

$$l_i^\Pi = l_{i-1}^0, s_i^\Pi = s_{i-1}^0, i \in \{k+1, \dots, p^\Pi\}.$$

Определим вектор Z по правилам (13)–(16), используя структуру S^I (18), момент $\tilde{t} \in (\tau_k^0, \tau^{k0})$ и вектор $\theta^{I0} = \theta^0$.

Как и в предыдущих случаях, приведем теорему, описывающую свойства решений $u_\alpha^0(\cdot)$ задач $OC(\alpha)$, $\alpha \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$, в окрестности нерегулярного значения параметра α_0 .

Теорема 4. Пусть выполняются предположения 1, 2. Предположим, что для задачи $OC(\alpha_0)$ со структурой $S(\alpha_0)$ (7) и определяющими элементами $\theta(\alpha_0)$ (8) нарушается условие регулярности 3.1: $u_{\alpha_0}^0(\tilde{t}) = 1$, $\tilde{t} \in (\tau_k^0, \tau^{k0})$, и число $\nu := q^T Z \neq 0$. Тогда при $\alpha \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$:

1) задачи $OC(\alpha)$ имеют постоянную структуру $S(\alpha) = S^*$, которая при $\nu < 0$ имеет вид (случай I)

$$S^* = \{p^* := p^I, l_i^* := l_i^I, s_i^* := s_i^I, i \in P^* := P^I\},$$

а при $\nu > 0$ имеет вид (случай II)

$$S^* = \{p^* := p^\Pi, l_i^* := l_i^\Pi, s_i^* := s_i^\Pi, i \in P^* := P^\Pi\};$$

2) существует единственная непрерывная вектор-функция $\theta^*(\alpha)$ (9), удовлетворяющая соотношениям (10), где $\bar{\theta}^* = \theta^0$ при $\nu < 0$ и $\bar{\theta}^* = \theta^{II0}$ при $\nu > 0$:

$$\theta^{II0} = \theta^\Pi(\alpha_0) = (t_{ij}^0, j = \overline{1, s_i^0}, i \in P^0, \tau_i^0, \tau^{i0}, i = \overline{1, k-1},$$

$$\tau_k^0, \tilde{t}, \tau^{k0}, \tau_i^0, \tau^{i0}, i = k+1, p^0; \varphi(\alpha_0); y(\alpha_0)),$$

а в случае II — еще и соотношению

$$\tau_{k+1}(\alpha) = \tau^k(\alpha) + \sqrt{\frac{1}{\varsigma}} \sqrt{\alpha - \alpha_0} + O(\sqrt{\alpha - \alpha_0}),$$

$$\varsigma = -\frac{1}{24} \frac{\partial^2 u_{\alpha_0}^0(\tilde{t})}{\partial t^2} \frac{1}{\nu} > 0, \quad (19)$$

при этом в случае I функция $\theta^*(\alpha)$ является дифференцируемой;

3) оптимальное управление $u_\alpha^0(\cdot)$ задачи $OC(\alpha)$ находится по правилу (11).

Случай I теоремы 4 доказывается по аналогии со случаями I теорем 2 и 3.

В рассматриваемой ситуации нарушения условий регулярности в случае II существует много

вектор-функций $\theta^*(\alpha)$, удовлетворяющих соотношениям (10), где $\theta^* = \theta^{II0}$. Доказывается, что среди них существует только одна, компоненты которой удовлетворяют условию (19). Показывается, что именно эта вектор-функция является вектором определяющих элементов задач $OC(\alpha)$, $\alpha \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$. Из разложения (19) видно, что вектор-функция $\theta^*(\alpha)$ является недифференцируемой в точке $\alpha = \alpha_0 + 0$.

Случай нарушения условия регулярности 3.2

Рассмотрим случай, когда при $\alpha = \alpha_0$ условие регулярности 3.2 нарушается в точке $\tilde{t} = \tau_k^0 + 0$ и $u_{\alpha_0}^0(\tilde{t}) = 1$ (рис. 3, в, з, сплошные линии). Случай нарушения условия регулярности 3.2 в точке $\tilde{t} = \tau_k^0 - 0$ и (или) $u_{\alpha_0}^0(\tilde{t}) = -1$ рассматриваются аналогично.

Можно показать, что в рассматриваемой ситуации может выполняться лишь равенство $u_{\alpha_0}^0(\tau_k^0 - 0) = -u_{\alpha_0}^0(\tau_k^0 + 0)$, равенство $u_{\alpha_0}^0(\tau_k^0 - 0) = u_{\alpha_0}^0(\tau_k^0 + 0)$ не может иметь места.

При достаточно малых возмущениях параметра α_0 возможна одна из следующих ситуаций.

I. При $\alpha \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$ структура $S(\alpha) = S^I$ задач $OC(\alpha)$ не изменится по отношению к структуре S^0 задачи $OC(\alpha_0)$ (рис. 3, в, пунктирные линии):

$$S^I = \{p^I, l_i^I, s_i^I, i \in P^I\}, \quad (20)$$

$$p^I = p^0, l_i^I = l_i^0, s_i^I = s_i^0, i \in P^I = P^0.$$

II. При $\alpha \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$ структура $S(\alpha) = S^{II}$ задач $OC(\alpha)$ изменится по отношению к структуре S^0 задачи $OC(\alpha_0)$, поскольку точка $\tilde{t} = \tau_k^0$ породит новую точку переключения управления $t_{k-1s_{k-1}^0+1}(\alpha) \in (\tau^{k-1}(\alpha), \tau_k(\alpha))$ — изолированный нуль функции коуправления (рис. 3, з, пунктирные линии). Новая структура будет выглядеть следующим образом:

$$S^{II} = \{p^{II}, l_i^{II}, s_i^{II}, i \in P^{II}\},$$

$$p^{II} = p^0, P^{II} = P^0, l_i^{II} = l_i^0, i \in P^{II},$$

$$s_i^{II} = s_i^0, i \in P^{II} \setminus \{i-1\}, s_{i-1}^{II} = s_{i-1}^0 + 1.$$

Для того чтобы определить, какая из ситуаций будет иметь место при возмущении параметра, подсчитаем вектор Z по правилам (13)–(16), используя структуру S^I (20), момент $\tilde{t} = \tau_k^0 + 0$ и вектор $\theta^{I0} = \theta^0$. Доказана теорема 4.

Теорема 5. Пусть выполняются предположения 1, 2. Предположим, что для задачи $OC(\alpha_0)$ со структурой $S(\alpha_0)$ (7) и определяющими элементами $\theta(\alpha_0)$ (8) нарушается условие регулярности 3.2: $u_{\alpha_0}^0(\tau_k^0 + 0) = 1$, и число $v := q^T Z \neq 0$. Тогда при $\alpha \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$:

1) задачи $OC(\alpha)$ имеют постоянную структуру $S(\alpha) = S^*$, которая при $v < 0$ имеет вид (случай I)

$$S^* = \{p^* := p^I, l_i^* := l_i^I, s_i^* := s_i^I, i \in P^* := P^I\},$$

а при $v > 0$ имеет вид (случай II)

$$S^* = \{p^* := p^{II}, l_i^* := l_i^{II}, s_i^* := s_i^{II}, i \in P^* := P^{II}\};$$

2) существует непрерывно дифференцируемая (в случае I — единственная) вектор-функция $\theta^*(\alpha)$ (9), удовлетворяющая соотношениям (10), где $\theta^* = \theta^0$ при $v < 0$ и $\theta^* = \theta^{II0}$ при $v > 0$:

$$\theta^{II0} = \theta^{II}(\alpha_0) = \left(t_{ij}^0, j = 1, s_i^0, i = \overline{0, k-1}, \tau_k^0, t_{ij}^0, \right. \\ \left. j = 1, s_i^0, i = k, p^0, \tau_i^0, \tau_i^0, i = \overline{1, p^0}; \varphi(\alpha_0); y(\alpha_0) \right);$$

3) оптимальное управление $u_\alpha^0(\cdot)$ задачи $OC(\alpha)$ находится по правилу (11).

Схема доказательства теоремы 5 аналогична схеме доказательства теоремы 4. Здесь также в случае II существует много вектор-функций $\theta^*(\alpha)$, удовлетворяющих соотношениям (10), где $\theta^* = \theta^{II0}$, но только одна из них удовлетворяет условию $t_{k-1s_{k-1}^0+1}(\alpha) < \tau_k(\alpha)$, и именно эта вектор-функция является вектором определяющих элементов задач $OC(\alpha)$, $\alpha \in E^+(\alpha_0) \setminus \alpha_0$.

Отметим, что в каждом случае нерегулярности число v (вектор Z), а также число ξ в случае нерегулярности 2 можно найти, не решая возмущенные задачи, а используя только известное решение невозмущенной задачи и вектор $dx_0(\alpha_0 + 0)/d\alpha$.

Приведенные в работе теоремы дают возможность исследовать зависимость решений задачи (1) от значений весового коэффициента α , выступающего в роли параметра. Теоремы предоставляют полную информацию о поведении решений в окрестности нерегулярного значения параметра и позволяют описать их дифференциальные свойства, а в случае отсутствия дифференцируемости дают асимптотические разложения. Дифференциальные свойства и асимптотические разложения, в свою очередь, позволяют оценить изменения в решениях при малых вариациях параметра α .

По аналогии с работой [10] на основе теорем 1–5 можно сформулировать алгоритм, позволяющий быстро строить решения возмущенных задач (1) для всех возможных значений параметра α при условии, что известно решение невозмущенной задачи.

Заключение

В работе рассмотрена линейно-квадратичная задача оптимального управления с особыми участками. Исследована зависимость решения задачи от нерегулярного значения параметра. Получены правила, позволяющие определить структуру решения возмущенной задачи при известном решении невозмущенной задачи.

Литература

1. **Malanowski K.** Solutions Differentiability of Parametric Optimal Control for Elliptic Equations // 20th Conf. on System Modelling and Optimization, July 23–27, 2001, Trier, Germany. P. 271–285.
2. **Felgenhauer U.** Lipschitz stability of broken extremals in bang-bang control problems // Lecture Notes in Computer Science. 2008. P. 317–325.
3. **Banks H. T., Dediu S., Nguyen H. K.** Sensitivity of Dynamical Systems to Parameters in a Convex Subset of a Topological Vector Space // Mathematical Biosciences and Engineering. 2007. Vol. 4. N 3. P. 403–430.
4. **Izmailov A. F.** Solution sensitivity for Karush-Kuhn-Tucker systems with non-unique Lagrange multipliers // Optimization. 2010. Vol. 59. Iss. 5. P. 747–775.
5. **Понтрягин Л. С.** и др. Математическая теория оптимальных процессов / Под общ. ред. Н. Х. Розова и др. – М.: Наука, 1983. – 392 с.
6. **Ли Э. Б., Маркус Л. М.** Основы теории оптимального управления. – М.: Наука, 1972. – 576 с.
7. **Костюкова О. И., Курдина М. А.** Исследование решений параметрических задач оптимального управления с особыми участками // Computer Modelling and New Technologies. 2006. Vol. 10. N 2. P. 57–66.
8. **Malanowski K., Maurer H.** Sensitivity analysis of optimal control problems subject to higher order state constraints // Annals of Operations Research. 2001. Vol. 101 (Operation with Perturbations II). P. 43–73.
9. **Борисов В. Ф., Зеликин М. И.** Режимы с учащающимися переключениями в задаче оптимального по быстродействию управления роботом // Прикладная математика и механика. 1988. Т. 52. № 6. С. 934–946.
10. **Костюкова О. И.** Параметрическая выпуклая задача оптимального управления линейной системой // Прикладная математика и механика. 2002. Т. 66. Вып. 2. С. 200–213.

Уважаемые подписчики!

Полнотекстовые версии журнала за 2002–2009 гг. в свободном доступе на сайте журнала (<http://www.i-us.ru>) и на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>). Печатную версию архивных выпусков журнала за 2003–2009 гг. Вы можете заказать в редакции по льготной цене.

Журнал «Информационно-управляющие системы» выходит каждые два месяца. Стоимость годовой подписки (6 номеров) для подписчиков России — 3600 рублей, для подписчиков стран СНГ — 4200 рублей, включая НДС 18 %, почтовые и таможенные расходы.

На электронную версию нашего журнала (все выпуски, годовая подписка, один выпуск, одна статья) вы можете подписаться на сайте РУНЭБ (<http://www.elibrary.ru>).

Подписку на печатную версию журнала можно оформить в любом отделении связи по каталогу:

«Роспечать»: № 48060 — годовой индекс, № 15385 — полугодовой индекс,

а также через посредство подписных агентств:

«Северо-Западное агентство „Прессинформ“»

Санкт-Петербург, тел.: (812) 335-97-51, 337-23-05, эл. почта: press@crp.spb.ru, zajavka@crp.spb.ru,

сайт: <http://www.pinform.spb.ru>

«МК-Периодика» (РФ + 90 стран)

Москва, тел.: (495) 681-91-37, 681-87-47, эл. почта: export@periodicals.ru, сайт: <http://www.periodicals.ru>

«Информнаука» (РФ + ближнее и дальнее зарубежье)

Москва, тел.: (495) 787-38-73, эл. почта: Alfimov@viniti.ru, сайт: <http://www.informnauka.com>

«Гал»

Москва, тел.: (495) 603-27-28, 603-27-33, 603-27-34, сайт: <http://www.artos-gal.mpi.ru/index.html>

«ИНТЕР-ПОЧТА-2003»

Москва, тел.: (495) 500-00-60, 580-95-80, эл. почта: interpochta@interpochta.ru, сайт: <http://www.interpochta.ru>

Краснодар, тел.: (861) 210-90-00, 210-90-01, 210-90-55, 210-90-56, эл. почта: krasnodar@interpochta.ru

Новороссийск, тел.: (8617) 670-474

«Деловая пресса»

Москва, тел.: (495) 962-11-11, эл. почта: podpiska@delpress.ru, сайт: <http://delpress.ru/contacts.html>

«Коммерсант-Курьер»

Казань, тел.: (843) 291-09-99, 291-09-47, эл. почта: kazan@komcur.ru, сайт: <http://www.komcur.ru/contacts/kazan/>

«Урал-Пресс» (филиалы в 40 городах РФ)

Сайт: <http://www.ural-press.ru>

«Идея» (Украина)

Сайт: <http://idea.com.ua>

«ВТЛ» (Узбекистан)

Сайт: <http://btl.sk.uz/ru/cat17.html>

и др.

УДК 519.71

СИНТЕЗ РОБАСТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В СРЕДЕ ОРТОГОНАЛЬНЫХ ФУНКЦИЙ ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНОГО ВИДА

Д. А. Денисенко,

аспирант

В. Н. Ефанов,

доктор техн. наук, профессор

Уфимский государственный авиационный технический университет

Описывается методика синтеза систем управления с интервально заданными параметрами. Показано, что разложение временных характеристик системы в ряд по системе ортогональных функций экспоненциального вида позволяет сформулировать условия, при выполнении которых выходные координаты принадлежат допустимой временной области для всего диапазона изменения параметров объекта.

Ключевые слова — синтез, ортогональный ряд, интервальный анализ, система неравенств.

Введение

Проблема обеспечения эффективности сложных систем управления в условиях реальной эксплуатации связана с необходимостью сохранить заданные свойства при наличии неблагоприятных внешних и внутренних возмущений, которые приводят к существенным вариациям параметров объекта управления (ОУ). Основной причиной существования параметрической неопределенности для широкого класса ОУ является отсутствие полностью достоверной информации об условиях и режимах их функционирования, невозможность заранее описать их свойства во всех встречающихся рабочих ситуациях. В результате может возникнуть эффект, когда управляющие воздействия, рассчитанные на некоторый номинальный режим работы системы, не обеспечивают желаемого качества управления во всем диапазоне изменения их характеристик. Для предотвращения подобных негативных ситуаций синтез систем управления целесообразно осуществлять в классе робастных систем, сохраняющих в условиях неопределенности требуемые свойства не ниже заданного уровня. Одно из наиболее перспективных и бурно развивающихся направлений в области робастного синтеза основывается на использовании интервальных моделей ОУ. Это связано с тем, что такие модели требуют минимума информации о поведении параметров системы, а именно лишь информацию о верхних и нижних границах диапазонов их изменения, что всегда осуществимо на практике.

Следует заметить, что бурное развитие исследований интервальных систем началось в 80-х гг. прошлого столетия с момента появления основополагающих работ В. Л. Харитонова [1]. Тем не менее, большинство работ в этой области посвящено разработке методов анализа робастной устойчивости интервальных систем. В меньшей степени раскрываются вопросы синтеза робастных динамических систем. В данной статье предлагается метод синтеза, гарантирующий, что временные характеристики системы будут принадлежать заданной области для данного диапазона вариации параметров объекта. С этой целью используется разложение временных характеристик в ортогональный ряд по специально построенной системе ортогональных функций экспоненциального вида.

Постановка задачи синтеза

Рассмотрим систему управления, включающую заданную часть — объект управления, и управляющую часть, состоящую из определенной совокупности подсистем управления. Пусть динамические свойства ОУ описываются интервальной системой дифференциальных уравнений состояния

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}}_0(t) &= \mathbf{A}_0 \mathbf{x}_0(t) + \mathbf{B}_0 \mathbf{u}_0(t); \\ \mathbf{y}_0(t) &= \mathbf{C}_0 \mathbf{x}_0(t),\end{aligned}\quad (1)$$

где $\mathbf{x}_0(t)$, $\mathbf{u}_0(t)$ и $\mathbf{y}_0(t)$ — векторы соответственно переменных состояния, входных и выходных коор-

динат ОУ, размерность которых равна n_0, l_0 и m_0 ;
 $\mathbf{A}_0 \in \mathbf{M}_{n_0 \times n_0}(I(R)), \mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{ij}^{(0)} \end{bmatrix}_{n_0 \times n_0}; \mathbf{B}_0 \in \mathbf{M}_{n_0 \times l_0}(I(R)),$
 $\mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{B}_{ij}^{(0)} \end{bmatrix}_{n_0 \times l_0}; \mathbf{C}_0 \in \mathbf{M}_{m_0 \times n_0}(I(R)), \mathbf{C}_0 = \begin{bmatrix} \mathbf{C}_{ij}^{(0)} \end{bmatrix}_{m_0 \times n_0}.$

Здесь $\mathbf{M}_{n_0 \times n_0}(I(R)), \mathbf{M}_{n_0 \times l_0}(I(R)), \mathbf{M}_{m_0 \times n_0}(I(R))$ — множества матриц соответствующих размерностей, элементами которых являются вещественные интервалы $I(R)$;

$$\mathbf{A}_{ij}^{(0)} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{A}}_{ij}^{(0)}; \overline{\mathbf{A}}_{ij}^{(0)} \end{bmatrix}, \mathbf{B}_{ij}^{(0)} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{B}}_{ij}^{(0)}; \overline{\mathbf{B}}_{ij}^{(0)} \end{bmatrix}, \mathbf{C}_{ij}^{(0)} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{C}}_{ij}^{(0)}; \overline{\mathbf{C}}_{ij}^{(0)} \end{bmatrix}.$$

Подсистемы управляющей части будем описывать аналогичным образом:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_r(t) &= \mathbf{A}_r \mathbf{x}_r(t) + \mathbf{B}_r \mathbf{u}_r(t); \\ \mathbf{y}_r(t) &= \mathbf{C}_r \mathbf{x}_r(t), \quad r = \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (2)$$

с учетом того обстоятельства, что параметрами матриц управляющей части являются неизвестные неинтервальные величины.

Здесь $\mathbf{x}_r(t), \mathbf{u}_r(t)$ и $\mathbf{y}_r(t)$ — также векторы переменных состояния, входных и выходных координат подсистем управления ($n_r = \dim \mathbf{x}_r(t), l_r = \dim \mathbf{u}_r(t), m_r = \dim \mathbf{y}_r(t)$).

Уравнения связей, описывающие взаимодействие подсистем управления, а также взаимодействие управляющей части с ОУ, представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_r(t) &= - \sum_{i=1}^N \mathbf{F}_{ri} \mathbf{y}_i(t) + \mathbf{K}_r (\mathbf{g}(t) - \mathbf{y}_0(t)); \\ \mathbf{u}_0(t) &= \sum_{i=1}^N \mathbf{L}_i \mathbf{y}_i(t), \quad r = \overline{1, N}. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\mathbf{g}(t)$ — вектор задающих воздействий системы; $\mathbf{F}_{ri}, \mathbf{K}_r, \mathbf{L}_i$ — матрицы размерностей $l_r \times m_i, l_r \times m_0$ и $l_0 \times m_i$ с элементами из дискретного множества $\{-1; 0; +1\}$.

Объединяя (1), (2) и (3), получаем математическую модель замкнутой системы управления

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}(t) &= \mathbf{A}_C \mathbf{x}(t) + \mathbf{B}_C \mathbf{g}(t); \\ \mathbf{y}_0(t) &= \mathbf{C}_C \mathbf{x}(t). \end{aligned} \quad (4)$$

Здесь $\mathbf{x}(t) = [\mathbf{x}_0(t), \mathbf{x}_1(t), \dots, \mathbf{x}_N(t)]^T$; $\mathbf{A}_C = \mathbf{A} + \mathbf{B}_C \mathbf{G}$; $\mathbf{B}_C = [\mathbf{0}, \mathbf{K}_1, \mathbf{K}_2, \dots, \mathbf{K}_N]_{(N+1) \times 1}^T$; $\mathbf{C}_C = [\mathbf{C}_0; \mathbf{0}; \dots; \mathbf{0}]_{1 \times (N+1)}$ — блочные матрицы, где $\mathbf{G} = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{L} \\ \mathbf{K} & \mathbf{F} \end{bmatrix}$,

$\mathbf{F} = [\mathbf{F}_{ri}]_{N \times N}$, $\mathbf{K} = [-\mathbf{K}_r]_{N \times 1}$, $\mathbf{L} = [\mathbf{L}_i]_{1 \times N}$ — блочные матрицы; $\mathbf{A} = \text{blockdiag}\{A_0, A_1, \dots, A_N\}$, $\mathbf{B} = \text{blockdiag}\{B_0, B_1, \dots, B_N\}$, $\mathbf{C} = \text{blockdiag}\{C_0, C_1, \dots, C_N\}$ — блочно-диагональные матрицы.

Для обеспечения заданного робастного качества управления в синтезируемой системе потребуем, чтобы ее выходные координаты $\mathbf{y}_0(t)$ при-

надлежали допустимой временной области для всего диапазона изменения параметров объекта (1). Считаем, что допустимые области, определяющие желаемый вид выходных координат системы, описываются при некотором фиксированном векторе управлений $\mathbf{g}(t)$ для каждого компонента вектора $\mathbf{y}_0(t)$ своими верхней $y_i^I(t)$ и нижней $y_i^{II}(t)$ ($i = \overline{1, m_0}$) границами. Причем $y_i^I(t)$ и $y_i^{II}(t)$ — ограниченные, кусочно-гладкие функции. Тогда исследуемые выходные координаты системы будут принадлежать допустимым областям при выполнении неравенств

$$y_i^I(t) - y_i^0(t) \geq 0; \quad y_i^0(t) - y_i^{II}(t) \geq 0, \quad i = \overline{1, m_0}. \quad (5)$$

Найдем условия, которым должны удовлетворять параметры управляющей части системы для обеспечения неравенств (5) путем описания временных характеристик в среде ортогональных функций специального вида.

Описание временных характеристик с использованием ортогональных рядов экспоненциального вида

Построим специальную совокупность ортогональных функций, отражающих особенности информационно-измерительных и управляющих систем. Учитывая особенности временных характеристик систем данного класса, воспользуемся совокупностью линейно независимых функций экспоненциального вида:

$$\psi_k(t) = \exp(-(k-1)\beta t), \quad \beta > 0, \quad k = 1, 2, \dots \quad (6)$$

Данная система функций обладает следующими свойствами:

- она является полной на множестве функций, интегрируемых с квадратом в интервале $[0; +\infty)$; полнота этой системы следует из теоремы Фейера [2];
- все функции данного семейства являются ограниченными на интервале $[0; +\infty)$;
- любая линейная комбинация этих функций имеет, как правило, монотонный или слабо колебательный характер.

На базе множества функций (6) построим систему ортогональных с весом $p(t) = \exp(-\alpha t), \alpha \geq 0$, функций. Данная функция веса обеспечивает

сходимость интеграла $\int_0^\infty p(t) \phi^2(t) dt$ для всех

функций, скорость роста которых не превышает скорости роста некоторой экспоненты. В большинстве случаев временные характеристики систем автоматического управления удовлетворяют этому условию.

Ортогональные функции выражаются через элементы базового набора (6) в следующем виде:

$$\phi_l(t) = \sum_{k=1}^l \lambda_{lk} \Psi_k(t), \quad l = 1, 2, \dots \quad (7)$$

Здесь $\lambda_{ll} = 1$, а λ_{lk} при $l \neq k$ определяются из условия ортогональности функций $\phi_i(t)$:

$$\langle \phi_l; \phi_r \rangle = \int_0^{\infty} p(t) \phi_l(t) \phi_r(t) dt = 0, \quad r = 2, 3, \dots; \quad l = 1, 2, \dots, r-1. \quad (8)$$

Для того чтобы сформировать совокупность ортогональных функций, удовлетворяющих условию (8), воспользуемся формулой Родрига [3]:

$$\phi_{l+1}(t) = \frac{(-1)^l \sqrt{\delta + 2l + 1}}{l!} \times e^{\beta \delta t} \left[e^{-\beta(\delta+l)t} (1 - e^{-\beta t})^l \right]^{(l)}_{e^{-\beta t}}.$$

В данной формуле $\delta = (\alpha - \beta)/\beta$, а выражение в квадратных скобках должно быть продифференцировано l раз по аргументу $e^{-\beta t}$.

С помощью этого выражения можно найти общую формулу для ортонормированных функций:

$$\phi_{l+1}(t) = \frac{(-1)^l \sqrt{\delta + 2l + 1}}{l!} \times e^{\beta \delta t} \left[\sum_{k=0}^l C_l^k (-1)^k e^{-(\delta+k+l)\beta t} \right]^{(l)}_{e^{-\beta t}} = \sum_{k=0}^l (-1)^{k+l} \times \frac{\Gamma(k+l+\delta+1) \sqrt{(\delta+2l+1)\beta}}{k!(l-k)!\Gamma(k+\delta+1)} e^{-\beta k t}, \quad (9)$$

где $\Gamma(x)$ — гамма-функция.

Отсюда следует

$$\lambda_{l+1, k+1} = \frac{(-1)^{k+l} \Gamma(k+l+\delta+1) \sqrt{(\delta+2l+1)\beta}}{k!(l-k)!\Gamma(k+\delta+1)}. \quad (10)$$

Покажем, что при выполнении определенных условий построенная ортогональная система обеспечивает равномерную сходимость к аппроксимируемым функциям. Для удобства последующего изложения осуществим замену переменной $z = \exp(-\beta t)$. В результате получаем семейство ортогональных полиномов

$$P_l(z) = \sum_{k=1}^l \lambda_{lk} z^{k-1} \quad (11)$$

с функцией веса $q(z) = z^\sigma$, где $\sigma = (\alpha - \beta)/\beta$.

Сформулируем следующее утверждение.

Утверждение. Ряд Фурье для некоторой функции $F(z)$ по ортогональным полиномам (11) схо-

дится к ней в данной точке $z \in [0; 1]$, если вспомогательная функция $\Phi(z, y) = (F(z) - F(y))/(z - y)$ имеет в этой точке r непрерывных производных по z и $\Phi_z^{(r)}(z, y)$ удовлетворяет условию Липшица порядка $0 < \gamma < 1$, причем $r + \gamma > \{0, 5; \sigma + 0, 5\}$.

Для доказательства утверждения воспользуемся следующим равенством [3]:

$$F(z) - \sum_{l=1}^q a_l P_l(z) = v_q \left[a_q(\Phi(z, y)) P_{q+1}(z) - a_{q+1}(\Phi(z, y)) P_q(z) \right],$$

где $v_q = (q(\sigma + q) \sqrt{\sigma + 2q - 1}) / ((\sigma + 2q - 1)(\sigma + 2q) \times \sqrt{\sigma + 2q + 1})$ — отношение коэффициентов при старших степенях z полиномов $P_{q+1}(z)$ и $P_q(z)$, $a_q(\Phi(z, y))$ — коэффициенты разложения в ряд Фурье по переменной y функции $\Phi(z, y)$.

В силу выдвинутых в теореме предположений о свойствах функции $\Phi(z, y)$ скорость убывания коэффициентов $a_q(\Phi(z, y))$ подчиняется условию $a_q(\Phi(z, y)) < C_0/q^{r+\sigma}$, где C_0 — постоянная, не зависящая от q . Покажем также, что максимум абсолютного значения полинома $P_{l+1}(z)$ на интервале $[0; 1]$ достигается на одном из концов этого интервала. Для этого рассмотрим вспомогательную функцию

$$V(z) = (P_{l+1})^2(z) + z(1-z)(P'_{l+1}(z))^2 / (l(\sigma + l + 1)).$$

Вычислим производную этой функции

$$V'(z) = (P'_{l+1}(z)[2l(\sigma + l + 1)P_{l+1}(z) + (1 - 2z)P'_{l+1}(z) + z(1-z)P''_{l+1}(z)]) / (l(\sigma + l + 1)).$$

Поскольку весовая функция ортогональных полиномов (11) удовлетворяет дифференциальному уравнению Пирсона [3], то для этих полиномов справедливо следующее соотношение:

$$(z - z^2)P''_{l+1}(z) + [(\sigma + 1) - (\sigma + 2)z]P'_{l+1}(z) + l(\sigma + l + 1)P_{l+1}(z) = 0.$$

Тем самым производную $V'(z)$ можно представить следующим образом:

$$V'(z) = P'_{l+1}(z)[(1 - 2z)P'_{l+1}(z) - ((\sigma + 1) - 2(\sigma + 2)z)P'_{l+1}(z)] / l(\sigma + l + 1) = (P'_{l+1}(z))^2 (2\sigma + 2)[z - \chi] / l(\sigma + l + 1),$$

где $\chi = (2\sigma + 1)/(2\sigma + 2)$.

Производная $V'(z)$ меняет знак на интервале $[0; 1]$, если $0 \leq \chi \leq 1$. Эти неравенства выполняются

ся при $\sigma \geq 0,5$, если $2\sigma + 2 > 0$, и при $\sigma \leq -1$, если $2\sigma + 2 < 0$. Последний случай $\sigma \leq -1$ соответствует отрицательным значениям одной из величин α или β и поэтому в дальнейшем рассматриваться не будет. Следовательно, при $\sigma \geq -0,5$ и $z \leq \chi$ производная $V'(z)$ принимает положительные значения, т. е. в этом диапазоне значений z функция $V(z)$ не возрастает. Аналогично при $\sigma \geq -0,5$ и $z \geq \chi$ производная $V'(z)$ принимает неотрицательные значения и $V(z)$ не убывает.

Таким образом, $V(0) \geq V(z)$ при $z \in [0; \chi]$; $V(1) \geq V(z)$ при $z \in [\chi; 1]$. Поскольку $P_{l+1}^2(z) \leq V(z)$ и, кроме того, $P_{l+1}^2(0) = V(0)$, $P_{l+1}^2(1) = V(1)$, получаем

$$|P_{l+1}(z) - P_{l+1}(0)| \text{ при } z \in [0; \chi];$$

$$|P_{l+1}(z) - P_{l+1}(1)| \text{ при } z \in [\chi; 1].$$

Рассмотрим далее случай, когда $\chi > 1$ или $\chi < 0$. Первое неравенство соответствует условию $\sigma < -1$, второе выполняется при $-1 < \sigma < -0,5$. Значит, при выполнении последних неравенств функция $V(z)$ не убывает на всем интервале $z \in [0; 1]$, и, следовательно, $|P_{l+1}(z) - P_{l+1}(1)|$.

Вычислим теперь значения рассматриваемых ортогональных полиномов на концах интервала ортогональности. Для этого воспользуемся формулой Лейбница

$$P_{l+1}(z) = \frac{(-1)^l \sqrt{\sigma+2l+1}}{l!} z^{-\sigma} \times \\ \times [z^{\sigma+l}(1-z)^l]^{(l)} = \frac{(-1)^l \sqrt{\sigma+2l+1}}{l!} \times \\ \times \sum_{k=0}^l C_l^k z^{-\sigma} (z^{\sigma+1})^{(k)} ((1-z)^l)^{(l-k)} = \frac{(-1)^l \sqrt{\sigma+2l+1}}{l!} \times \\ \times \sum_{k=0}^l \frac{(-1)^{l-k} l! \Gamma(\sigma+l+1) \Gamma(l+1)}{k!(l-k)! \Gamma(\sigma+l-k+1) \Gamma(k+1)} z^{l-k} (1-z)^k.$$

Следовательно:

$$P_{l+1}(0) = \frac{(-1)^l \sqrt{\sigma+2l+1} \Gamma(\sigma+l+1)}{l! \Gamma(\sigma+1)};$$

$$P_{l+1}(1) = \sqrt{2\sigma+l+1}$$

или

$$|P_{q+1}(z)| \leq \sqrt{\sigma+2q+1} \leq \\ \leq \frac{\sqrt{\sigma+2q+1} \Gamma(\sigma+q+1)}{q! \Gamma(\sigma+1)} \text{ при } \sigma \geq 0;$$

$$|P_{q+1}(z)| \leq \frac{\sqrt{\sigma+2q+1} \Gamma(\sigma+q+1)}{q! \Gamma(\sigma+1)} \leq \sqrt{\sigma+2q+1} \\ \text{при } \sigma \geq 0; z \in [0; 1].$$

Используя свойства гамма-функции при $q \rightarrow \infty$

$$\frac{\Gamma(\sigma+q+1)}{q!} = \frac{\Gamma(\sigma+q+1)}{\Gamma(q+1)} \leq (q+1)^\sigma,$$

получаем при $\Gamma \geq 0$

$$\lim_{q \rightarrow \infty} v_q a_q (\Phi(z, y)) P_{q+1}(z) = \\ = \lim_{q \rightarrow \infty} \left(q(\sigma+q) \sqrt{\sigma+2q-1} C_0 \sqrt{\sigma+2q+1} (q+1)^\sigma \right) / \\ \left((\sigma+2q-1)(\sigma+2q) \sqrt{\sigma+2q+1} q^{r+\sigma} \Gamma(\sigma+1) \right) = 0, \\ \text{если } r+\gamma > \sigma+0,5;$$

аналогично при $\sigma \leq 0$

$$\lim_{q \rightarrow \infty} v_q a_q (\Phi(z, y)) P_{q+1}(z) = \\ = \lim_{q \rightarrow \infty} \left(q(\sigma+q) \sqrt{\sigma+2q-1} C_0 \sqrt{\sigma+2q+1} \right) / \\ \left((\sigma+2q-1)(\sigma+2q) \sqrt{\sigma+2q+1} q^{r+\sigma} \right) = 0, \\ \text{если } r+\gamma > 0,5.$$

Этим завершается доказательство утверждения.

Синтез системы управления по желаемой временной области

Раскладываем в ряд по системе функций (7) компоненты векторов $y_0(t)$, $y^I(t)$ и $y^{II}(t)$:

$$y_i^0(t) = \sum_{l=1}^q a_l [y_i^0] \phi_l(t); \quad y_i^I(t) = \sum_{l=1}^q a_l [y_i^I] \phi_l(t); \\ y_i^{II}(t) = \sum_{l=1}^q a_l [y_i^{II}] \phi_l(t). \quad (12)$$

Причем коэффициенты $a_l [y_i^I]$, $a_l [y_i^{II}]$ находим обычным способом:

$$a_l [y_i^I] = \int_0^\infty p(t) y_i^I(t) \phi_l(t) dt; \\ a_l [y_i^{II}] = \int_0^\infty p(t) y_i^{II}(t) \phi_l(t) dt,$$

а коэффициенты $a_l [y_i^0]$ вычислим, используя математическую модель системы (4).

Для этого выразим вектор переменных состояния с помощью частичных сумм ряда по полученной системе ортогональных функций

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{H}\Phi(t), \quad (13)$$

где $\mathbf{H} = [H_{ij}]_{n \times q}$ — матрица коэффициентов $\left(n = \sum_{k=0}^N n_k \right)$; $\Phi(t) = [\varphi_i(t)]_{q \times 1}$ — вектор ортогональных функций.

Представим также в виде, аналогичном (13), векторы задающих воздействий $\mathbf{g}(t)$ и производных от переменных состояния $\dot{\mathbf{x}}(t)$:

$$\mathbf{g}(t) = \mathbf{Q}\Phi(t), \quad \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{H}^I\Phi(t). \quad (14)$$

При этом элементы матрицы $\mathbf{Q} = [Q_{ij}]_{m \times q}$ вычисляются по известным задающим воздействиям $Q_{ij} = \int_0^\infty p(t)g_i(t)\phi_j(t)dt$, а элементы матрицы

$\mathbf{H}^I = [H_{ij}^I]_{n \times q}$ так же, как и матрицы \mathbf{H} , являются неизвестными.

Непосредственная подстановка (13) и (14) в систему (4) не позволяет определить \mathbf{H} и \mathbf{H}^I , так как число неизвестных в полученной при этом системе линейных алгебраических уравнений в два раза превышает число уравнений. С другой стороны, между векторами $\mathbf{x}(t)$ и $\dot{\mathbf{x}}(t)$ существует однозначная зависимость. Следовательно, между коэффициентами соответствующих данным векторам ортогональных рядов также должна существовать определенная взаимосвязь. Чтобы установить эту зависимость, представим элементы матрицы \mathbf{H} следующим образом [5]:

$$\begin{aligned} H_{ij} &= \int_0^\infty p(t)x_i(t)\phi_j(t)dt = \\ &= \sum_{k=1}^q \lambda_{jk} \int_0^\infty p(t)x_i(t)\psi_k(t)dt. \end{aligned}$$

Введем обозначение

$$\begin{aligned} \gamma_{ik} &= \int_0^\infty p(t)x_i(t)\psi_k(t)dt, \\ i &= 1, 2, \dots, n; \quad k = 1, 2, \dots, q. \end{aligned}$$

Тогда $H_{ij} = \sum_{k=1}^q \lambda_{jk}\gamma_{ik}$ или в матричной форме записи $\mathbf{H} = \mathbf{\Gamma}\mathbf{\Lambda}^T$, где $\mathbf{\Gamma} = [\gamma_{ij}]_{n \times q}$, $\mathbf{\Lambda} = [\lambda_{ij}]_{q \times q}$ — нижняя треугольная матрица.

Поскольку матрица $\mathbf{\Lambda}$ невырожденная, то матрица $\mathbf{\Gamma}$ может быть выражена через матрицу \mathbf{H} :

$$\mathbf{\Gamma} = \mathbf{H}(\mathbf{\Lambda}^T)^{-1}. \quad (15)$$

Рассмотрим теперь выражение для элементов матрицы \mathbf{H}^I

$$\begin{aligned} H_{ij}^I &= \int_0^\infty p(t)\dot{x}_i(t)\phi_j(t)dt = \\ &= \sum_{k=1}^q \lambda_{jk} \int_0^\infty p(t)\dot{x}_i(t)\psi_k(t)dt. \end{aligned}$$

Вычислим последний интеграл по частям, учитывая соотношение

$$(p(t)\psi_k(t))' = -(\alpha + (k-1)\beta)(p(t)\psi_k(t)):$$

$$\begin{aligned} H_{ij}^I &= \sum_{k=1}^q \lambda_{jk} \times \\ &\times \left[(p(t)x_i(t)\psi_k(t)) \Big|_0^\infty + (\alpha + (k-1)\beta) \int_0^\infty p(t)x_i(t)\psi_k(t)dt \right]. \end{aligned}$$

В силу предположения о свойствах функций, разложимых в ряд Фурье по системе (7), имеем $(p(t)x_i(t))|_{t \rightarrow \infty} = 0$, кроме того, $(p(t)x_i(t)\psi_k(t))|_{t \rightarrow \infty} = x_i(0)$, откуда

$$H_{ij}^I = \sum_{k=1}^q \lambda_{jk} \left[-x_i(0) + (\alpha + (k-1)\beta) \int_0^\infty p(t)x_i(t)\psi_k(t)dt \right],$$

или, используя введенное обозначение для последнего интеграла, получим

$$H_{ij}^I = \sum_{k=1}^q \lambda_{jk} \left[-x_i(0) + (\alpha + (k-1)\beta)\gamma_{ik} \right].$$

В матричной форме записи последнее выражение принимает вид

$$\mathbf{H}^I = [\mathbf{\Gamma}\mathbf{\Pi} - \mathbf{X}]\mathbf{\Lambda}^T, \quad (16)$$

где $\mathbf{\Pi} = \text{diag}\{\alpha; \alpha + \beta; \dots; \alpha + (q-1)\beta\}$; $\mathbf{X} = [X_{ij}]$, $X_{ij} = x_i(0)$.

Подставляя в (16) выражение для матрицы $\mathbf{\Gamma}$ (15), получим искомое соотношение между матрицами \mathbf{H} и \mathbf{H}^I :

$$\mathbf{H}^I = \left[\mathbf{H}(\mathbf{\Lambda}^T)^{-1} \mathbf{\Pi} - \mathbf{X} \right] \mathbf{\Lambda}^T. \quad (17)$$

Подставим теперь (13) и (14) с учетом (17) в (4)

$$\begin{aligned} &\left[\mathbf{H}(\mathbf{\Lambda}^T)^{-1} \mathbf{\Pi} - \mathbf{X} \right] \mathbf{\Lambda}^T \Phi(t) = \\ &= \mathbf{A}_C \mathbf{H} \Phi(t) + \mathbf{B}_C \mathbf{Q} \Phi(t). \end{aligned}$$

Для того чтобы последняя система выполнялась при любых t , приравняем коэффициенты при одинаковых ортогональных функциях в левой и правой ее частях:

$$\mathbf{H}(\mathbf{\Lambda}^T)^{-1} \mathbf{\Pi} \mathbf{\Lambda}^T - \mathbf{A}_C \mathbf{H} = \mathbf{X} \mathbf{\Lambda}^T + \mathbf{B}_C \mathbf{Q}.$$

В результате получено линейное уравнение относительно матрицы \mathbf{H} . Чтобы найти решение данного матричного уравнения, перейдем к прямым суммам столбцов матриц, фигурирующих в левой и правой частях этого уравнения:

$$\begin{aligned} & \left[\left((\Lambda^T)^{-1} \Pi \Lambda^T \right) \otimes I_n - I_q \otimes \mathbf{A}_C \right] \mathbf{H}^* = \\ & = (\mathbf{X} \Lambda^T + \mathbf{B}_C \mathbf{Q})^*, \end{aligned}$$

где \mathbf{H}^* , $(\mathbf{X} \Lambda^T + \mathbf{B}_C \mathbf{Q})^*$ — прямые суммы столбцов соответствующих матриц.

Отсюда

$$\begin{aligned} \mathbf{H}^* = & \left[\left((\Lambda^T)^{-1} \Pi \Lambda^T \right) \otimes I_n - I_q \otimes \mathbf{A}_C \right]^{-1} \times \\ & \times (\mathbf{X} \Lambda^T + \mathbf{B}_C \mathbf{Q})^*. \end{aligned}$$

Таким образом, коэффициенты ортогонального ряда для функций $y_i^0(t)$ вычисляются следующим образом:

$$a_l [y_i^0] = \sum_{k=1}^n C_{ik} H_{kl}.$$

Представим теперь выражения (12) в следующем виде:

$$\begin{aligned} y_i^0(t) &= \sum_{l=1}^q a_l [y_i^0] \phi_l(t) = \\ &= \sum_{l=1}^q a_l [y_i^0] \sum_{j=1}^l \lambda_{lj} \psi_j(t) = \sum_{j=1}^q R_{ij}^0 \psi_j(t); \\ y_i^I(t) &= \sum_{l=1}^q a_l [y_i^I] \phi_l(t) = \\ &= \sum_{l=1}^q a_l [y_i^I] \sum_{j=1}^l \lambda_{lj} \psi_j(t) = \sum_{j=1}^q R_{ij}^I \psi_j(t); \\ y_i^{II}(t) &= \sum_{l=1}^q a_l [y_i^{II}] \phi_l(t) = \\ &= \sum_{l=1}^q a_l [y_i^{II}] \sum_{j=1}^l \lambda_{lj} \psi_j(t) = \sum_{j=1}^q R_{ij}^{II} \psi_j(t). \end{aligned}$$

Тогда систему ограничений (5) можно записать таким образом:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^q (R_{ij}^I - R_{ij}^0) \psi_j(t) \geq 0; \\ & \sum_{j=1}^q (R_{ij}^0 - R_{ij}^{II}) \psi_j(t) \geq 0; \quad (i = \overline{1, m_0}). \end{aligned} \quad (18)$$

Заметим, что коэффициенты R_{ij}^0 являются интервальными функциями $R_{ij}^0 \in [R_{ij}^0; \overline{R_{ij}^0}]$, в связи с чем для оценки области значений этих коэффициентов целесообразно использовать правила интервальной арифметики, например арифметики Кахана или Каухера.

Вычисленные таким образом границы $\overline{R_{ij}^0}$ и R_{ij}^0 интервальных коэффициентов R_{ij}^0 позволя-

ют свести систему интервальных неравенств (18) к совокупности вещественных неравенств:

$$\begin{aligned} & \sum_{j=1}^q (R_{ij}^I - \overline{R_{ij}^0}) \psi_j(t) \geq 0; \\ & \sum_{j=1}^q (R_{ij}^0 - R_{ij}^{II}) \psi_j(t) \geq 0, \quad i = \overline{1, m_0}. \end{aligned}$$

Исследуем особенности полученных неравенств. Для этого осуществим замену переменной $z = \exp(-\beta t)$, в результате чего эти неравенства приобретают вид

$$P_i^I(z) = \sum_{j=1}^q (R_{ij}^I - \overline{R_{ij}^0}) z^{(j-1)} \geq 0;$$

$$P_i^{II}(z) = \sum_{j=1}^q (R_{ij}^0 - R_{ij}^{II}) z^{(j-1)} \geq 0, \quad i = \overline{1, m_0}.$$

Полиномы $P_i^I(z)$ и $P_i^{II}(z)$ принимают неотрицательные значения в интервале $[0; 1]$, если они положительны хотя бы в одной точке этого интервала и, кроме того, все их действительные корни располагаются правее точки $z = 1$.

Согласно теореме Ньютона [6], число $z = 1$ можно принять за нижнюю границу положительных корней полиномов $P_i^I(z)$ и $P_i^{II}(z)$, если выполняются условия

$$\left[z^{q-1} P_i^I(1/z) \right]_{z=1}^{(k)} \geq 0;$$

$$\left[z^{q-1} P_i^{II}(1/z) \right]_{z=1}^{(k)} \geq 0,$$

$$k = 0, 1, \dots, q-1.$$

Отсюда вытекает совокупность ограничений на параметры управляющей части системы, которые определяют принадлежность выходных координат системы заданной области:

$$\overline{R_{i1}^0} - R_{i1}^I > 0, \quad R_{i1}^{II} - \underline{R_{i1}^0} > 0,$$

$$\sum_{j=1}^{q-k} \left[\frac{(q-j)!}{(q-k-j)!} \left(\overline{R_{ij}^0} - R_{ij}^I \right) \right] \geq 0;$$

$$\sum_{j=1}^{q-k} \left[\frac{(q-j)!}{(q-k-j)!} \left(R_{ij}^{II} - \underline{R_{ij}^0} \right) \right] \geq 0,$$

$$k = 0, 1, \dots, q-2; \quad i = 1, 2, \dots, m_0.$$

Для решения полученной системы алгебраических неравенств, завершающей процедуру синтеза, могут быть использованы методы, эффективные для недоопределенных и переопределенных систем большой размерности. К их числу относятся симплекс-метод и метод квадратичного программирования.

Заключение

Рассмотренный в статье метод синтеза по желаемой области временных характеристик в условиях интервальной неопределенности обеспечивает робастное качество управления в синтезированной системе. При этом множество возможных траекторий выходных координат остается в границах допустимой зоны для всего диапазо-

на изменения параметров ОУ. Предложенный математический аппарат позволяет установить непосредственную связь временных характеристик с интервальными параметрами объекта и неизвестными параметрами управляющей части. В результате задачу синтеза удается свести к решению системы алгебраических неравенств относительно неизвестных параметров управляющих подсистем.

Литература

1. Пантелеев А. В., Якимова А. С., Босов А. В. Обыкновенные дифференциальные уравнения. — М.: Вузовская книга, 2012. — 273 с.
2. Колмогоров А. Н., Фомин С. В. Элементы теории функций и функционального анализа. — М.: Физматлит, 2009. — 572 с.
3. Суегин П. К. Классические ортогональные многочлены. — М.: Физматлит, 2007. — 480 с.
4. Демидович Б. П., Марон И. А. Основы вычислительной математики. — М.: Лань, 2009. — 672 с.
5. Никитин А. В., Шишлаков В. Ф. Параметрический синтез нелинейных систем автоматического управления: монография / Под ред. В. Ф. Шишлакова; СПбГУАП. — СПб., 2003. — 358 с.
6. Воевода А. А., Плохотников В. В. О методике синтеза регуляторов для объектов с интервальными параметрами // Сб. науч. тр. / НГТУ. Новосибирск, 1998. № 3. С. 157–160.

УВАЖАЕМЫЕ АВТОРЫ!

Национальная электронная библиотека (НЭБ) продолжает работу по реализации проекта SCIENCE INDEX. После того как Вы зарегистрируетесь на сайте НЭБ (<http://elibrary.ru/defaultx.asp>), будет создана Ваша личная страничка, содержание которой составят не только Ваши персональные данные, но и перечень всех Ваших печатных трудов, имеющих в базе данных НЭБ, включая диссертации, патенты и тезисы к конференциям, а также сравнительные индексы цитирования: РИНЦ (Российский индекс научного цитирования), h (индекс Хирша) от Web of Science и h от Scopus. После создания базового варианта Вашей персональной страницы Вы получите код доступа, который позволит Вам редактировать информацию, в том числе добавлять публикации, которых нет в базе данных НЭБ, помогая создавать максимально объективную картину Вашей научной активности и цитирования Ваших трудов.

УДК 681.5

ЭКСПЕРТНАЯ СИСТЕМА АНАЛИЗА И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ В ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

А. Е. Городецкий,

доктор техн. наук, профессор

В. Г. Курбанов,

канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник

И. Л. Тарасова,

канд. техн. наук, старший научный сотрудник

Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург

Предложена экспертная система, которая позволяет прогнозировать аварийные ситуации в энергетических установках большой единичной мощности на основе логико-вероятностного моделирования.

Ключевые слова — логико-вероятностная модель, логико-вероятностная переменная, вероятность безотказной работы, база данных, база знаний, машина логического вывода.

Введение

В настоящее время операторы на ГЭС при оценке функционирования оборудования и возможных неисправностей руководствуются СТО 17330282.27.140.001-2006 «Методики оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций». Каких-либо автоматизированных систем оценки возможных аварийных ситуаций путем анализа текущего состояния гидроагрегатов и показаний приборов не предусмотрено. Однако создание систем, способных подсказывать операторам возможные развития аварийных ситуаций и их опасность, а также возможные действия для сохранения живучести весьма актуально. При этом необходимо решить проблемы быстрого анализа большого объема количественной и качественной информации в условиях неполной определенности. Решение этих проблем возможно путем создания экспертных систем, содержащих блоки логико-вероятностного моделирования развития и анализа аварийных ситуаций в гидроэнергетических машинных агрегатах большой единичной мощности.

Процесс построения адекватной логико-вероятностной модели некоторого технического объекта или системы может быть сведен к решению задачи поиска аппроксимирующего образа

I_a , в каком-то смысле наиболее близком к идеальному I образу этого объекта [1]. Решение этой задачи можно свести к поиску наилучшего бинарного отношения g_o , которое является элементом или подмножеством из множества G ($g_o \subseteq G$) и отвечает соотношению $I_a g_o I$ при выполнении ограничений $I_a q_i U_i$ и $I q_i U_i$ ($q_i \subseteq Q$, $i = 1, 2, \dots, m$), где G и Q — некоторые фиксированные компактные множества, а U_i — заданные априори модели или изображения ограничений.

При этом можно использовать методы, основанные на представлении логических функций как упорядоченных множеств и комбинаторных (не символьных) приемах их преобразования или такие, когда для упорядочивания множеств строится декартово произведение, элементы которого лексикографически упорядочены, и нет необходимости записывать явно все его члены, а достаточно знать, как вычислить любой из них. Тогда благодаря арифметическим свойствам получаемых систем логических уравнений, которые они проявляют при их представлении в виде алгебраических структур по модулю 2, т. е. в алгебре Жегалкина, оказывается возможным сведение логических задач к «арифметическим» или подобным арифметическим. Это в общем случае позволяет представлять логические системы как линейные структуры [2], уравнения которых не содержат конъюнктивных элементов, а для ана-

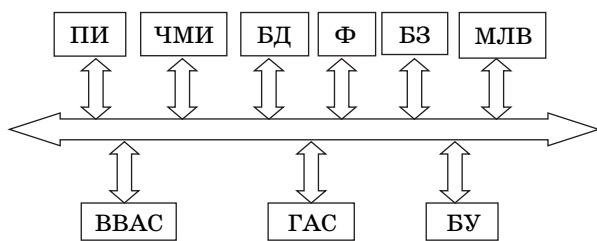
лиза и синтеза их структурных свойств использовать математический аппарат векторно-матричной алгебры.

Структура экспертной системы

Структура экспертной системы логико-вероятностной модели представлена на рис. 1.

База данных *БД* содержит сведения об оборудовании и связанных с ним контролируемых параметрах, а также априорные вероятности возможных аварийных и предаварийных событий. Некоторые данные заносятся в модель оператором перед началом сеанса моделирования посредством человеко-машинного интерфейса *ЧМИ*, например, априорные вероятности возможных аварийных и предаварийных событий для каждого блока. Другие данные поступают посредством приборного интерфейса *ПИ*, например, сведения о текущих значениях контролируемых параметров. Некоторые данные заносятся в процессе моделирования, например, текущее значение показателя связи аварийного события с анализируемым *i*-м объектом по *j*-му контролируемому параметру с индикатором отклонения *k*. Фрагмент *БД* показан в виде табл. 1.

Кроме этого, *БД* содержит сведения о действиях оператора при наступлении аварийного события $x(i, j, k)$ для *i*-го объекта по *j*-му контролируемому параметру с индикатором степени отклонения *k* контролируемого параметра от допуска, на-



■ Рис. 1. Структура экспертной системы

пример, при наступлении аварийного события $x(1, 1, 1)$ для блока $i = 1$ по контролируемому параметру $j = 1$ с индикатором отклонения $k = 1$ хранится следующая рекомендация оператору ГЭС $y(1, 1, 1)$: «Установить причину высокого уровня биения вала и устранить ее при проведении профилактических работ».

Фазификатор Φ анализирует степень несоответствия текущих значений контролируемых параметров допустимым и присваивает им ту или иную лингвистическую переменную, которая затем переводится в логическую, имеющую значение 0, если ее нет, и 1, если она наблюдается. Логические переменные, имеющие значение 1, заносятся в *БД*.

Пример правил, реализуемых в фазификаторе для получения логико-вероятностных переменных:

— если текущее значение амплитуды вибрации вала превышает допуск не более чем на 10 %, то $x(1, 1, 3)$ — «высокий уровень»;

— если текущее значение амплитуды вибрации вала превышает допуск более чем на 10 %, то $x(1, 1, 4)$ — «очень высокий уровень».

База знаний *БЗ* содержит продукционные правила следующего вида:

- если $x(i, j, k)$ с вероятностью $P\{x(i, j, k) = 1\}$, и $x(n, m, k)$ с вероятностью $P\{x(n, m, k) = 1\}$, и $x(p, q, k)$ с вероятностью $P\{x(p, q, k) = 1\}$, и т. д., то $y(i, j, k)$ с вероятностью $P\{y = 1\}$.

Например, если частота биения вала $x(1, 5, 2)$ значительно ниже с вероятностью $P = 0,6$, и амплитуда биения вала $x(1, 6, 2)$ высокая с вероятностью $P = 0,8$, и частота вибрации крышки турбины $x(1, 7, 1)$ значительно понижается с вероятностью $P = 0,8$, и наличие масла на поверхностях деталей и оборудования и в крышке гидротурбины $x(5, 4, 3)$ значительное с вероятностью $P = 0,8$, то «установить причину значительного понижения частоты биения вала и устранить во время профилактических работ» $y(1, 5, 2)$ с вероятностью $P = 0,3$.

■ Таблица 1

Обозначение события	Аварийные события							Связанные события				
	$\alpha_0 \cdot 10^{-7}$	$t(i, j, k)$	$b(i, j, k)$	λ	$\alpha(i, j, k) \cdot 10^{-7}$	$P(i, j, k, \lambda)$	$\psi(k, 0)$	Обозначение события	β	φ	q	$\psi(k, q)$
$x(1, 1, 2)$	1,48	4756	0	0	1,48	0	1	$x(7,75,2)$	5,15	0	2	0,16667
								$x(7,76,2)$			2	0,16667
								$x(7,77,2)$			1	0,5
								$x(7,79,2)$			2	0,16667
$x(1, 1, 1)$	1,48	4756	0	0	1,48	0	0,83	$x(7,75,1)$	5,15	0	2	0,33333
								$x(7,76,1)$			1	0,66667
								$x(7,77,1)$			1	0,66667
								$x(7,79,1)$			1	0,66667
$x(1, 1, 3)$	1,48	4756	0	0	1,48	0	1	$x(7,75,3)$	5,15	0	2	0,33333
								$x(7,76,3)$			1	0,66667
								$x(7,77,3)$			1	0,66667
								$x(7,79,3)$			2	0,33333

Машина логического вывода *МЛВ* подставляет в правила БЗ из БД логические переменные $x(i, j, k)$, имеющие значения 1, и получает соответствующие им $y(i, j, k)$.

Правила вычисления вероятностей $P\{y = 1\}$ изложены в работах [3, 4] и помещены в блок вычислитель вероятностей аварийных событий *ВВАС*.

База знаний формируется оператором до начала сеанса моделирования либо может быть универсальной — содержать все возможные сочетания событий « $x(i, j, k)$ » и « $y(i, j, k)$ » и заполняться при создании модели.

В режиме контроля *ВВАС* вычисляет значения вероятности $P_o(t_m(i, j, k))$ тех событий $x(i, j, k)$, для которых заданы базой данных текущее время эксплуатации $t_m(i, j, k)$, время наработки на отказ (t_o) и соответствующая вероятность безотказной работы $P_{\text{бo}}$, и записывает их в БД. В соответствии с «Методикой оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростанций» по ГОСТ 5616–89 величины $t_o = 27\,000$ ч и $P_{\text{бo}} = 0,996$. Очевидно, что $P_o(t_o) = 1 - P_{\text{бo}}(t_o)$ и что при $t_m(i, j, k) = 0$ $P_{\text{бo}}(t_m(i, j, k)) = 1$, а при увеличении времени эксплуатации вероятность $P_{\text{бo}}(t_m(i, j, k))$ убывает по экспоненциальному закону:

$$P_{\text{бo}}(t_m(i, j, k)) = -\exp(-\alpha_0 t_m(i, j, k)), \quad (1)$$

где коэффициент α_0 вычисляется в блоке *ВВАС* по уравнению (1) при заданных начальных t_0 и $P_{\text{бo}}$.

Если в процессе эксплуатации оборудования для каких-либо $x(i, j, 2)$ или $x(i, j, 4)$ *ВВАС* вычислит $P(i, j, 2) > 0,5$ или $P(i, j, 4) > 0,5$, то он выдает оператору через ЧМИ сообщение «*i*-е оборудование находится под угрозой аварии по *j*-му параметру».

В режиме моделирования или имитации аварийных событий *ВВАС* на каждом шаге эволюции системы пересчитывает по уравнению (1) вероятности событий $P_o(t_m(i, j, k))$ при наступлении той или иной аварийной ситуации в соответствии с алгоритмом, изложенным ниже, заменяя $t_m(i, j, k)$ на машинное (моделируемое) время $t(i, j, k) = t(i, j, k) + vd$, где v — текущая глубина моделирования, а d — шаг эволюции, и α_0 на

$$\alpha(i, j, k) = \alpha_0 \exp(\beta \varphi(i, j, k) b(i, j, k)). \quad (2)$$

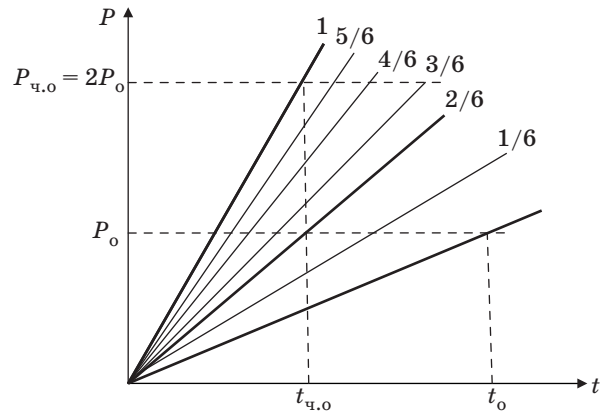
Параметры β , $\varphi(i, j, k)$ и $b(i, j, k)$ определяют при частичном отказе оборудования ($\lambda = 0,5$) в соответствии с изложенным ниже алгоритмом и рис. 2. При этом

$$\beta = \ln(\alpha_{\text{ч.o}} / \alpha_0), \quad (3)$$

где

$$\alpha_{\text{ч.o}} = -(1 / t(i, j, k)) \ln(1 - 2P_o). \quad (4)$$

Кроме того, *ВВАС* вычисляет вероятности решений $y(i, j, k)$ для соответствующих $x(i, j, k) = 1$.



■ Рис. 2. Графики изменения вероятности отказа при эволюции системы

Генератор аварийных событий *ГАС* используется в экспертной системе в режиме моделирования и содержит генератор случайных чисел от 0 до 1 с равномерным распределением; нормализатор вероятностей, пересчитывающий вероятности событий $P(t_m)$ в пропорциональные им нормированные значения $P^H(t_m)$ таким образом, чтобы сумма вероятностей всех событий была равна единице; определитель типа ситуации, который выявляет, что:

— произошло событие $x(1, 1, 1)$, если генератор случайных чисел выдает число, лежащее в промежутке от 0 до нормированной вероятности события $x(1, 1, 1)$;

— произошло событие $x(1, 1, 2)$, если генератор случайных чисел выдает число, лежащее в промежутке от значения нормированной вероятности события $x(1, 1, 1)$ до значения суммы нормированных значений вероятностей событий $x(1, 1, 1)$ и $x(1, 1, 2)$;

— произошло событие $x(1, 2, 1)$, если генератор случайных чисел выдает число, лежащее в промежутке от значения суммы нормированных значений вероятностей событий $x(1, 1, 1)$ и $x(1, 1, 2)$ до значения суммы нормированных значений вероятностей событий $x(1, 1, 1)$, $x(1, 1, 2)$ и $x(1, 2, 1)$, и т. д.

Человеко-машинный интерфейс обеспечивает ввод в экспертную систему данных от оператора и вывод заключений в зависимости от режима работы, либо ранжированные по вероятностям все возможные предаварийные и аварийные ситуации по блокам, либо рекомендации оператору при наступлении той или иной ситуации.

Приборный интерфейс обеспечивает ввод в модель данных от приборов, измеряющих текущее значение контролируемых параметров.

Блок управления *БУ* обеспечивает координацию работы всех блоков модели в двух режимах: контроль, или «Наблюдение» событий, и «Моде-

лирование» аварийных и предаварийных ситуаций. В режиме «Наблюдение» аварийное событие $x(i, j, k)$ определяется с помощью фазификатора в результате анализа контролируемых параметров.

Алгоритм моделирования

1. Задание начальных условий:

— для всех i, j, k $\alpha = \alpha_0$, $t_0 = 27\ 000$, $P_0 = 0,004$, $t = 0$, $P_{60} = 0,996$, $P = 0$, $P^H = 0$, $\varphi = 0$, $b = 0$, $q = 0$, $\lambda = 0$, где $i \in [1, N]$, $j \in [1, N^*]$, $k \in [1, 4]$;

— $\psi(1,0) = \psi(3,0) = 1$; $\psi(2,0) = \psi(4,0) = 5/6$;
 $\psi(1,1) = \psi(3,1) = 4/6$; $\psi(2,1) = \psi(4,1) = 3/6$; $\psi(1,2) = \psi(3,2) = 2/6$; $\psi(2,2) = \psi(4,2) = 1/6$;

— начальные значения счетчиков: $l(0) = 0$, $S^*(0) = 0$, $S(0) = 0$, $v = 0$;

— $d = 1000$ — шаг прогнозирования.

Значения d, n, m, ψ, k, V (заранее заданное время эволюции), q, λ задаются экспертами — специалистами по оборудованию.

Значения N, N^* задаются оператором ГЭС. Кроме того, оператор ГЭС может изменять значения n, m, ψ, t_0, P_0 для всех i, j, k .

Начальные значения t, β для всех i, j, k берутся из БД (таблицы) или задаются экспертами — специалистами по оборудованию.

Величины $t_0 = 27\ 000$ ч и $P_{60} = 0,996$ взяты из СТО 17330282.27.140.001-2006.

2. Вычисление исходного показателя надежности:

$$\alpha_0 = -1/t_0(\ln P_{60}).$$

3. Вычисление времени работы i -го объекта по j -му контролируемому параметру с индикатором отклонения k для всех i, j, k :

$$t(i, j, k) = t(i, j, k) + vd.$$

4. Вычисление текущего показателя α надежности i -го объекта по j -му контролируемому параметру с индикатором отклонения k для всех i, j, k :

$$\alpha(i, j, k) = \alpha_0 \exp(\beta \varphi(i, j, k) b(i, j, k)).$$

5. Вычисление текущей вероятности P аварийного события x для i -го объекта по j -му контролируемому параметру с индикатором отклонения k для всех i, j, k :

— если $\varphi(i, j, k) = 1$, то $P(i, j, k) = 1 - \exp(-\alpha(i, j, k) t(i, j, k))$;

— если $\varphi(i, j, k) = 0$ и $k = 2$ или $k = 4$, то $P(i, j, k) = 1 - \exp(-\alpha(i, j, k) t(i, j, k))$;

— если $\varphi(i, j, k) = 0$ и $k = 1$ или $k = 3$, то $P(i, j, k) = 2(1 - \exp(-\alpha(i, j, k) t(i, j, k)))$.

6. Если $P(i, j, 2) > 0,5$ или $P(i, j, 4) > 0,5$, то для данного $x(i, j, 2)$ или $x(i, j, 4)$ выдается сообщение «система под угрозой аварии».

7. Нормирование вероятности P^H аварийного события i -го объекта по j -му контролируемому

му параметру с индикатором отклонения k для всех i, j, k :

$$P^H(i, j, k) = P(i, j, k) / \sum_{i, j, k} P(i, j, k).$$

8. Вычисление значения w и вероятности $P^H(w)$ аварийного события i -го объекта по j -му контролируемому параметру с индикатором отклонения k с перебором всех индексов i, j, k :

$$w = [i, j, k] \text{ и } P^H(w) = P^H(i, j, k).$$

9. Вычисление начальной $S(w)$ и конечной $S^*(w)$ границы интервала нормированной вероятности $P^H(w)$ аварийного события:

$$S(w) = \sum_w P(w), \quad S^*(w) = \sum_{w+1} P(w+1) \text{ при } P^H(0) = 0.$$

10. Вычисление числа l наступления аварийного события x для всех i, j, k .

10.1. Для этого используется генератор случайных чисел с равномерным законом распределения в пределах от 0 до 1 с числом запусков, например, $h = 1000$.

Для каждого случайного числа r ищется интервал при следующих условиях: $r \geq S(w)$ и $r \leq S^*(w)$. Для этого интервала увеличиваем соответственно $l(w) = l(w) + 1$.

10.2. Определяем максимальное значение $l(w)$ и по нему находим наступившее событие x для i -го объекта по j -му контролируемому параметру с индикатором отклонения k . Для этого $x(i, j, k) = 1$, $q = 0$ и

1) если $k = 2$ или $k = 4$, то $\lambda = 1$, при этом оборудование заменяется или производится его капитальный ремонт, после чего текущее время для этого оборудования (для всех k) обнуляется, $t = 0$, и устанавливается $\varphi = 0$ для этих i, j, k ;

2) если $k = 1$ или $k = 3$, то $\lambda = 0,5$, оборудование не заменяется и не производится его капитальный ремонт, поэтому текущее время для этого оборудования не обнуляется и устанавливается $\varphi = 1$.

Вычисляется значение $\alpha_{ч.о}$ и β для этих i, j, k :
 $\alpha_{ч.о} = -(1 / t(i, j, k)) \ln(1 - 2P_0)$; $\beta = \ln(\alpha_{ч.о} / \alpha_0)$.

10.3. Если $x(i, j, k) = 1$, $\lambda = 0,5$, $q = 0$, то:

$$b(i, j, 1) = b(i, j, 3) = \psi(1,0) = \psi(3,0) = 1;$$

$$b(i, j, 2) = b(i, j, 4) = \psi(2,0) = \psi(4,0) = 5/6.$$

10.4. Для наступившего аварийного события $x(i, j, k)$ определяем по БД остальные связанные с ним события и соответствующие им $\psi(k, q)$.

10.5. Для найденных событий $\varphi = 1$ и $b(i, j, k) = \psi(k, q)$.

10.6. Для несвязанных событий $\varphi = 0$.

10.7. Все полученные значения $t(i, j, k)$, $P(i, j, k)$, $b(i, j, k)$, $\alpha(i, j, k)$, β , λ , φ помещаются в БД взамен исходных данных.

■ Таблица 2

Объект <i>i</i>		Контролируемые параметры <i>j</i>		Граничные значения <i>k</i>				Рекомендации	
№	Наименование	№	Наименование	1	2	3	4	<i>k</i> = 1 или <i>k</i> = 3	<i>k</i> = 2 или <i>k</i> = 4
1	Рабочие колеса поворотных гидротурбин	1	Мощность турбины	Меньше нормы	Значительно меньше нормы	Выше нормы	Значительно выше нормы	«Установить причину недобора мощности и устранить во время профилактических работ»	«Установить причину перебора мощности и устранить во время профилактических работ»
		2	Открытие направляющего аппарата	Немного не полностью закрыт	Значительно не полностью закрыт	Немного не полностью открыт	Значительно не полностью открыт	«Установить причину неполного закрытия направляющего аппарата и устранить ее во время профилактических работ»	«Установить причину неполного открытия направляющего аппарата и устранить ее во время профилактических работ»
		3	Напор (разность высот верхнего и нижнего бьефов)	Немного ниже номинального	Намного ниже номинального	Немного выше номинального	Намного выше номинального	«Принять меры по уменьшению расхода (сброса) воды»	«Принять меры по сбросу излишков воды»

10.8. Если аварийное событие наступило, т. е. $x(i, j, k) = 1$, то его значение, т. е. 1, передается в БЗ.

10.9. МЛВ анализирует правила БЗ, определяет соответствующее заключение $y(i, j, k) = 1$ и выдает на монитор оператора лингвистические сообщения и рекомендации, выбираемые из БД.

11. $v = v + 1$ и возвращение к шагу 2.

12. Если $v > V$, то остановка процесса эволюции.

Предложенный алгоритм реализован в виде программного продукта. Программный продукт написан на языке C# и скомпилирован в среде visual studio 2010 Professional.

База данных сформирована в среде Excel 2003 в виде таблицы, значения которой импортируются в программный продукт и экспортируются из программного продукта. При заполнении БД использовалась информация, полученная путем анализа таблицы, заполненной в соответствии с СТО 17330282.27.140.001-2006. Ее фрагмент приведен в табл. 2.

Заключение

Разработанная логико-вероятностная модель развития и анализа аварийных ситуаций позволяет моделировать и прогнозировать аварийные ситуации для большинства гидроэнергетических агрегатов большой единичной мощности с учетом влияния основных технических эксплуатационных показателей, вводимых операторами в БД моделей перед началом сеанса работы, и изменения контролируемых параметров. При этом учитывается «Методика оценки технического состояния основного оборудования гидроэлектростан-

ций» и влияние основных технических эксплуатационных показателей в соответствии с требованиями СТО 17330282.27.140.001-2006.

Достоверность прогноза и адекватность модели составляют от 70 до 85 %, зависят от точности задаваемых исходных параметров и могут быть повышены при коррекции модели по результатам апробации на характерных примерах.

Работа выполнена при поддержке государственного контракта № 16.515.12.5002.

Литература

1. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Алгебраические методы получения и преобразования изображений при технической диагностике сложных систем в условиях неполной определенности // Информационно-управляющие системы. 2008. Ч. 1. № 5. С. 10–14; Ч. 2. № 6. С. 22–25.
2. Дубаренко В. В., Курбанов В. Г. Метод приведения систем логических уравнений к форме линейных последовательностных машин // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2009. Т. 7. № 4. С. 37–41.
3. Городецкий А. Е., Тарасова И. Л. Нечеткое математическое моделирование плохо формализуемых процессов и систем. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. — 336 с.
4. Дубаренко В. В., Курбанов В. Г., Кучмин А. Ю. Об одном методе вычисления вероятностей логических функций // Информационно-управляющие системы. 2010. № 5. С. 2–7.

УДК 621.396.6.019.3:621.79

ВЕРОЯТНОСТНАЯ МОДЕЛЬ ДИФфуЗИОННОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДЛЯ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ ПРИБОРОВ

Н. Н. Иванов,
канд. техн. наук
ООО «Авангард», г. Санкт-Петербург

Даются рекомендации по применению вместо однопараметрического экспоненциального распределения двухпараметрического диффузионного немонотонного распределения при описании надежности паяных соединений радиоэлектронных приборов.

Ключевые слова — паяное соединение, вероятностная модель, радиоэлектронный прибор, надежность, диффузионное немонотонное распределение.

Введение

При исследовании надежности элементов конструкции радиоэлектронных приборов, в том числе паяных соединений выводов компонентов с контактными площадками коммутационных плат, наиболее распространенным является так называемый метод «физики отказов», который заключается в установлении аналитических зависимостей между показателями надежности и скоростью протекания физико-химических процессов на основании кинетических уравнений. В качестве таких зависимостей обычно используют линейное уравнение, степенное, Аррениуса, диффузии и др., при этом полагают, что полученные детерминированные зависимости описывают усредненные явления и включают усредненные величины. Это позволяет перейти в дальнейшем к установлению зависимостей некоторых основных показателей надежности (математического ожидания времени до отказа или интенсивности отказов) как функций физических свойств или физических параметров изделий и условий их эксплуатации.

Рассмотрение вариантов теоретических моделей надежности

Развитие физической (причинной) теории надежности, т. е. раскрытие механизмов отказов и их влияние на надежность изделий, имеет существенное значение и дает возможность эффек-

тивно совершенствовать технологию производства изделий и повышать их надежность. Однако чисто физический подход не позволяет непосредственно определять абсолютные значения вероятностных показателей надежности, в частности, находить закон распределения времени до отказа. Получаемые при таком подходе модели имеют частный характер — они или моделируют какой-либо преобладающий процесс деградации компонента, или выявляют многочисленные коэффициенты для конкретного режима эксплуатации. Распространение результатов таких моделей даже на аналогичный объект, но в другом режиме эксплуатации, может иметь только качественный характер.

Анализируя работы [1–4] по надежности радиоэлектронных приборов и систем, можно сделать вывод, что основная масса работ по проблеме надежности посвящена постановке и решению широкого круга оптимизационных задач, а также задачам, связанным с проблемой интервального оценивания показателей надежности по результатам испытаний или эксплуатации. Известно, что при решении практически всех задач надежности используют определенные теоретические модели надежности — функции распределения наработки до отказа, которые, в конечном итоге, определяют точность получаемых оценок. При этом методические погрешности, обусловленные выбором теоретической модели, могут иметь существенные значения и сводить практически на нет результаты оптимизационных задач.

Набор используемых на практике теоретических моделей надежности достаточно узок. Наиболее распространенным является однопараметрическое экспоненциальное распределение

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

где $P(t)$ — вероятность безотказной работы; λ — интенсивности отказов; t — время наработки.

Из двухпараметрических моделей чаще используется распределение Вейбулла

$$P(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta}, \quad (2)$$

где β — параметр формы (определяет форму распределения); η — параметр масштаба (определяет ресурсную характеристику распределения).

Из двухпараметрических моделей иногда применяются нормальное и логарифмически нормальное распределения, гамма- и альфа-распределения.

Исторически сложилось, что для решения задач надежности электронных изделий и систем стало общепринятым применение экспоненциального распределения, а для механических объектов — указанных двухпараметрических моделей. На протяжении многих лет расчеты надежности выполняются, как правило, с помощью однопараметрического экспоненциального распределения, поскольку использование вышеупомянутых более адекватных двухпараметрических моделей для получения точных решений встречает трудности математического характера.

Изложенный подход упрощает решение задач надежности, однако приводит к неадекватности результатов, так как накладывает на модель ряд существенных ограничений и делает ее весьма грубо приближенной. Например, экспоненциальное распределение абсолютно не учитывает старение и износ, т. е. не принимает во внимание возможность и необходимость выбора более качественных материалов при производстве радиоэлектронных изделий или при проведении профилактики в процессе эксплуатации. Экспоненциальное распределение имеет максимальную частоту отказов в начальный момент эксплуатации или испытания, т. е. на участке приработки, что может наблюдаться только при очень низком качестве изготовления. Другими словами, чем ниже уровень технологии и чем хуже выполнено изделие, тем более подходящей оказывается модель экспоненциального распределения для описания его надежности.

Особенно ярко недостатки однопараметрической экспоненциальной модели проявляются при решении такой задачи надежности, как дальний прогноз. Так, прогноз среднего ресурса высоконадежных изделий электронной техники или

прогноз гамма-процентного ресурса для очень малых уровней вероятности отказа отличается от прогноза более адекватных двухпараметрических моделей в 50–100 и более раз [5].

В последние годы все большее распространение получают вероятностно-физические модели надежности, которые могут успешно заменить существующий аппарат исследования и прогнозирования надежности, особенно для вновь разрабатываемых компонентов радиоэлектронных средств, в нашем случае — паяных соединений, причем таких, которые не имели отказов в процессе ускоренных испытаний.

Среди вероятностно-физических моделей, предлагаемых для оценки надежности технических объектов [6–8], представляет интерес диффузионное немонотонное распределение (DN-распределение).

Априорная оценка параметра формы DN-распределения (коэффициента вариации процесса деградации объекта) требует знания физических процессов, приводящих к отказу объекта, и условий нагружения, поскольку значение коэффициента вариации зависит от указанных условий. В работе [9] приведена таблица значений коэффициентов вариации для различных технических средств. Для объектов, не включенных в приведенную таблицу, априори определяют коэффициент вариации наработки на основании анализа процессов деградации, приводящих к отказам. При этом учитываются соотношения долевых вкладов процессов деградации и значения коэффициентов вариации основных типовых процессов деградации, приведенные в табл. 1.

Принимая во внимание объем и число рассмотренных данных (многих десятков выборок), на основании которых определены вышеуказанные диапазоны коэффициентов вариации, утверждается [9], что доверительная вероятность интервалов существенно выше 0,9.

■ **Таблица 1.** Значения коэффициентов вариации основных процессов деградации

Вид разрушения (процесс деградации)	Коэффициент вариации процесса разрушения
Статическое разрушение	0,05–0,15
Усталость:	
малоцикловая	0,15–0,40
многоцикловая	0,40–1,00
контактная	0,40–1,20
Износ:	
механо-химический	0,20–0,50
абразивный	0,40–1,00
старение	0,40–1,00
Электрические процессы (электролиз, миграция зарядов, электродиффузия)	0,70–1,50

Следует также отметить, что коэффициент вариации — это обобщенная характеристика процессов деградации объектов, он в меньшей степени зависит от конструктивных особенностей (размеров, типа конструкции и др.).

Принятие численного значения коэффициента вариации из указанных диапазонов табл. 1 в каждом конкретном случае диктуется соображениями общего характера: увеличение отношения нагрузки к пределу выносливости (прочности) относительно среднего статистического приводит к уменьшению коэффициента вариации и наоборот, уменьшение отношения нагрузки к пределу выносливости приводит к увеличению коэффициента вариации.

Значение коэффициента вариации наработки на отказ (между отказами) объекта остается тем же самым, если не меняется структура объекта (системы), поскольку коэффициент вариации наработки определяется элементами, обуславливающими деградацию и отказ этих элементов.

При значениях коэффициента вариации v от 0,3 до 1,3 максимальное отклонение составляет 4 %. В практике измерения случайных величин это достаточно высокая точность.

Основные аналитические выражения DN-распределения для ряда характеристик приведены в табл. 2, причем в выражении DN-распределения присутствует нормированная функция Лапласа

$$\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2}} dt.$$

В результате выражение DN-распределения будет выглядеть следующим образом:

$$DN(t; \mu, v) = \Phi\left(\frac{\mu - t}{v\sqrt{\mu t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu + t}{v\sqrt{\mu t}}\right).$$

■ Таблица 2. Основные аналитические выражения DN-распределения

Характеристика, обозначение	DN-распределение
Математическое ожидание	μ
Дисперсия	$\mu^2 v^2$
Коэффициент вариации	v
Вероятность безотказной работы $P(t)$	$\Phi\left(\frac{\mu - t}{v\sqrt{\mu t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu + t}{v\sqrt{\mu t}}\right)$
Интенсивность отказов $\lambda(t)$	$(vt\sqrt{2\pi t})^{-1} \sqrt{\mu} \exp\left[-\frac{(t-\mu)^2}{2v^2\mu t}\right]$ $\Phi\left(\frac{\mu - t}{v\sqrt{\mu t}}\right) - \exp\left(\frac{2}{v^2}\right) \Phi\left(-\frac{\mu + t}{v\sqrt{\mu t}}\right)$

Необходимо отметить существенное свойство, которым обладает DN-распределение, — устойчивость к операции свертки (например, отказ одного электронного модуля произошел при времени t_1 , а другой отказ другого электронного модуля произошел при времени t_2 , обе величины подчиняются DN-распределению, и сумма величин также подчиняется DN-распределению). Это означает, что DN-распределение может быть использовано для описания отказов при нелинейном изменении значения параметра. При этом неоднородный процесс делится на однородные участки, и в результате свертки суммарное время наработки будет иметь линейный вид.

В странах СНГ в 1997 г. принят ГОСТ 27.005–97 [6], предлагающий для изделий, имеющих различные виды отказов, двухпараметрические модели с распределениями диффузионного типа. Однако в Российской Федерации разработчики радиоэлектронной аппаратуры при расчете показателей надежности своих изделий, в том числе при определении вклада паяных соединений в общие показатели надежности аппаратуры, по-прежнему в качестве рекомендуемых используют однопараметрические модели.

В настоящее время в связи с резким усложнением радиоэлектронной аппаратуры, применением большого числа поверхностно монтируемых многовыводных компонентов новых конструкций, введением в практику ряда новых видов паяных соединений назрел вопрос о выборе адекватной модели отказов, учитываемой при расчетах в реальной практике. Ситуация усложнена еще и тем, что многие виды аппаратуры морально устаревают раньше физического износа и выводятся из эксплуатации без набора достаточных статистических данных о конкретных отказах элементов.

Функция распределения, используемая в качестве модели отказов, должна позволять выполнять расчет надежности систем на основе известных показателей надежности ее составных частей и обеспечивать применение единого математического аппарата, отвечающего требованиям инженерной практики для решения необходимых задач надежности на всех этапах проектирования, производства и эксплуатации. В то же время модель отказов должна обладать физической связью, т. е. отражать связь с физическими явлениями, приводящими к отказу.

Основной результат рассмотрения вопроса

Упомянутые выше строго вероятностные модели (однопараметрические и двухпараметрические) не связаны с физическими явлениями, приводящими к формированию распределения отказов, т. е. эти модели не имеют физического обоснования.

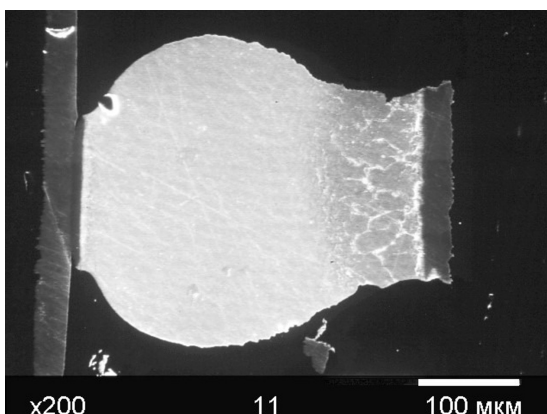
Вероятностно-физические модели, такие как диффузионное монотонное и диффузионное немонотонное распределения, специально построенные для описания отказов объектов на основе анализа физических процессов деградации, приводящих к отказам, являются, в отличие от строго вероятностных моделей, физически обоснованными моделями. Такие модели учитывают физическую природу отказов и позволяют использовать характеристики физических явлений, имеющих место в объекте, для оценки надежности.

Вероятностно-физические модели соответствуют широкому классу процессов деградации (усталости, изнашиванию, коррозии, старению и др.). Внешние факторы, определяющие надежность и связанные с конструкцией изделий, свойствами используемых материалов, технологией изготовления, уровнем производства и эксплуатации, в конечном итоге влияют на среднюю скорость процессов деградации и рассеяние реализаций, не меняя схемы формализации и типа распределения. Тип же распределения в рассматриваемой модели определяется характером физического процесса деградации, в частности, монотонным или немонотонным видом его реализаций.

Рассматривая паяные соединения выводов компонентов радиоэлектронных приборов с контактными площадками коммутационных плат в качестве объекта исследования надежности, следует учесть ряд факторов.

Паяные соединения представляют собой сложную конструкцию, состоящую из нескольких слоев разнородных материалов, каждый из которых имеет свои физические и химические свойства, привнесенные в момент изготовления. Паяным соединениям присущи дефекты реализации и создающиеся при эксплуатации механические напряжения.

На фотографии показано сечение паяного соединения шарикового вывода компонента типа



■ Сечение паяного соединения шарикового вывода компонента типа BGA

BGA с контактной площадкой печатной платы. Слева находится медная контактная площадка полимерного корпуса BGA, в средней части — шариковый вывод из бессвинцового припоя, в правой части — медная контактная площадка печатной платы. Возле контактной площадки платы виден слой оловянно-свинцового припоя, частично расплавившего шариковый вывод. В припое наблюдаются кристаллиты основной фазы и прослойки промежуточной фазы. На границе припой-медь имеются слои интерметаллидов олово-медь и олово-золото. В зависимости от режимов пайки и условий последующей эксплуатации распределение фаз в припое и, соответственно, надежность соединения будут различаться [10].

При рассмотрении физики отказов паяных соединений особый интерес представляет такой объект, как припой. Припой обладает уникальными свойствами, зависящими от температуры, времени и приложенного механического напряжения. Например, эвтектический припой олово-свинец обладает свойством текучести и релаксации напряжений при температуре выше 20 °С, тогда как ниже минус 20 °С он ведет себя как прочие металлы и выдерживает длительные нагрузки без деформации. Чем больше температура превышает 20 °С и (или) чем больше уровень нагрузок, тем быстрее проявится свойство текучести и релаксации припоя. Несмотря на то, что могут иметь место механизмы отказа, связанные с циклической или монотонной перегрузками, главную угрозу надежности представляет усталостное повреждение типа напряжение-релаксация.

Свой вклад в процесс нарастания вероятности отказа представленного монтажного соединения вносят также процессы потери адгезии контактных площадок к полимерной основе корпуса и платы, вероятное газовыделение из полимера и возможных микропустот (особенно при закипании захваченной из атмосферы воды при повышенных температурах эксплуатации).

Процессы, происходящие в паяном соединении при эксплуатации, развиваются не монотонно, одни процессы взаимосвязаны, другие развиваются самостоятельно.

Для рассматриваемого вопроса следует отметить, что, согласно работе [11], для паяных соединений поверхностно монтируемых компонентов не найдено никаких свидетельств наличия периода случайных отказов. Вполне вероятно, что все время эксплуатации интенсивность отказов описывается участками приработочных и износных отказов. Следует отметить, что для таких паяных соединений вероятность отказов на приработочном участке крайне мала, даже с учетом разброса экспериментальных значений, достигающего одного порядка величины.

Вероятность накопленных отказов компонента и его паяных соединений равна сумме вероятностей отказа компонента и соединений. Следовательно, для электронной сборки отказы за небольшой срок службы будут обусловлены, скорее, отказами компонентов, а за долгий срок — отказами паяных соединений.

Учитывая изложенное, для описания поведения паяного соединения в наилучшей степени подходит модель на основе диффузионного немонотонного распределения.

Математические модели процессов деградации в виде непрерывных марковских процессов (DN-распределение) представляются, несомненно, более адекватными для случайных процессов деградации и разрушений паяных соединений. Кроме того, диффузионные распределения имеют достаточно простые выражения для разнообразных оценок своих параметров, а также для всех основных показателей надежности. В частности, диффузионные распределения гораздо проще и удобнее при использовании по сравнению с такими двухпараметрическими моделями, как Вейбулла, гамма-распределение, альфа-распределение и др.

Диффузионные распределения, как вероятностно-физические модели надежности, имеют большое преимущество перед строго вероятностными моделями в том, что их параметры могут быть оценены как на основе статистики отказов (в этом случае они рассматриваются как строго вероятностные модели), так и на основании анализа статистических характеристик физического процесса, приводящего к отказу, а также при совместном использовании статистической информации обоих типов.

Решение основных задач надежности сводится, в конечном итоге, к оценке параметров распределения искомой величины (наработки до отказа, на отказ, ресурс и т. д.). Важнейшим фактором, способствующим решению разнообразных задач надежности с использованием диффузионных распределений, является то, что параметр формы этих распределений — коэффициент вариации — представляет собой обобщенную характеристику изучаемых процессов (процесса разрушения и распределения наработки). Коэффициент вариации как обобщенная характеристика с достаточной для инженерной практики

точностью может быть оценен априори на основании многолетних исследований как процессов разрушений (прочности, усталости, изнашивания и др.), так и статистических данных об отказах при испытаниях и эксплуатации изделий-аналогов. Именно благодаря конкретной физической интерпретации параметров диффузионных распределений удалось на их основе решить такие существенные задачи надежности, как расчет надежности систем, планирование контрольных и определительных испытаний на надежность, расчет объема запасных частей, долговечности электронной аппаратуры и др.

Подобный подход к выбору диффузионного немонотонного распределения в качестве модели отказов паяных соединений начал применяться в открытом акционерном обществе «Авангард» (Санкт-Петербург) при решении вопросов создания и применения базовой технологии автоматизированного монтажа компонентов различных радиоэлектронных приборов и систем, в том числе с использованием компонентов, рассчитанных под бессвинцовую пайку [12].

Значительный эффект дает использование диффузионных распределений в задачах планирования контрольных испытаний на надежность. Планы контроля надежности на основе диффузионных распределений являются существенно экономичнее. Для того чтобы с требуемой достоверностью и точностью сделать заключение о соответствии надежности испытываемых изделий контролируемому уровню, необходимо в 1,5–2,0 раза меньший объем испытаний. Это означает, что внедрение планов контроля надежности на основе предлагаемого аппарата снизит затраты на испытания до 30 % и более.

Заключение

Таким образом, имеются все основания для внедрения математического аппарата более адекватных двухпараметрических моделей надежности в практику исследования надежности как элементов, так и систем. Высокая универсальность двухпараметрических диффузионных распределений позволяет решить необходимую задачу унификации методов определения надежности элементной базы и технических систем.

Литература

1. Каргашов Г. Д., Куликов В. В. Об оптимальном режиме предварительных исследований // Надежность и контроль качества. 1984. № 4. С. 38–44.
2. Манулик С. А. Использование моделей отказов при оценке результатов ускоренных испытаний интегральных схем // Надежность и контроль качества. 1987. № 1. С. 24–30.

3. Куликов И. В. Экспериментальное определение энергии активации процесса старения изделий по результатам их форсированных испытаний // Электронная техника. Сер. 8. 1983. Вып. 6(105). С. 62–67.
4. Аронов И. З., Бурдасов Е. И. Оценка надежности по результатам сокращенных испытаний. — М.: Стандарты, 1987. — 184 с.
5. Стрельников В. П., Антипенко К. А. О методических погрешностях прогнозирования ресурса высоконадежных изделий электронной техники // Математические машины и системы. 2004. № 3. С. 164–167.
6. ГОСТ 27.005–97. Надежность в технике. Модели отказов. Основные положения. — Киев: Изд-во стандартов, 1999. — 43 с.
7. ДСТУ 2862-94. Надежность техники. Методы расчета показателей надежности. Общие требования. — Киев: Изд-во стандартов, 1995. — 39 с.
8. ДСТУ 3004-95. Надежность техники. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным. — Киев: Изд-во стандартов, 1995. — 122 с.
9. Стрельников В. П., Федухин А. В. Оценка и прогнозирование надежности электронных элементов и систем. — Киев: Логос, 2002. — 486 с.
10. Иванов Н. Н. О применении элементов бессвинцовых технологий при создании РЭА для жестких условий эксплуатации // Вопросы радиоэлектроники. Сер. ОТ. 2010. Вып. 2. С. 141–146.
11. IPC-SM-785. Руководящие указания по ускоренным методам испытаний на надежность паяных соединений технологии поверхностного монтажа. <http://pcblayout.ru/pcb/download/ipc-sm-785.pdf> (дата обращения: 01.04.2012).
12. Иванов Н. Н., Ивин В. Д. ЭКБ импортного производства в бессвинцовом исполнении в аппаратуре ответственного применения // Петербургский журнал электроники. № 3–4 (68–69). 2011. С. 155–164.

ПАМЯТКА ДЛЯ АВТОРОВ

Поступающие в редакцию статьи проходят обязательное рецензирование.

При наличии положительной рецензии статья рассматривается редакционной коллегией. Принятая в печать статья направляется автору для согласования редакторских правок. После согласования автор представляет в редакцию окончательный вариант текста статьи.

Процедуры согласования текста статьи могут осуществляться как непосредственно в редакции, так и по e-mail (80x@mail.ru).

При отклонении статьи редакция представляет автору мотивированное заключение и рецензию, при необходимости доработать статью — рецензию. Рукописи не возвращаются.

Редакция журнала напоминает, что ответственность за достоверность и точность рекламных материалов несут рекламодатели.

УДК 681.51

МОДЕЛЬ КАНАЛА УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С НЕЧЕТКИМ ЛОГИЧЕСКИМ КОНТРОЛЛЕРОМ

Г. Н. Ульянов,

доктор техн. наук, профессор

С. А. Иванов,

канд. техн. наук

Михайловская военная артиллерийская академия, г. Санкт-Петербург

А. Г. Владыко,

канд. техн. наук

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Рассматривается модель канала управления с нечетким логическим контроллером в системе управления беспилотного летательного аппарата. Формируется методика проектирования модели системы регулирования с нечетким логическим контроллером. Приводятся результаты имитационного моделирования системы с нечетким логическим контроллером.

Ключевые слова — система управления, беспилотный летательный аппарат, нечеткая логика.

Введение

Функционирование навигационно-управляющих комплексов беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) направлено на решение двух задач: определение координат БПЛА в пространстве и управление им по навигационным параметрам. Известны универсальные решения задачи навигации [1], в то же время оптимальное решение задачи управления полетом испытывает значительные трудности, связанные с применением классической теории управления и регулирования [2].

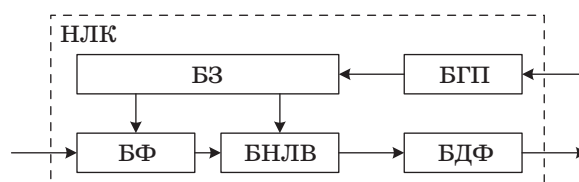
Перспективным направлением развития вопросов пилотирования является применение нечеткого логического вывода в системе управления БПЛА [3]. Нечеткий логический вывод позволяет использовать для управления информацию качественного характера, которую невозможно формализовать при реализации традиционных законов регулирования. При этом нечеткое регулирование оказывается малочувствительным к возмущениям в определенном диапазоне и демонстрирует лучшие характеристики по сравнению с классическими регуляторами.

Нечеткий логический контроллер

Рассмотрим модель системы управления с нечетким логическим контроллером (НЛК) при вводе его в систему управления БПЛА в качестве альтернативы классическим регуляторам. В этом случае НЛК осуществляет оценку входящих воздействий, например ошибку регулирования и ее производную, и выбор управляющего сигнала в соответствии с заданным алгоритмом управления.

Функциональная схема НЛК представлена на рис. 1.

Блок фазификации реализует преобразование входных сигналов в лингвистические переменные



■ **Рис. 1.** Функциональная схема НЛК: БЗ — база знаний; БФ — блок фазификации; БНЛВ — блок нечеткого логического вывода; БГП — блок генерации параметров; БДФ — блок дефазификации

ные, заданные на терм-множестве допустимых значений посредством функций принадлежности.

Известно, что для НЛК, функционирующего в качестве регулятора, более эффективной является его настройка по методу Такаги — Сугено.

Тогда нечеткий логический вывод в соответствии с работой [4] реализуется следующим образом:

$$\bigcup_{r=1}^{l_j} \left(\bigcap_{i=1}^n x_i = a_{i,jr} \right) \rightarrow y = b_{j0} + \sum_{i=1, n} b_{ji} \cdot x_i; \quad j=1, m, \quad (1)$$

где x_i — входная переменная; y — выходная переменная; $a_{i,jr} = \int \mu_{jr}(x_i) / x_i$ — нечеткое терм-множество, принадлежность к которому переменной x_i определяется посредством функции принадлежности $\mu_{jr}(x_i)$; b_{ji} — настраиваемые коэффициенты.

Продукции в БЗ реализуют набор линейных законов управления, при этом одновременно могут выполняться несколько законов с различными степенями принадлежности.

Степени принадлежности входных переменных x_i к значениям выходной переменной $d_j = b_{j0} + \sum_{i=1, n} b_{ji} \cdot x_i$ рассчитываются как

$$\mu_{d_j} = \bigcup_{r=1, k_j} w_{jr} \bigcap_{i=1, n} [\mu_{jr}(x_i)], \quad j=1, m, \quad (2)$$

где w_{jr} — вес терм-множества.

В результате получаем нечеткое множество \bar{y} , соответствующее входному вектору X :

$$\bar{y} = \frac{\mu_{d_1}(X)}{d_1} + \frac{\mu_{d_2}(X)}{d_2} + \dots + \frac{\mu_{d_m}(X)}{d_m}. \quad (3)$$

Блок дефазификации вычисляет результирующее значение выхода y посредством дефазификации нечеткого множества \bar{y} , как взвешенное среднее.

Проблема создания БЗ представляет одну из ключевых задач при построении НЛК. Для ее решения используются разные методы, такие как опрос экспертов, отслеживание желаемой траектории управления, анализ характеристик замкнутой системы.

В данной работе отмеченная проблема решается за счет частичной автоматизации процесса анализа характеристик замкнутой системы и процесса синтеза БЗ. Параметры НЛК, а именно область определения входных переменных, количество терм-множеств, количество продукций БЗ, вид функций принадлежности, определяются посредством БГП через адаптивную сеть нечеткого вывода.

Реализованная в системе MatLab адаптивная сеть нечеткого вывода представляет собой систему нечеткого вывода Такаги — Сугено в виде пя-

тислойной нейронной сети прямого распространения. Для обучения сети применяется алгоритм обратного распространения ошибки или сочетания метода наименьших квадратов с алгоритмом обратного распространения.

Особенностью подхода является наличие этапа дополнительной настройки функций принадлежности в антецедентах и консеквентах продукций.

Таким образом, методика проектирования модели системы регулирования с НЛК сводится к следующему:

1) производится выбор исходного варианта желаемой траектории на прототипе замкнутой системы управления, например с ПИ-регулятором и объектом третьего порядка;

2) в качестве входных измеряемых координат выбирается ошибка и производная ошибки регулирования, а в качестве выходной координаты — выход ПИ-регулятора;

3) при моделировании данные входов и выходы записываются в файл в виде матрицы с заданным шагом;

4) вводится полученная матрица в БГП на генерирование параметров НЛК;

5) тестируется модель системы с НЛК и при необходимости проводится дополнительная настройка параметров НЛК по требуемым показателям качества.

Система управления каналом БПЛА с НЛК

Для обеспечения полной автоматизации управления полетом необходимы каналы управления двигателем, рулем высоты, элеронами, рулем направления.

Канал управления двигателем осуществляет регулирование тяги в соответствии с заданной программой полета. Три других канала управления обеспечивают необходимое угловое положение аппарата в пространстве.

Ограничимся в данной статье рассмотрением системы регулирования с НЛК в канале управления двигателем.

Положение дроссельной заслонки изменяет режим работы двигателя и таким образом воздействует на тягу винта и на скорость полета.

Передаточная функция БПЛА по скорости, выраженная через линеаризованные коэффициенты, имеет вид

$$W_{\delta_{др}}^{V_k} = \frac{K_{\delta_{др}}^{V_k 3} s^3 + K_{\delta_{др}}^{V_k 2} s^2 + K_{\delta_{др}}^{V_k 1} s^1 + K_{\delta_{др}}^{V_k 0}}{D_p^{s4} s^4 + D_p^{s3} s^3 + D_p^{s2} s^2 + D_p^{s1} s^1 + D_p^{s0}}, \quad (4)$$

где $K_{\delta_{др}}^{V_k j}$ и $D_p^{s i}$ — коэффициенты B и A матриц коэффициентов линеаризованной модели $\dot{X} = AX + BU$.

Значения коэффициентов зависят от параметров вектора состояния X и вектора управления U , геометрических и массо-инерционных характеристик БПЛА, параметров атмосферы и скорости ветра.

Введем ограничения по опорной траектории и типу БПЛА. Выберем прямолинейный горизонтальный полет в качестве опорной траектории и параметры рассмотренного в работе [5] крылатого малоразмерного БПЛА самолетной схемы среднего радиуса действия со стартовой массой до 100 кг.

Тогда имеем следующие параметры вектора состояния в опорной точке:

- модуль истинной скорости БПЛА в нормальной земной системе координат $V_k = 44$ м/с;
- высота полета $H = 1000$ м;
- угол атаки $\alpha_k = 0,03665$ рад;
- угол скольжения $\beta_k = 0$ рад;
- угол отклонения дроссельной заслонки $\delta_{др} = 0,8203$ рад;
- углы отклонения руля высоты, руля направления, правого и левого элеронов $\delta_{р.в} = \delta_{р.н} = \delta_{п.э} = \delta_{л.э} = 0$ рад;
- угловые скорости $\omega_x = \omega_y = \omega_z = 0$ рад/с;
- траекторный угол крена $\gamma_k = 0$ рад;
- угол наклона траектории $\Theta = 0$ рад;
- скорости ветра $W_x = W_y = W_z = 0$ м/с.

Структурная схема системы управления скоростью БПЛА с ПИ-регулятором представлена на рис. 2.

Коэффициенты ПИ-регулятора подобраны из условия минимального изменения амплитудно-фазовой частотной характеристики в области частоты среза.

Переходные характеристики разгона БПЛА и изменения положения дроссельной заслонки показаны на рис. 3.

Для синтеза параметров НЛК выбираем в качестве входных измеряемых координат ошибку и производную ошибки регулирования, а в качестве выходной координаты — выход ПИ-регулятора.

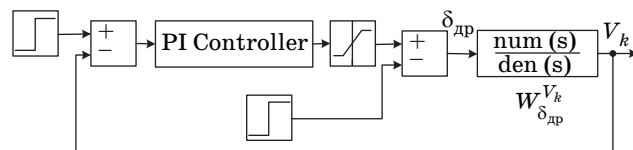
Тогда для двух входных переменных, системы с полным перебором продукции и одной выходной переменной получим в соответствии с (1) модель Такаги — Сугено первого порядка

$$\bigcup_{r=1}^n \left(\bigcap_{i=1}^2 x_i = a_{i,jr} \right) \rightarrow y = b_{j0} + b_{j1}x_i, \quad j=1, m, \quad (5)$$

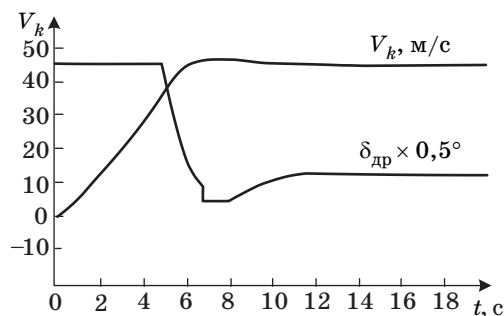
где b_{j0} и b_{j1} — аналоги коэффициентов усиления пропорционального и интегрального каналов ПИ-регулятора.

Построим структурную схему системы управления скоростью БПЛА с НЛК (рис. 4).

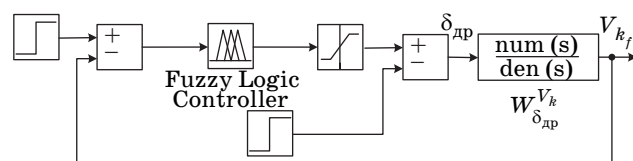
По результатам моделирования получаем идентичные переходные характеристики разгона БПЛА с НЛК и ПИ-регулятором.



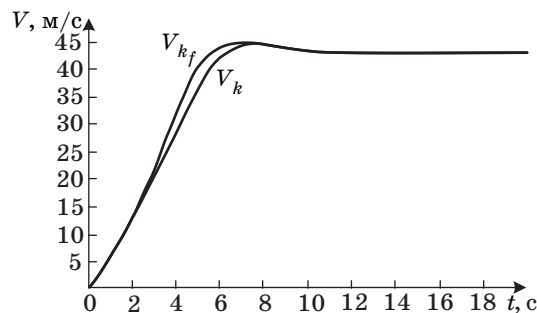
■ Рис. 2. Структурная схема системы управления скоростью БПЛА с ПИ-регулятором



■ Рис. 3. График изменения скорости полета БПЛА и положения дроссельной заслонки с ПИ-регулятором



■ Рис. 4. Структурная схема системы управления скоростью БПЛА с НЛК



■ Рис. 5. Сравнительные переходные характеристики разгона БПЛА с ПИ-регулятором и НЛК

Применим тонкую настройку параметров НЛК в целях обеспечения повышенного быстродействия системы в пределах границ устойчивости.

Сравнительные переходные характеристики разгона БПЛА с ПИ-регулятором (V_k) и НЛК (V_{kf}) приведены на рис. 5.

Из графика видно, что выход на заданную скорость система с НЛК выполняет быстрее, имеет место перерегулирование по скорости, аналогичное системе с ПИ-регулятором, статическая ошибка отсутствует.

Исследования при меньших изменениях заданной скорости показали отсутствие перерегулирования.

Заключение

Существующие в настоящее время методы синтеза систем управления БПЛА заключаются в анализе и доводке структуры регуляторов с приближенными параметрами с использованием нелинейной модели БПЛА.

Приведенная в данной статье методика синтеза регулирующего органа облегчает задачу про-

ектирования систем управления БПЛА, обеспечивающих требуемый режим в соответствии с программой полета.

Полученные результаты имитационного моделирования системы с НЛК в канале управления двигателем свидетельствуют о правомерности выбранного подхода и позволяют рассматривать возможность построения взаимосвязанной системы управления по всем каналам управления.

Исследования проводились в рамках федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Литература

1. Владыко А. Г., Иванов С. А., Ульянов Г. Н. Оценка точности определения координат БПЛА модифицированными разностно-дальномерным и дальностно-дальномерными методами // Морская радиоэлектроника. 2011. № 4. С. 8–11.
2. Голубев И. С. Основы устройства, проектирования, конструирования и производства летательных аппаратов (дистанционно-пилотируемые летательные аппараты). — М.: МАИ, 2006. — 524 с.
3. Матвеев Е. В., Глинчиков В. А. Нечеткий логический вывод в системе управления беспилотного летательного аппарата // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и Технологии. 2011. № 4. С. 79–91.
4. Штовба С. Д. Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. <http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/index.php> (дата обращения: 01.01.2012).
5. Фролова Л. Е. Синтез автопилота беспилотного летательного аппарата заданного класса на основе многоуровневой системы критериев оптимальности: Дис. ... канд. техн. наук: 05.13.05. — Рыбинск, 2008. — 160 с.

УДК 004.896

МЕТОД АВТОМАТИЧЕСКОГО РАСПОЗНАВАНИЯ ГОЛОСОВЫХ КОМАНД И НЕРЕЧЕВЫХ АКУСТИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ

А. Л. Ронжин,

доктор техн. наук, доцент

С. В. Глазков,

аспирант

Санкт-Петербургский институт информатики и автоматизации РАН

Рассматривается метод анализа акустических данных, позволяющий классифицировать по голосовым командам пользователя и неречевым звукам текущую ситуацию в помещении и принять меры в случае возникновения чрезвычайных обстоятельств. Разработанный метод распознавания акустических элементов основан на применении математического аппарата скрытых марковских моделей.

Ключевые слова — автоматическое распознавание речи, цифровая обработка сигналов, ассистивные системы, интеллектуальное пространство.

Введение

Разработка проактивных сервисов и много-модальных интерфейсов, обеспечивающих бесконтактный ненавязчивый способ взаимодействия с автоматизированными системами жизнеобеспечения и безопасности, сейчас особенно актуальна в связи с наблюдаемой тенденцией увеличения процента граждан пожилого возраста и людей с ограниченными возможностями [1]. За рубежом активно разрабатываются так называемые ассистивные системы, ориентированные на улучшение комфорта, безопасности и повышение здоровья и независимости людей [2, 3]. Системы, связанные с обеспечением комфорта, направлены на автоматизацию и увеличение дружелюбности интерфейсов стандартного бытового оборудования. Скрининговые системы мониторинга здоровья человека определяют текущее состояние человека на основе данных физиологических сенсоров: частоты пульса, веса и других параметров. Системы безопасности следят за возникновением чрезвычайных ситуаций, например пожара, протечки, взлома, а также падения человека, стонов, плача.

Технологии автоматической обработки звуковой информации играют важную роль в обеспечении и безопасности жизнедеятельности, автоматизации управления бытовым оборудованием и мониторинге текущего состояния человека [4]. Система определения падения звука человека,

отличающаяся использованием метода трехмерной локализации источника звука, описана в работе [5]. Диалоговая система, включающая модули автоматического распознавания и синтеза речи, успешно применяется [6] для определения физических недомоганий или снижения когнитивных способностей на основе анализа речевых ответов пользователя. Анализ видеоданных совместно с неречевыми звуковыми данными используется в проекте Sweet Home [7] для локализации пользователя в помещении.

Существующие методы анализа акустических элементов

Хотя речь является наиболее информативным акустическим событием, другие типы звуков, произведенные человеком или какими-либо объектами, также несут полезную информацию для ассистивных интеллектуальных систем. Распознавание неречевых акустических событий, например аплодисментов, смеха, кашля, перемещения кресла, скрипа двери и т. д., может помочь в определении и описании текущей активности человека. Кроме того, за счет определения неречевых звуков и их исключения из аудиосигнала можно увеличить точность системы автоматического распознавания речи.

Первые системы идентификации акустических событий обладали небольшим словарем для обработки ограниченного набора звуков. В боль-

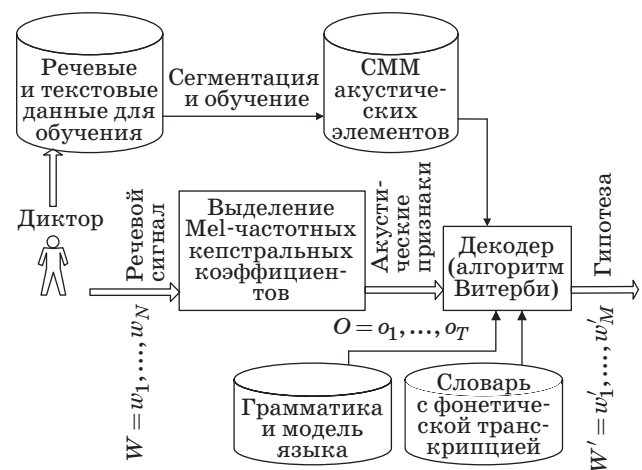
шинстве систем при параметрическом представлении звукового сигнала используются классические методы цифровой обработки речи: метод кепстральных коэффициентов на шкале мел (MFCC), метод коэффициентов перцептивного линейного предсказания (PLP), а при распознавании — скрытые марковские модели (СММ) или модели гауссовых смесей. В работе [8] авторы сравнивают между собой различные признаки и классификаторы, относящиеся к таким повседневным контекстам, как ресторан, машина, библиотека и офис. Система использует метод MFCC и их первую производную по времени, а также СММ. В работе [9] представлена система определения акустических событий в записях совещаний. Модели событий созданы с использованием сети СММ, их размер и топология выбраны на основе обучения распознавания изолированных событий. Авторами также учитывается эффект влияния внешнего шума на точность идентификации акустических событий.

Эксперименты [10] показали, что в среднем люди способны распознавать повседневный аудиоконтекст в 70 % случаев, и большинство ошибок распознавания возникают между контекстами одних типов. Также было показано, что распознанные отдельные акустические события из звукового сигнала для человеческого восприятия аудиоконтекста являются отдельной репликой. Однако большинство предложенных систем распознавания контекста моделируют глобальные акустические характеристики аудиоконтекста, а не акустические события [11]. В работе [10] авторы представляют систему распознавания контекста, основанную на определении индивидуальных акустических событий, а также метод, основанный на предположении, что различные контекстные пространства, такие как улица или ресторан, характеризуются возникновением определенных акустических событий. Контекст смоделирован с использованием гистограмм событий, собранных из аннотированных записей. Работа системы разделена на два этапа: определение звукового события и распознавание контекста. На первом осуществляется выделение событий, присутствующих в тестируемом контексте. Гистограмма событий, построенная по результату работы системы, приводится в соответствии с моделями контекста. Оценка системы осуществляется с помощью десяти контекстов, которые включают в себя одинаковые события. Средняя точность классификации акустических событий составила 89 % [10]. Объединение системы распознавания контекста с обычной системой распознавания аудиосигнала позволило повысить точность ее работы до 92 %.

Метод распознавания акустических событий в ассистивном интеллектуальном пространстве

При разработке ассистивного многомодального интеллектуального пространства использовалось многоканальное оборудование записи и обработки видео- и аудиосигналов [12, 13]. Схема работы метода распознавания акустических элементов, предусматривающая два режима [4]: обучение моделей и декодирование речи, — показана на рисунке.

При разработке системы распознавания акустических событий в ассистивном интеллектуальном пространстве был составлен лексический словарь, включающий четыре голосовые команды: множество $V = \{\text{"yes"}, \text{"no"}, \text{"help"}, \text{"trouble"}\}$ и тринадцать типов акустических событий: множество $E = \{\text{"throatcleaning"}, \text{"cry"}, \text{"cough"}, \text{"applause"}, \text{"fall"}, \text{"step"}, \text{"keydropping"}, \text{"keyjingle"}, \text{"chairmoving"}, \text{"door"}, \text{"paperwork"}, \text{"phoning"}, \text{"water"}\}$, по которым можно судить о текущей обстановке в помещении. Неречевые акустические элементы также следует разделить на артефакты речи; звуки, издаваемые человеком в процессе жизнедеятельности; звуки, возникающие в процессе взаимодействия человека с предметами, а также искусственные или естественные звуки, но не связанные с человеком, т. е. звуки других объектов. В табл. 1 представлена классификация анализируемых акустических элементов по перечисленным группам. Также вводится множество тревожных акустических событий, состоящее из следующих речевых и неречевых элементов: $E = \{\text{"moan"}, \text{"cough"}, \text{"fall"}, \text{"keydropping"}, \text{"help"}, \text{"trouble"}\}$, — появление которых чаще всего случается в чрезвычайной ситуации. Данное множество может быть расширено в зависимости от условий, где применяется система распознавания речи, и особенностей жизнедеятельности пациентов.



■ Схема работы метода распознавания акустических элементов

■ Таблица 1. Классификация анализируемых акустических элементов

Название элемента	Обозначение	Принадлежность к множеству					
		голосовых команд	неречевых элементов				
			Артефакты	Звуки, издаваемые человеком	Звуки при взаимодействии человека с предметами	Звуки других объектов	тревожных акустических событий
Прочищение горла	th		+				
Стон	mo		+				+
Кашель	co		+				
Аплодисменты	ap			+			
Падение	fa			+			+
Шаги	st			+			
Звон ключей	kd				+		
Падение ключей	kj				+		+
Перемещение кресла	cm				+		
Стук двери	ds				+		
Шелест бумаги	pw				+		
Звонок телефона	pr					+	
Течение воды	wa					+	
Да	ys	+					
Нет	no	+					
Помогите	hl	+					+
Проблема	tr	+					+

Для обучения моделей акустических элементов был собран корпус из 2600 аудиозаписей общей длительностью 110 мин. При подготовке корпуса каждый элемент произносился изолированно и сохранялся в отдельный файл. В табл. 2 приведены спектральные и временные характеристики акустических элементов в собранном корпусе. Используются следующие сокращения: name — обозначение акустического элемента; count — количество элементов данного типа в корпусе; dur_mean — средняя длительность элемента; dur_v_mean — средняя длительность вокализованного участка элемента; dur_u_mean — средняя длительность невокализованного участка элемента; count_pitch — количество элементов данного типа с вокализованным участком в собранном корпусе; pitch_mean — средняя частота основного тона вокализованного участка элемента.

Анализируя временные характеристики элементов, следует отметить, что длительность записанных в корпусе звуковых файлов варьируется от 0,5 до 9 с. Однако неречевые элементы, свя-

■ Таблица 2. Спектральные и временные характеристики элементов в корпусе

name	count, шт.	dur_mean, мс	dur_u_mean		dur_v_mean		count_pitch, шт.	pitch_mean, Гц
			мс	%	мс	%		
th	200	1,691	1,634	96,6	0,056	3,4	138	388
mo	100	2,164	0,98	45,3	1,184	54,7	100	295
co	100	1,684	1,452	86,2	0,232	13,8	100	443
ap	200	2,831	2,823	99,7	0,007	0,3	6	517
fa	400	1,519	1,466	96,5	0,052	3,5	127	373
st	100	0,743	0,59	79,4	0,153	20,6	81	477
kd	200	1,602	1,555	97,1	0,047	2,9	100	478
kj	200	3,431	3,362	98,0	0,069	2,0	56	531
cm	200	2,434	1,979	81,3	0,455	18,7	200	282
ds	100	4,934	3,18	64,5	1,754	35,5	100	402
pw	200	3,399	3,352	98,6	0,046	1,4	58	478
pr	100	5,733	0,941	16,4	4,792	83,6	100	359
wa	100	8,671	8,158	94,1	0,513	5,9	100	525
ys	100	1,285	0,626	48,7	0,658	51,3	100	132
no	100	1,143	0,438	38,3	0,705	61,7	100	161
hl	100	1,786	0,699	39,1	1,087	60,9	100	152
tr	100	1,745	0,65	37,2	1,095	62,8	100	131

занные с деятельностью человека, в основном имеют длительность до 2 с. Звуки, не связанные с человеком, чаще всего имеют стационарный характер спектра, поэтому для обучения их моделей также требуется отрезок не более 2 с, несмотря на то, что в корпусе часть этих элементов имеет большую длительность, например, файлы со звуком течения воды имеют среднюю длительность 8,6 с.

Что касается спектральных характеристик, то из табл. 2 видно, что большинство неречевых элементов в основном состоит из невокализованных участков. Исключение составляет телефонный звонок, однако, учитывая то, что мелодия звонка сейчас выбирается пользователем самостоятельно, параметрические характеристики могут здесь варьироваться в широком диапазоне. Соотношение вокализованных и невокализованных участков в речи примерно одинаковое. Приведенные характеристики были рассчитаны путем анализа аудиофайлов из собранного корпуса с помощью программы PRAAT [14].

Оценка работы системы распознавания акустических событий в ассистивном интеллектуальном пространстве производилась в два этапа. Вначале участник эксперимента осуществлял движение между заранее определенными точками, которые расположены под каждым из микрофонов и в центре помещения. При этом в каждой

точке движения акустическое событие моделировалось несколько раз. На втором этапе экспериментов участник свободно перемещался по комнате, моделируя различные события.

В ходе проведения экспериментов были записаны 2811 аудиофайлов. Анализ результатов распознавания показал, что большинство речевых команд распознавалось с точностью свыше 90 %. События «Падение» и «Звон ключей» были распознаны с меньшей точностью. Это связано со сложностью определения событий с низким уровнем энергии аудиосигнала, присутствующих в аудиосигнале вместе с сильным внешним шумом. Кроме того, при моделировании акустических событий существует возможность наложения одного события на другое, вследствие чего возникают ошибки. Средняя точность распознавания по всем элементам в корпусе составила 95 %, что вполне приемлемо для систем автоматической обработки акустической информации.

Заключение

Системы автоматической обработки акустической информации имеют важное значение во

многих отраслях жизнедеятельности человека. Это связано с тем, что бесконтактный способ регистрации аудиоданных позволяет безопасно и ненавязчиво проанализировать текущую ситуацию в помещении и поведение человека. Средства аудиообработки сейчас успешно применяются в ассистивных системах наравне с методами обработки видео и данных, регистрируемых контактным путем. Представленная система распознавания акустических событий в интеллектуальном пространстве использована для определения потенциально опасных ситуаций, возникающих при повседневной жизнедеятельности. В ходе исследования собран акустический корпус для моделирования речевых и неречевых звуков, а также проведены эксперименты по их распознаванию. Последующая работа будет направлена на интеграцию разработанного метода с системой оповещения о потенциальных экстренных ситуациях в наблюдаемом помещении.

Работа выполнена в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2007–2013 годы» (ГК № 11.519.11.4025).

Литература

1. Portet F. et al. Design and evaluation of a smart home voice interface for the elderly: acceptability and objection aspects // *Personal and Ubiquitous Computing*. 2011. Vol. 32. Iss. 1. P. 1–18.
2. Chan M., Campo E., Esteve D., Fourniols J. Smart Homes — Current Features and Future Perspectives // *Maturitas*. 2009. Vol. 64. Iss. 2. P. 90–97.
3. Breazeal C. et al. Humanoid robots as cooperative partners for people // *Intern. J. of Humanoid Robots*. 2004. Vol. 1. N 2. P. 1–34.
4. Карпов А. А., Акарун Л., Ронжин Ал. Л. Многомодальные ассистивные системы для интеллектуального жилого пространства // *Тр. СПИИРАН*. 2011. Вып. 19. С. 48–64.
5. Popescu M., Li Y., Skubic M., Rantz M. An acoustic fall detector system that uses sound height information to reduce the false alarm rate // *Proc. of 30th Annual Intern. IEEE EMBS Conf.*, Aug. 2008. P. 4628–4631.
6. Istrate D., Vacher M., Serignat J. Embedded Implementation of Distress Situation Identification Through Sound Analysis // *The J. on Information Technology in Healthcare*. 2008. Vol. 6(3). P. 204–211.
7. Chahuara P., Portet F., Vacher M. Location of an inhabitant for domotic assistance through fusion of audio and non-visual data // *Proc. of 5th Intern. Conf. on Pervasive Computing Technologies for Healthcare*, May 2011. P. 242–245.
8. Eronen A. J. et al. Audio-based context recognition // *IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing*. 2006. Vol. 14. N 1. P. 321–329.
9. Mesaros A., Heittola T., Eronen A., Virtanen T. Acoustic event detection in real life recordings // *Proc. of 18th European Signal Processing Conf.*, Aug. 2010. P. 1267–1271.
10. Heittola T., Mesaros A., Eronen A., Virtanen T. Audio context recognition using audio event histograms // *Proc. of 18th European Signal Processing Conf.*, Aug. 2010. P. 1272–1276.
11. Ma L., Milner B., Smith D. Acoustic environment classification // *ACM Trans. Speech Lang. Process.* 2006. Vol. 3. N 2. P. 1–22.
12. Ронжин Ал. Л., Ронжин Ан. Л. Система аудиовизуального мониторинга участников совещания в интеллектуальном зале // *Докл. ТУСУРа*. 2011. № 1(22). Ч. 1. С. 153–157.
13. Ронжин А. Л., Карпов А. А., Кагиров И. А. Особенности дистанционной записи и обработки речи в автоматах самообслуживания // *Информационно-управляющие системы*. 2009. № 5. С. 32–38.
14. Boersma P., Weenink D. Praat: doing phonetics by computer. 2006. <http://www.fon.hum.uva.nl/praat> (дата обращения: 20.03.2012).

УДК 621.39

НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАЗРАБОТКИ МЕТОДОЛОГИИ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ КОНТРОЛЯ ДОСТУПА И ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ ИДЕНТИФИКАЦИИ

В. В. Волхонский,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики

Рассмотрена модель системы контроля доступа с использованием теории множеств и понятия переходов. На ее основе сформулированы принципы построения таких систем как одного из основных элементов систем защиты объектов информатизации. Предложены критерии выбора технологии идентификации, позволяющие повысить надежность идентификации.

Ключевые слова — контроль доступа, принципы построения, критерии выбора технологии идентификации.

Введение

В настоящее время существует достаточно много работ по системам контроля и управления доступом (СКУД) [1–5], в которых рассматриваются различные аспекты функционирования таких систем. Однако это касается, главным образом, конкретных приложений и особенностей как самих систем контроля доступа, так и определенных видов идентификаторов. В то же время целесообразно сформулировать общие базовые принципы функционирования СКУД произвольной структуры, которые позволили бы использовать их при аппаратном и программном синтезе систем и оценке их параметров.

Разнообразие существующих, появление новых технологий идентификации и расширение спектра возможных задач идентификации практически на все стороны жизни общества (от антикражевых систем и систем идентификации товаров с групповыми идентификаторами до орнитологии, ихтиологии, задач пересылки почты и грузов, систем физической защиты объектов информатизации и хранения материальных ценностей и многих других) требуют обоснованного выбора той или иной технологии идентификации. Отсутствие объективных критериев выбора технологии идентификации для использования в конкретной задаче приводит к тому, что на практике такой выбор зачастую делается на основе эмпирических рассуждений, без учета объективных

критериев. Такие критерии сформулированы лишь для частного случая биометрических идентификаторов [1]. Поэтому можно говорить о целесообразности формулировки критериев выбора технологии идентификации, которые, с одной стороны, являются общими, справедливыми для всех вариантов систем контроля доступа, а с другой стороны, учитывают особенности решаемых задач.

В целом решение перечисленных выше задач может послужить основой для разработки методологии построения СКУД.

Модель СКУД

Для описания СКУД можно использовать подход и модель [5], базирующиеся на представлении процесса функционирования СКУД в виде последовательности переходов, и математический аппарат теории множеств. При этом целесообразно модифицировать эту модель, используя подход, предложенный в работе [6] для системы охранной сигнализации как элемента системы физической защиты (СФЗ).

Использование единой модели для СКУД и СФЗ позволит, во-первых, в дальнейшем применять эту модель для интегрированных систем безопасности, включающих несколько подсистем, например контроля доступа и охранной сигнализации; во-вторых, полнее учесть особенности СКУД, в частности, реализовать привязку модели к вре-

менным параметрам для контроля нахождения субъекта доступа в зонах контролируемого доступа. А это необходимо для учета уровня доступа Y_k для k -го субъекта доступа, определяемого как совокупность $Y_k = \{D_k, \Delta t_k, \Delta T_k, R\}$ разрешенных точек доступа D_k и соответствующих им разрешенных временных Δt_k и календарных ΔT_k интервалов, а также уровня R угрозы.

Совокупность точек доступа d_i всей СКУД может быть определена множеством $D^{СКУД}$, которому принадлежат эти точки доступа: $d_i \in D^{СКУД}$, $i = 1, \dots, I$. Обычно специфика реальных объектов такова, что имеется несколько структурных подразделений (цехов, зданий, отделов, ...) с разными режимами функционирования и уровнями доступа в каждое из них. Кроме того, аппаратные средства СКУД, как правило, используют несколько контроллеров, которые могут иметь определенные функциональные ограничения на работу групп точек доступа, которые они обеспечивают. Следовательно, в общем случае, с учетом таких возможных функциональных особенностей объекта и оборудования, в СКУД могут иметь место несколько разделов, отличающихся уровнями доступа пользователей. Поэтому множество $D^{СКУД}$, в свою очередь, разделяется на $M_p^{СКУД}$ подмножеств точек доступа разделов $D_m^{СКУД}$, где $m = 1, \dots, M_p^{СКУД}$. Подмножества точек доступа $D_m^{СКУД}$ могут быть как пересекающимися, так и непересекающимися. Это зависит от структуры СКУД, в частности, от структуры зон доступа [5] (последовательные, параллельные, вложенные, пересекающиеся) и от того, имеют ли упомянутые структурные подразделения общие зоны доступа и, соответственно, общие точки доступа. Поэтому можно записать выражение $D_1^{СКУД} \cup D_2^{СКУД} \dots \cup D_M^{СКУД} = D^{СКУД}$, определяющее соотношение между подмножествами $D_m^{СКУД}$ и $D^{СКУД}$.

Аналогично совокупность зон z_j доступа, контролируемых СКУД, может быть определена множеством $Z^{СКУД}$, которому принадлежат точки доступа $z_j \in Z^{СКУД}$. Учитывая упомянутую выше специфику объектов (возможное наличие разделов), множество Z будет состоять из $L_p^{СКУД}$ подмножеств $Z_l^{СКУД}$, $l = 1, \dots, L_p^{СКУД}$, с элементами z_j .

Для возможности использовать модель работы [6] учтем следующее. В СФЗ основными элементами, позволяющими регулировать продолжительность проникновения, являются препятствия, определяемые множеством $D^{СФЗ}$. Основными элементами СКУД, определяющими режим ее функционирования, являются точки доступа. Для применимости используемой модели [6] к системе контроля доступа необходимо учесть взаимосвязь между $D^{СФЗ}$ и $D^{СКУД}$. Препятствия СФЗ в СКУД можно рассматривать не только как элементы точек доступа (например, двери,

оснащенные считывателями и элементами управления доступом), но и как зоны доступа (двери, не оборудованные средствами СКУД). То есть такие элементы, как препятствия, могут быть отнесены в СКУД либо к зонам, либо к точкам доступа. При этом все точки доступа (элементы множества $D^{СКУД}$) применительно к СКУД являются препятствиями, но не все препятствия (элементы множества $D^{СФЗ}$) являются точками доступа, т. е. $D^{СФЗ} \in D^{СКУД}$. Таким образом, характерными точками СКУД являются зоны контролируемого доступа (как аналог охраняемых зон в СФЗ) и точки доступа (как аналог препятствий СФЗ).

Переходы субъекта доступа

Субъект доступа может перемещаться по объекту из одной зоны в другую и преодолевать точки доступа по определенному пути или маршруту. Такое перемещение может быть представлено с помощью последовательности переходов между характерными точками объекта, аналогичной используемой в работах [5, 6]. В качестве характерных точек маршрута могут быть выбраны начало и конец зоны доступа или точки доступа. Перемещения субъекта доступа между такими точками можно трактовать как переходы. В этом случае будут иметь место два основных типа переходов — по контролируемой зоне до точки доступа и через точку доступа с переходом в контролируемую зону.

Введем обозначение перехода c_{ij} , которое может соответствовать следующим вариантам: переходу от начала i -й зоны до начала j -й точки доступа или преодолению i -й точки доступа с переходом в j -ю зону доступа.

Нулевой индекс будет обозначать зону свободного доступа. Таким образом, в общем случае переход c_{ij} означает следующее. При $i \neq 0, j = 0$ — перемещение субъекта доступа из i -й зоны контролируемого доступа в j -ю зону свободного доступа. При $i = 0, j \neq 0$ — перемещение субъекта доступа из зоны свободного доступа в j -ю зону контролируемого доступа. При $i = j$ — возврат в ту же самую зону доступа (контролируемого или свободного) с идентификацией в точке доступа, но без перемещения через эту точку доступа. Переходы c_{ij} и c_{ji} с разным порядком следования индексов отличаются порядком (направлением) прохождения точек доступа.

В зависимости от решаемой задачи возможны различные варианты сочетания количества зон и точек доступа, от которых будут зависеть представления маршрута субъекта доступа:

1) произвольные совокупности точек и зон доступа (несовпадающее их количество);

- 2) связанные пары точка/зона доступа (совпадающее количество);
- 3) совокупность только точек доступа.

Первый вариант представления является наиболее общим, и использовать его имеет смысл, когда зону между двумя точками доступа по какой-либо причине удобнее разбить на несколько отдельных зон. Например, если возможны разветвления маршрута на участках между точками доступа. В частности, когда есть несколько точек доступа между одними и теми же зонами. Во втором варианте количество точек и зон доступа между ними совпадает. Третий является частным случаем первых двух, когда время прохождения зон пренебрежимо мало по сравнению со временем прохождения точек доступа, либо для СКУД без контроля нахождения субъекта доступа в зоне контролируемого доступа.

Если необходимо, к примеру, моделировать СКУД с учетом времени нахождения в зоне контролируемого доступа, то нужен учет зон доступа $Z^{СКУД}$; если без учета — то множество $Z^{СКУД}$ можно считать пустым: $Z^{СКУД} = \emptyset$.

Рассмотрим описание переходов для различных вариантов сочетаний точек и зон доступа.
Произвольные совокупности точек и зон доступа.

Совокупность всех возможных переходов c_{ij} , $i, j = 0, \dots, I, I + 1, \dots, I + J$, составляет множество C переходов. Значение индекса «0» соответствует зоне свободного доступа или нахождению вне контролируемого объекта. Эта совокупность может быть представлена квадратной матрицей C_{IJ} с количеством строк и столбцов, определяемым суммой количества точек I и зон J доступа:

$$C_{IJ} = \begin{bmatrix} c_{00} & c_{10} & \dots & c_{I-1,0} & c_{I,0} & c_{I+1,0} & \dots & c_{I+J,0} \\ c_{01} & \dots & & & & & \dots & c_{I+J,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{0,I} & c_{1,I} & \dots & & c_{I,I} & c_{I+1,I} & \dots & c_{I+J,I} \\ c_{0,I+1} & c_{1,I+1} & \dots & & c_{I,I+1} & c_{I+1,I+1} & \dots & c_{I+J,I+1} \\ c_{0,I+2} & & \dots & & & & \dots & c_{I+J,I+2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{0,I+J} & c_{1,I+J} & \dots & & c_{I,I+J} & c_{I+1,I+J} & \dots & c_{I+J,I+J} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

Элементы этой матрицы в простейшем случае определяют возможность выполнения перехода. Они равны единице при наличии такой возможности: $c_{ij} = \begin{cases} 0, c_{ij} \notin C \\ 1, c_{ij} \in C \end{cases}$, и равны нулю при ее отсутствии.

Связанные пары точка/зона доступа.

Для случая связанных пар точка/зона, т. е. при совпадении количества точек и зон доступа, матрица C_{IJ} возможных переходов упрощается и принимает вид C_I , аналогичный (1) с учетом равных значений $I = J$.

Совокупность только точек доступа.

Для третьего случая учета только точек доступа матрица C_{IJ} будет иметь меньшее количество элементов, определяемое только количеством I точек доступа:

$$C_I = \begin{bmatrix} c_{00} & c_{10} & \dots & c_{I,0} \\ c_{01} & \dots & & c_{I,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{0,I} & c_{1,I} & \dots & c_{I,I} \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Во всех упомянутых выше ситуациях могут быть частные случаи.

1. Когда не контролируется направление перехода через точку доступа, т. е. не различаются переходы в прямом c_{ij} и обратном c_{ji} направлениях. Тогда в матрице

$$C_I = \begin{bmatrix} c_{00} & c_{01} & \dots & c_{0,I} \\ c_{01} & \dots & & c_{1,I} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{0,I} & c_{1,I} & \dots & c_{I,I} \end{bmatrix}$$

элементы над и под диагональю попарно равны.

2. При одностороннем контроле доступа учитываются только переходы c_{ij} и не учитываются c_{ji} . Тогда часть элементов матрицы C_I становятся равными нулю и будут выглядеть, к примеру, следующим образом:

$$C_I = \begin{bmatrix} c_{00} & 0 & \dots & c_{I,0} \\ c_{01} & \dots & & c_{I,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & c_{I,I} \end{bmatrix}.$$

Либо, в случае последовательного выбора порядка точек и зон доступа, матрица C_I будет иметь нулевые элементы выше или ниже диагонали:

$$C_I = \begin{bmatrix} c_{00} & 0 & \dots & 0 \\ c_{01} & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{0,I} & c_{1,I} & \dots & c_{I,I} \end{bmatrix}.$$

Маршруты субъекта доступа

С точки зрения введенного понятия переходов, маршрут R_n субъекта доступа представляет собой определенную конечную чередующуюся последовательность переходов. Таким образом, n -й маршрут R_n включает в себя подмножество C_n множества C возможных переходов. Сформулируем понятие маршрута субъекта доступа на основе определений, касающихся маршрутов [5].

Маршрут субъекта доступа — это конечная последовательность переходов, выполненных им. С учетом используемых обозначений маршрут может быть записан как $R_n = \{c_{ij}, \dots, c_{km}, c_{ml}\}$.

Непрерывный маршрут включает все последовательно выполняемые переходы на маршруте движения субъекта доступа без пропуска: $R_n = \{c_{ij}, c_{jk}, \dots, c_{km}, c_{ml}\}$.

Замкнутый маршрут начинается и заканчивается в одной и той же зоне доступа: $R_n = \{c_{ij}, c_{jk}, \dots, c_{km}, c_{mi}\}$. Маршрут может быть *квазизамкнутым*: $R_n = \{c_{0j}, c_{jk}, \dots, c_{km}, c_{i0}\}$, когда субъект доступа перемещается в зону контролируемого доступа из зоны свободного доступа через одну внешнюю точку доступа, а выходит также в зоне свободного доступа, но через другую внешнюю точку доступа. В противном случае маршрут считается *открытым*.

Полный маршрут начинается и оканчивается на внешних концевых зонах свободного доступа и включает в себя все переходы, выполненные на объекте в зонах контролируемого доступа: $R_n = \{c_{0j}, c_{jk}, \dots, c_{km}, c_{m0}\}$.

Полный замкнутый маршрут начинается и заканчивается в одной и той же внешней концевой зоне свободного доступа: $R_n = \{c_{0j}, c_{jk}, \dots, c_{kj}, c_{j0}\}$. То есть в частном случае полного маршрута концевые зоны доступа являются внешними зонами свободного доступа.

Очевидно, что, с общей точки зрения построения СКУД, корректный маршрут субъекта доступа должен быть полным, непрерывным и замкнутым (квазизамкнутым), т. е. субъект должен пройти все последовательно связанные зоны и соответствующие им точки доступа на данном маршруте.

Основные принципы функционирования СКУД

На основе анализа рассмотренной выше модели СКУД можно сформулировать принципы функционирования СКУД, которые надо соблюдать при разработке таких систем.

1. *Санкционированность* — любые действия в СКУД должны подтверждаться соответствующим уровнем доступа. Принцип выглядит, возможно, тривиальным и «де-факто» используется в профессиональных СКУД, например, для выявления попыток несанкционированного доступа подбором идентификаторов, но не всегда реализуется в реальных системах.

2. *Неповторяемость* — прохождение одной и той же точки доступа не может быть выполнено дважды подряд в одном и том же направлении без прохождения других точек доступа или этой же точки доступа в противоположном направлении. Это так называемый контроль повторного прохода [3, 4]. Однако на практике он не всегда используется или имеет ограниченный функционал — позволяет выявлять попытки повторного прохода только в пределах ограниченной группы точек доступа раздела, а не во всей системе. Эта группа обычно определяется параметрами одного контроллера СКУД. Выполнение этого принципа иногда не контролируется в упрощенных системах, что приводит к снижению надежности СКУД.

3. *Непрерывность* — санкционированное перемещение через точки доступа должно осуществляться только с последовательным прохождением подряд всех связанных зон и соответствующих принадлежащих этим зонам точек доступа без пропуска на данном маршруте. Выполнение этого принципа соответствует непрерывному маршруту субъекта доступа.

4. *Замкнутость* — любой корректный маршрут должен быть замкнутым (квазизамкнутым) в пределах временных Δt_k и календарных ΔT_k интервалов, определяемых уровнем доступа \mathcal{Y}_k . Это соответствует полному замкнутому или квазизамкнутому маршрутам, рассмотренным выше.

5. *Осуществимость* — корректное перемещение объекта должно осуществляться только по конструктивно и (или) организационно предназначенным для этого маршрутам. Например, при проникновении на территорию предприятия через ограждение периметра (т. е. при нарушении режима функционирования СКУД) и выходе таким же образом маршрут субъекта доступа может быть замкнутым и непрерывным, т. е. удовлетворяющим п. 4 и 5, но не являться полным. Таким образом, условия 4 и 5 являются необходимыми, но не достаточными.

6. *Монотонность:*

- уровень доступа в каждую из последующих последовательно связанных зон должен быть выше предыдущей. Иначе, возможно, уровень доступа занижен или нет необходимости в точке доступа, и зоны могут быть объединены;

- для последовательно связанных зон субъект доступа, имеющий i -й уровень доступа (позволяющий перемещение через i -ю точку доступа), должен иметь и $(i - 1)$ -й уровень доступа (для $i > 1$).

Последнее правило справедливо и может использоваться только для сравнимых уровней доступа [5].

Критерии выбора технологии идентификации

Сформулируем общие критерии выбора технологии идентификации. В работе [1] приводятся критерии выбора биометрических идентификационных признаков, т. е. для частного случая определенной технологии идентификации. Отметим, что эти критерии справедливы не только для биометрических идентификаторов и их можно рассматривать как часть общего списка критериев выбора для произвольной СКУД. Аналогичные русскоязычные термины могут быть записаны следующим образом.

Неповторяемость — идентификационные признаки не должны полностью повторяться у любых субъектов или объектов доступа. Исключением служат СКУД с групповыми идентификаторами.

Стабильность — идентификационные признаки должны оставаться неизменными во времени. Или, точнее, изменения не должны выходить за допустимые пределы, приводящие к нарушению любого из рассматриваемых критериев.

Считываемость — должна обеспечиваться возможность беспрепятственного считывания этих признаков современными техническими средствами. Например, размещение идентификатора со штрих-кодом в пластиковый держатель может приводить к сбоям в работе оптического считывателя за счет дополнительного рассеивания светового потока.

Доступность — возможность получения этих признаков без каких-либо юридических, этических, моральных и других норм и правил.

Наличие — признаки должны присутствовать у всех СОД.

Однако задачи синтеза и анализа СКУД требуют формулировки критериев выбора технологии (метода и способа) идентификации для произвольного субъекта или объекта доступа и произвольных идентификаторов (различных по физическому принципу действия и набору технических параметров). Эти критерии могут быть сформулированы следующим образом.

Присваиваемость — возможность присвоения идентификатора определенному субъекту. Так, могут потребоваться дополнительные технические средства для присвоения идентификатора, например держатель карты доступа.

Приемлемость — согласие субъекта или объекта доступа на присвоение определенного идентификационного признака. Термин «согласие» надо понимать в обобщенном виде. Это может быть согласие субъекта доступа в полном смысле этого слова, или отсутствие того или иного вида отторжения идентификатора объектом доступа (например, в орнитологии или ихтиологии), либо приемлемость для владельца или пользователя этого объекта.

Законность — соответствие законам страны и правилам административной территории или ведомственным требованиям организации, эксплуатирующей СКУД.

Защищенность — обеспечение защищенности идентификатора и (или) идентификационных признаков от различных факторов, к которым можно отнести перечисленные в ГОСТ [7] манипулирование, копирование, наблюдение. Должна обеспечиваться защищенность также от угроз идентификаторам, не упомянутых в стандарте, таких как съём информации о них, воздействие естественных и искусственных факторов (электромагнитных излучений, магнитных полей и т. п.), приводящих к нарушению целостности иденти-

фикаторов, идентификационных характеристик и признаков, к их частичной или полной потере. Кроме того, в упомянутом стандарте не указана и такая угроза, как кража идентификатора.

Принадлежность — обеспечение однозначной принадлежности идентификатора или идентификационных признаков субъекту или объекту доступа, не допускающей использования этого идентификатора или идентификационных признаков другим субъектом или объектом доступа. Например, переклеивания идентификатора товара или идентификатора проведения досмотра багажа в аэропорту.

Достаточность — возможность принятия однозначного решения или решения с заданными вероятностями об идентификации данного объекта или субъекта доступа и предоставления ему доступа или отказа в нем. К примеру, при идентификации по отпечатку пальца реально используется информация лишь о части характерных точек папиллярных узоров.

Реализация приведенных выше критериев при синтезе СКУД позволит повысить эффективность системы.

Заключение

На основе представления СКУД в терминах теории множеств, позволяющего формализовать маршрут перемещения субъекта доступа как конечную чередующуюся последовательность зон и точек доступа и переходов между ними и через них, сформулированы принципы функционирования СКУД: санкционированность, неповторяемость, непрерывность, замкнутость, осуществимость и монотонность.

Предложен подход, позволяющий использовать один и тот же математический аппарат и единую модель для различных подсистем безопасности, в частности, подсистем охранной сигнализации и контроля доступа. Этот подход может быть распространен и на другие типы подсистем.

В дополнение к известным критериям, которым должны соответствовать биометрические идентификационные признаки, сформулированы критерии выбора технологии идентификации для произвольного субъекта или объекта доступа: достаточность, защищенность, принадлежность, присваиваемость, приемлемость и законность.

Литература

1. Wayman J., Jain A., Malton D., Maio D. Biometric Systems. Technology, Design and Performance Evaluation. London: Springer. — 2005. — 374 p.
2. Finkenzeller K. RFID Handbook. Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards and Identification. Sec. ed. — Munich: Giesecke & Devrient GmbH, 2003. — 427 p.
3. Оленин Ю. А., Шестаков К. И. Метод принятия решения в системах контроля и управления доступом при реализации функции antipassback. Ч. 2 // Системы безопасности. 2001. Октябрь—ноябрь. С. 32–33.
4. Оленин Ю. А., Шестаков К. И. Метод принятия решения в системах контроля и управления доступом при реализации функции antipassback. Ч. 1 // Системы безопасности. 2001. Август—сентябрь. С. 36–37.
5. Волковицкий В. Д., Волхонский В. В. Системы контроля и управления доступом. — СПб.: Экополис и культура. — 2003. — 165 с.
6. Волхонский В. В., Гатчин Ю. А. Подход к задаче анализа эффективности системы безопасности на основе вероятностных оценок временных параметров процесса проникновения на защищаемый объект // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2012. № 2. С. 35–39.
7. ГОСТ Р 51241–2008. Средства и системы контроля и управления доступом. Классификация. Общие технические требования. Методы испытаний. — М.: Госстандарт России, 2008. — 32 с.

УДК 004.728.3.057.4

РАСЧЕТ СРЕДНЕЙ ЗАДЕРЖКИ АЛГОРИТМА РАЗРЕШЕНИЯ КОНФЛИКТОВ В СИСТЕМАХ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

С. Г. Марковский,

канд. техн. наук, доцент

Н. В. Марковская,

канд. техн. наук, доцент

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Для системы радиочастотной идентификации производится численный расчет средней задержки древовидного алгоритма, использующего для разрешения конфликтов идентификаторы меток и процедуру последовательной компенсации конфликтных сигналов. Показывается, что средняя задержка алгоритма существенно меньше средней задержки алгоритма, описанного в стандарте ISO/IEC 18000-6. Исследуется влияние ошибок процедуры последовательной компенсации конфликтных сигналов на работу алгоритма разрешения конфликта.

Ключевые слова — системы радиочастотной идентификации, идентификаторы меток, процедура последовательной компенсации конфликтных сигналов, алгоритм разрешения конфликтов.

Введение

В последнее время RFID-метки (Radio Frequency Identification) широко применяют в различных системах [1]. Все RFID-метки классифицируют по дальности действия. RFID-метки ближнего действия (до 20 см) используют в системах идентификации (системах контроля доступа и различных видов, верифицирующих личность документов), а также в платежных системах. RFID-метки среднего действия (до 5 м) применяют в системах складского учета и контроля оплаты товаров в торговых точках. И, наконец, RFID-метки дальнего действия (до 100 м) чаще всего используют в системах автоматизированного учета и контроля транспорта.

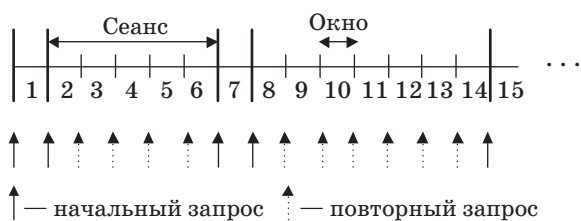
Системы радиочастотной идентификации содержат считыватель и множество RFID-меток (далее — просто меток). Считыватель по радиоканалу запрашивает, чтобы определить, какие метки находятся в зоне его действия. Метки, успешно принявшие данный запрос, посылают считывателю свой идентификатор. При одновременной передаче в канал сигналов от разных меток в системе может возникнуть конфликт, для разрешения которого используются специальные алгоритмы. Два из них — алгоритм АЛОНА и древовидный алгоритм — описаны в стандарте

ISO/IEC 18000-6 [2]. Древовидный алгоритм для разрешения конфликта использует механизм подбрасывания монеты. В работе [3] предложен древовидный алгоритм, использующий для разрешения конфликтов уникальные идентификаторы меток (ИМ) и процедуру последовательной компенсации конфликтных сигналов (ПККС) на считывателе. Для этого алгоритма путем моделирования была определена средняя задержка идентификации — интервал времени от момента появления метки в зоне действия считывателя до момента, когда считыватель идентифицирует метку. Результаты моделирования [3] показывают, что предложенный алгоритм имеет существенный выигрыш по средней задержке у древовидного алгоритма, определенного в стандарте.

В работе будет рассмотрена методика численного расчета средней задержки древовидного алгоритма разрешения конфликтов (АРК), использующего ИМ и процедуру ПККС. Далее для ссылки на данный алгоритм будем использовать сокращенное название АИМПК.

Функционирование системы радиочастотной идентификации

Время функционирования системы разделено на окна (рис. 1). Окно — временной интервал, ко-



■ Рис. 1. Временные характеристики системы идентификации

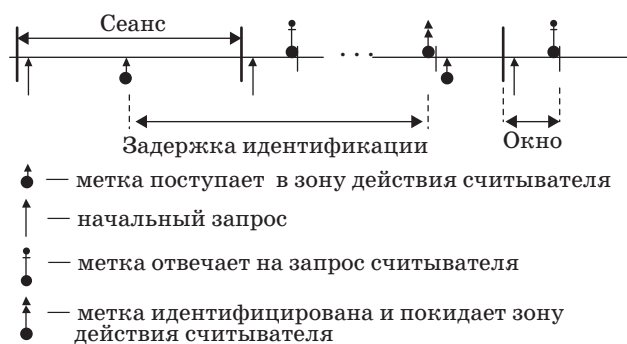
торый начинается в момент передачи запроса считывателя и заканчивается моментом окончания передачи ответа на этот запрос. Сеанс — это интервал времени, состоящий из одного или нескольких окон, в течение которого разрешается конфликт. В начале каждого сеанса считыватель посылает начальный запрос. На этот запрос отвечают все метки, находящиеся в зоне действия считывателя. Если в зоне действия нет меток или только одна метка, то сеанс длится одно окно (окна 1 и 7 на рис. 1). В противном случае, если одновременно на запрос отвечают две и более метки, возникает конфликт, который разрешается в течение конфликтного сеанса (окна 2–6 и 8–14 на рис. 1) при помощи АРК, использующего ИМ и процедуру ПККС. В течение конфликтного сеанса, в начале каждого окна, считыватель передает повторные запросы, на которые могут отвечать только метки, которые отвечали на начальный запрос, т. е. если в течение текущего сеанса в зоне действия считывателя окажутся новые метки, то они не смогут передавать ответы в этом сеансе. Описанная выше процедура идентична блокированному алгоритму доступа к каналу [4].

Процесс поступления меток в зону действия считывателя будем описывать входным потоком Бернулли. Если метка находится вне зоны действия считывателя, то к началу очередного окна каждая метка с вероятностью p перемещается в зону действия считывателя и с вероятностью $1 - p$ остается вне зоны. Если в некотором окне считыватель успешно идентифицирует метку, то метка удаляется из зоны действия считывателя. Будем считать, что метка не может покинуть зону действия считывателя до завершения процесса идентификации.

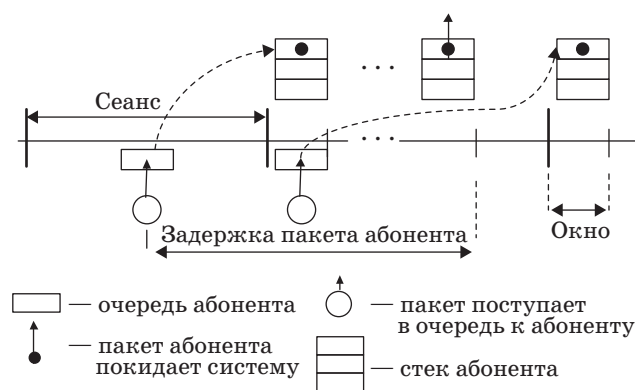
Средняя задержка идентификации

Задержка идентификации — случайная величина, равная числу окон нахождения метки в зоне действия считывателя (рис. 2). *Средняя задержка идентификации* — математическое ожидание этой случайной величины.

Для расчета средней задержки идентификации метки рассмотрим систему радиочастотной



■ Рис. 2. Задержка идентификации метки



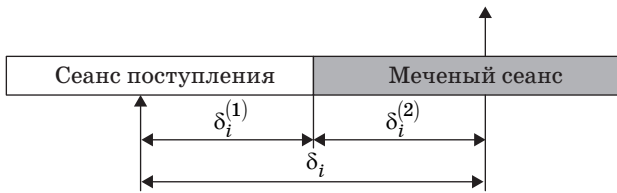
■ Рис. 3. Задержка пакета абонента

идентификации как централизованную систему, в которой метки будут *абонентами*, а считыватель — *базовой станцией* (БС) [4].

Расчет средней задержки абонента в системе, где каждый абонент имеет очередь для хранения пакетов, состоящую из двух ячеек, рассмотрен детально в работе [5], где, однако, АРК не учитывал информацию физического уровня. В работе [3] описан подобный алгоритм, использующий ПККС. Следует отметить, что, определяя среднюю задержку пакета абонента (рис. 3), мы определяем верхнюю границу средней задержки идентификации метки. Дело в том, что метка может снова поступить в зону действия считывателя только после того, как в текущем сеансе она была идентифицирована и покинула эту зону (см. рис. 2), в то время как новый пакет может поступить в очередь к абоненту в самом начале сеанса, в котором он может передавать пакет из предыдущего сеанса (см. рис. 3). Метка, в отличие от абонента, очереди пакетов не имеет.

Расчет средней задержки

Задержкой передачи пакета [5] называется время от момента его поступления в систему до момента его успешной передачи. Занумеруем числовой последовательностью все пакеты, поступаю-



■ Рис. 4. Определение задержки меченого пакета

щие в систему, и выделим из этой последовательности пакет с номером i . Этот пакет назовем *меченым* и найдем для него среднюю задержку.

Обозначим через δ_i случайную задержку передачи меченого пакета. Определим среднюю стационарную задержку передачи пакета равенством

$$D = \lim_{i \rightarrow \infty} M\delta_i.$$

Назовем сеанс, в котором поступил меченый пакет, сеансом *поступления*, а сеанс, в котором этот пакет получает успешную передачу, — *меченым* сеансом. В случайную величину δ_i входят две составляющие (рис. 4): $\delta_i^{(1)}$ — время от момента появления меченого пакета до момента окончания сеанса поступления и $\delta_i^{(2)}$ — время от момента начала меченого сеанса до момента успешной передачи меченого пакета.

Если ввести в рассмотрение средние задержки для $\delta_i^{(1)}$ и $\delta_i^{(2)}$, то

$$D1 = \lim_{i \rightarrow \infty} M\delta_i^{(1)}; D2 = \lim_{i \rightarrow \infty} M\delta_i^{(2)}; D = D1 + D2. \quad (1)$$

Методика расчета величин $D1$ и $D2$ для канала без шума для случая, когда не используется процедура ПККС, подробно рассмотрена в работе [5]. При их вычислении некоторые величины зависят от интенсивности входного потока λ , а другие (средняя длина сеанса $T_{k,l}$, среднее время выхода $d_{k,l}$ и распределение вероятностей кратностей сеанса по длинам сеанса $p_l(s|k)$) не зависят. Величины, не зависящие от λ , рассчитываются по рекуррентным формулам. Поскольку выполнение процедуры ПККС приводит к модификации дерева разрешения конфликта (ДРК), то необходимо определить рекуррентные формулы вычисления этих величин для АИМПК. Заметим, что, так как при выполнении процедуры ПККС возможно появление ошибок [3], то все эти величины представляют собой функции вероятностей ложных конфликтов q_0 и q_1 (q_0, q_1 — вероятность ошибки восстановления соответственно шумового и полезного сигнала). В дальнейшем, с целью сократить записи выражений, эти параметры опускаются. Далее, используя методику из работы [5], определяем среднюю задержку пакета для АИМПК [3].

Вычисление $p_l(s|k)$

Известно, что для канала без ошибок

$$p_l(1|0) = 1, p_l(1|1) = 1, p_l(2|i) = 0, i = 0, 2^l.$$

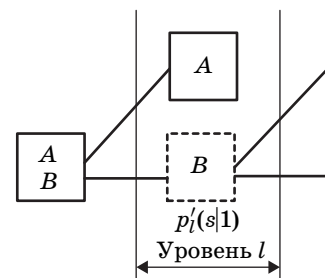
Для блокированного модифицированного стек-алгоритма (МСА) $p_l(s|k)$ определяется по следующей рекуррентной формуле [5]:

$$p_l(s|k) = \sum_{i=\max(1, k-2^{l-1})}^{\min(k, 2^{l-1})} \Psi_{k,l,i} \sum_{v=1}^{s-2} p_{l-1}(v|i) \times p_{l-1}(s-v-1|k-i) + \Psi_{k,l,0} p_{l-1}(s-1|k), \quad (2)$$

где $\Psi_{k,l,i} = \frac{C_{2^{l-1}}^i C_{2^{l-1}}^{k-i}}{C_{2^l}^k}$ при $k \geq 2, s \geq 3, l \geq 1$.

Для АИМПК, который является развитием МСА, БС при определенных условиях выполняет процедуру ПККС, что нужно учесть при вычислении $p_l(s|k)$. Процедура ПККС выполняется, если при разрешении конфликта в верхнее подмножество попадает только один абонент. Поэтому из суммы необходимо выделить слагаемое при $i = 1$ и рассмотреть его отдельно, учитывая ложные конфликты, которые могут возникнуть при выполнении процедуры ПККС. Ложный конфликт кратности 1 может возникнуть только при разрешении конфликта кратности 2. Ложный конфликт кратности 0 может возникнуть только при разрешении предыдущего ложного конфликта кратности 1. Обозначим через $p'_l(s|1)$ вероятность события {конфликт кратности 1 в вершине ДРК уровня l длится s окон при условии, что выполняется процедура ПККС} (рис. 5). Очевидно, что конфликт кратности 1 длится одно окно только при условии, что не возникает ошибка в процедуре ПККС, т. е. $p'_l(1|1) = 1 - q_1, l = 0, \log_2 M - 1$.

Утверждение 1. Если возникает ложный конфликт кратности 1 в вершине ДРК уровня l в результате ошибки восстановления полезного сигнала, то при разрешении этого конфликта не может возникнуть другая ошибка восстановления полезного сигнала и может возникнуть не более одной ошибки восстановления шумового сигнала.



■ Рис. 5. Конфликт кратности 1 при выполнении процедуры ПККС

Доказательство: Очевидно, что ошибка восстановления полезного сигнала может возникнуть, когда в конфликте участвуют два абонента. Так как в ложном конфликте участвует только один абонент, то такой ошибки в процессе разрешения конфликта произойти не может. Ошибка восстановления шумового сигнала имеет место, если пакет абонента, участвующего в разрешении конфликта, имеет в адресе хотя бы один единичный бит (попадает в верхнее подмножество ДРК). Тогда выполняется процедура ПККС. При этом сигнал пакета абонента успешно принимается. Поэтому в дальнейшем в ДРК могут быть только пустые окна и, следовательно, не может возникнуть более одной ошибки восстановления шумового сигнала. Утверждение доказано.

Получим зависимость величины $p'_l(s|1)$ от номера уровня ДРК.

Утверждение 2. При возникновении ошибки восстановления полезного сигнала при выполнении процедуры ПККС вероятности ложных конфликтов вычисляются по формуле

$$p'_l(s|1) = \frac{1}{2^{s-1}}(1-q_0)q_1, \quad l = \overline{0, \log_2 M - 1}, \quad s = \overline{2, l+1}, \quad (3)$$

если при разрешении конфликта ошибка восстановления шумового сигнала отсутствует.

Доказательство: Обозначим через w число ведущих нулей в адресе абонента. Тогда можно записать

$$p'_l(w+1|1) = \frac{1}{2^w}(1-q_0)q_1, \quad w = \overline{1, l}. \quad (4)$$

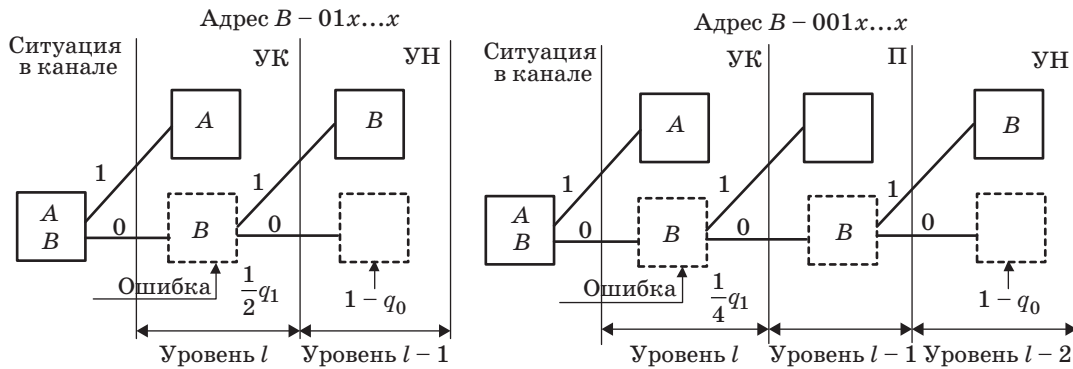
Примеры процедуры разрешения ложного конфликта для абонента B при $w = 1$ и $w = 2$ представлены на рис. 6 (на рис. 6 и последующих рисунках для обозначения возможных ситуаций в канале использованы сокращения, введенные в работе [3]). Заменяя в (4) w на $s - 1$, получим (3). Утверждение доказано.

Утверждение 3. Если в ложный конфликт в вершине ДРК уровня l попадает пакет абонента с адресом, состоящим только из нулей, или пакет абонента с ненулевым адресом и в процессе разрешения конфликта имеет место ошибка восстановления шумового сигнала при выполнении процедуры ПККС, то длительность конфликта составляет $l + 2$ окон.

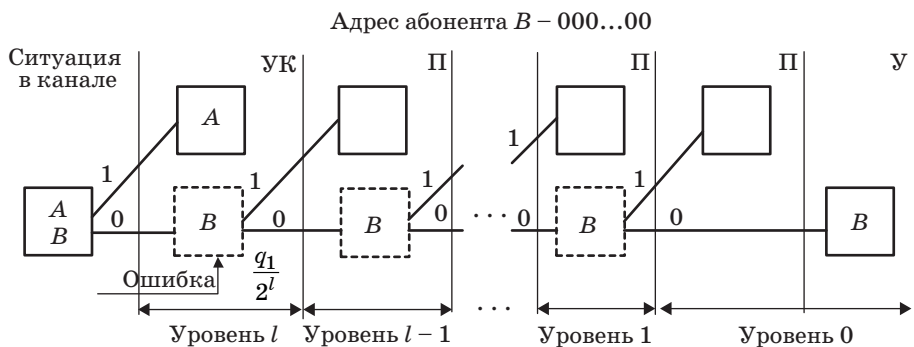
Вероятность ложного конфликта вычисляется по формуле

$$p'_l(l+2|1) = \frac{1}{2^l}q_1(1+q_0(2^l-1)). \quad (5)$$

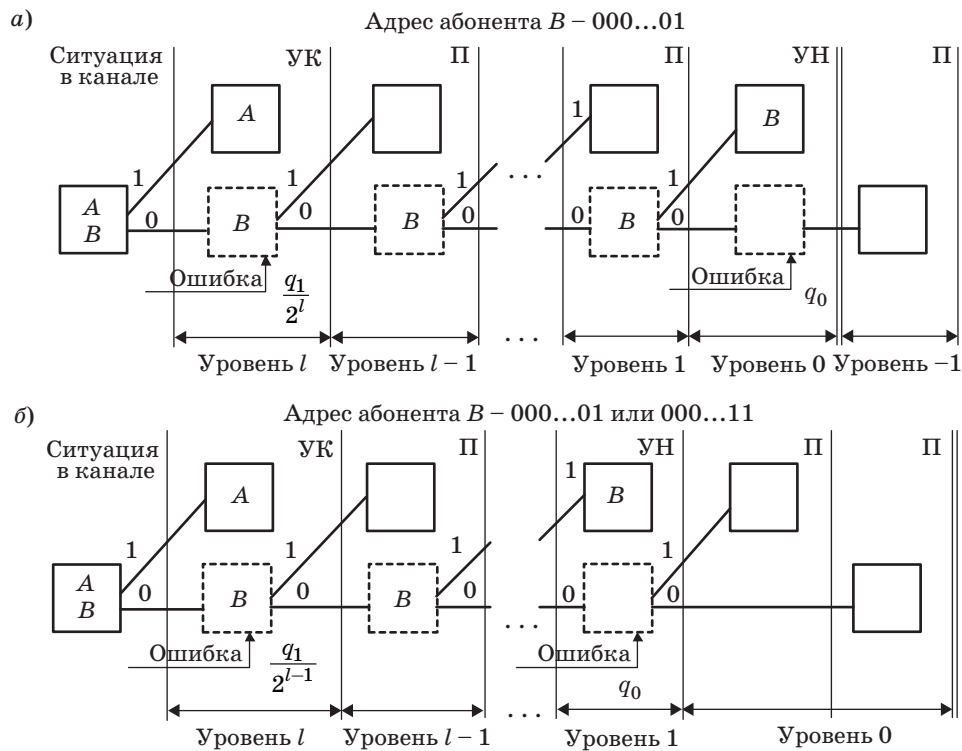
Доказательство: Рассмотрим ситуацию, когда в ложный конфликт попадает пакет абонента B , адрес которого состоит только из нулей. Процедура разрешения ложного конфликта представлена на рис. 7. Видно, что при этом не может



■ Рис. 6. Процедура разрешения ложного конфликта кратности 1 для абонента B



■ Рис. 7. Разрешение ложного конфликта для пакета абонента с нулевым адресом



■ Рис. 8. Разрешение ложного конфликта: а — ошибка восстановления шумового сигнала на уровне 0; б — ошибка восстановления шумового сигнала на уровне 1

возникнуть ошибка восстановления шумового сигнала. Уровни ДРК 1...l содержат по одной вершине, а уровень 0 — две вершины, причем последняя вершина соответствует успешной передаче пакета.

Другая ситуация — когда в ложный конфликт попадает пакет абонента с адресом, в котором старший бит адреса нулевой, а в оставшихся двоичных разрядах есть хотя бы один единичный. При этом имеет место ошибка восстановления шумового сигнала. Если она возникает в последнем окне (вершина уровня 0) — пакет абонента B (рис. 8, а), то уровни ДРК 0...l содержат по одной вершине и используется дополнительное пустое окно уровня -1. В противном случае, если ошибка возникает раньше (рис. 8, б), то l уровней дерева содержат по одной вершине, а уровень 0 — два пустых окна.

Опираясь на рассмотренные выше ситуации процедуры разрешения конфликта, можно записать

$$p'_l(l+2|1) = \frac{1}{2^l} q_1 + q_0 q_1 \sum_{i=1}^l \frac{1}{2^i}. \quad (6)$$

Первое слагаемое в (6) соответствует ситуации, когда в ложном конфликте участвует абонент с адресом, состоящим только из нулей (см. рис. 7). Во втором слагаемом присутствует сумма по числу ведущих нулей в ненулевом адре-

се абонента, пакет которого попадает в ложный конфликт с учетом вероятности q_0 (см. рис. 8).

Известно, что

$$\sum_{i=1}^l \frac{1}{2^i} = \frac{2^l - 1}{2^l}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (6) и выполнив несложные преобразования, получим (5). Утверждение доказано.

Утверждение 4. Величины $p_l(s|k)$ для АИМПК определяются по формуле

$$p_l(s|k) = \sum_{i=\max(2, k-2^{l-1})}^{\min(k, 2^{l-1})} \Psi_{k,l,i} \sum_{v=2}^{s-2} p_{l-1}(v|i) \times \\ \times p_{l-1}(s-v-1|k-i) + \Psi_{k,l,0} p_{l-1}(s-1|k) + \\ + \Psi_{k,l,1} \tilde{p}_{l-1}(s-1|k-1),$$

где

$$\tilde{p}_{l-1}(s-1|k-1) = \begin{cases} p'_{l-1}(s-1|1), & \text{если } k=2 \\ p_{l-1}(s-1|k-1), & \text{если } k>2 \end{cases} \quad (8)$$

при $k \geq 2, s \geq 3, l \geq 1$.

Доказательство утверждения базируется на вычислении величины $p'_l(s|1)$, которое было приведено выше.

Средняя длина сеанса

Пусть $T_{k,l}$ — средняя длина сеанса кратности k в вершине ДРК уровня l . Известно, что для канала без ошибок $T_{0,0} = T_{1,0} = 1$. Для заблокированного МСА определить $T_{k,l}$ можно по следующей рекуррентной формуле [5]:

$$T_{k,l} = 1 + \sum_{i=\max(1, k-2^{l-1})}^{\min(k, 2^{l-1})} \Psi_{k,l,i}(T_{i,l-1} + T_{k-i,l-1}) + \Psi_{k,l,0}T_{k,l-1}. \quad (9)$$

Рассмотрим вычисление $T_{k,l}$ для АИМПК, учитывая особенности выполнения процедуры ПККС. Обозначим через $T'_{1,l}$ среднюю длину сеанса кратности 1 в вершине ДРК уровня l в случае выполнения процедуры ПККС.

Вычисление $T'_{1,0}$ рис. 9 иллюстрирует как $T'_{1,0} = 1 + (1 - q_1)0 + q_1 1 = 1 + q_1$. При возникнове-

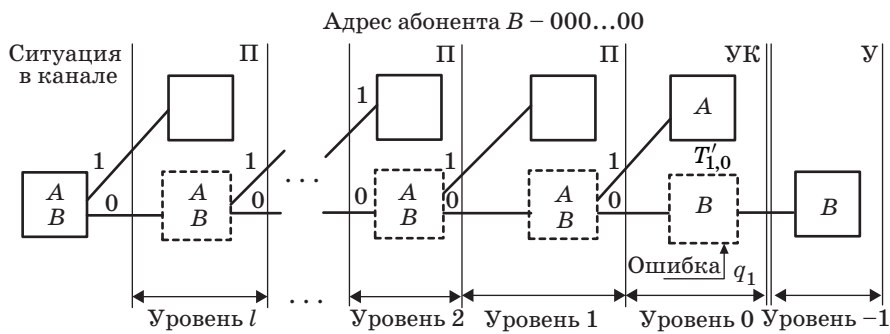
нии ложного конфликта в концевой вершине дерева (уровень 0 ДРК) используется дополнительное пустое окно (уровень -1 ДРК). При вычислении $T'_{1,1}$ необходимо рассмотреть два случая: при разрешении ложного конфликта кратности 1 пакет абонента B попадает в верхнее подмножество (рис. 10, а) или пакет попадает в нижнее подмножество (рис. 10, б). Тогда

$$T'_{1,1} = 1 + (1 - q_1)0 + \frac{1}{2}q_1((1 - q_0)1 + 2q_0) + \frac{1}{2}q_1 2 = 1 + \frac{3}{2}q_1 + \frac{1}{2}q_1q_0.$$

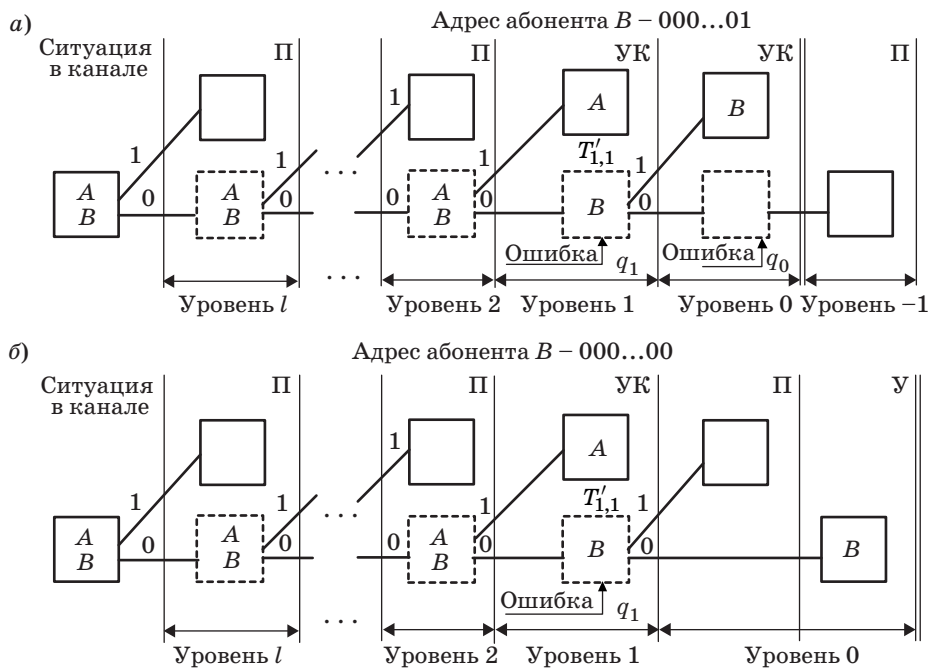
Получим зависимость величин $T'_{1,l}$ от номера уровня.

Утверждение 5. Величины $T'_{1,l}$ при $l \geq 0$ можно вычислить по формуле

$$T'_{1,l} = 1 + q_1(q_0(l - 1 + 2^{-l}) + 2 - 2^{-l}). \quad (10)$$



■ Рис. 9. Процедура ПККС выполняется на уровне 0 ДРК



■ Рис. 10. Процедура ПККС выполняется на уровне 1 ДРК: пакет абонента B попадает в верхнее (а) и нижнее (б) подмножество

Доказательство: Для $T'_{1,l}$ можно записать

$$T'_{1,l} = 1 + (1 - q_1) \cdot 0 + q_1 \left[\sum_{i=1}^l \frac{1}{2^i} [i(1 - q_0) + q_0(l + 1)] \right] + q_1 \frac{l + 1}{2^l}. \quad (11)$$

В формуле (11) последнее слагаемое соответствует случаю, когда в ложном конфликте участвует пакет абонента с адресом, состоящим только из нулей (полная длина адреса составляет $l + 1$ бит). В третьем слагаемом присутствует сумма по числу ведущих нулей в ненулевом адресе абонента, пакет которого попадает в конфликт. Упростим сумму в третьем слагаемом:

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^l \frac{1}{2^i} [i(1 - q_0) + q_0(l + 1)] = \\ & = (1 - q_0) \sum_{i=1}^l \frac{i}{2^i} + q_0(l + 1) \sum_{i=1}^l \frac{1}{2^i} = \\ & = (1 - q_0) \frac{\sum_{i=1}^l i 2^{l-i}}{2^l} + \frac{q_0(l + 1)(2^l - 1)}{2^l} = \\ & = \frac{(1 - q_0)(2^{l+1} - (l + 2)) + q_0(l + 1)(2^l - 1)}{2^l}. \quad (12) \end{aligned}$$

Подставляя (12) в (11), получим

$$\begin{aligned} T'_{1,l} & = 1 + q_1 \times \\ & \times \left[\frac{(1 - q_0)(2^{l+1} - (l + 2)) + q_0(l + 1)(2^l - 1) + l + 1}{2^l} \right] = \\ & = 1 + q_1 \left[\frac{q_0 2^l (l - 1) + 2^{l+1} - 1 + q_0}{2^l} \right] = \\ & = 1 + q_1 [q_0(l - 1 + 2^{-l}) + 2 - 2^{-l}]. \end{aligned}$$

Утверждение доказано.

Утверждение 6. Величины $T_{k,l}$ для АИМПК определяются по формуле

$$\begin{aligned} T_{k,l} & = 1 + \sum_{i=\max(2, k-2^{l-1})}^{\min(k, 2^{l-1})} \Psi_{k,l,i} (T_{i,l-1} + T_{k-i,l-1}) + \\ & + \Psi_{k,l,0} T_{k,l-1} + \Psi_{k,l,1} \tilde{T}_{k-1,l-1}, \end{aligned}$$

где

$$\tilde{T}_{k-1,l-1} = \begin{cases} T'_{1,l-1}, & \text{если } k = 2 \\ T_{k-1,l-1}, & \text{если } k > 2 \end{cases} \quad \text{при } k \geq 2, l \geq 1. \quad (13)$$

Доказательство утверждения основано на выделении из суммы в выражении (9) слагаемого при $i = 1$ и вычислении $T'_{1,l}$ по формуле (10).

Среднее время выхода

Пусть $d_{k,l}$ — среднее время выхода пакета из конфликта кратности k в вершине ДРК уровня l . Известно, что для канала без ошибок $d_{1,0} = 0$.

Для заблокированного МСА определить $d_{k,l}$ можно по следующей рекуррентной формуле [5]:

$$\begin{aligned} d_{k,l} & = 1 + \sum_{i=\max(1, k-2^{l-1})}^{\min(k, 2^{l-1})} \Psi_{k,l,i} \times \\ & \times \left(\frac{i}{k} d_{i,l-1} + \frac{k-i}{k} d_{k-i,l-1} + \frac{k-i}{k} T_{i,l-1} \right) + \\ & + \Psi_{k,l,0} d_{k,l-1}. \quad (14) \end{aligned}$$

Обозначим $d'_{1,l}$ среднее время выхода из конфликта кратности 1 в вершине ДРК уровня l в случае выполнения процедуры ПККС. В вершине ДРК уровня 0 возникает конфликт кратности 1 (см. рис. 9). Среднее время выхода пакета абонента B из конфликта можно определить по формуле $d'_{1,0} = (1 - q_1)0 + q_1 1 = q_1$. При вычислении $d'_{1,1}$ необходимо рассмотреть два случая: пакет абонента B при разрешении ложного конфликта попадает в верхнее подмножество (см. рис. 10, а) (время выхода из конфликта — одно окно) или пакет попадает в нижнее подмножество (время выхода из конфликта — два окна) (см. рис. 10, б). Тогда можно записать

$$d'_{1,1} = (1 - q_1)0 + \frac{1}{2} q_1 1 + \frac{1}{2} q_1 2 = \frac{3}{2} q_1.$$

Получим зависимость величин $d'_{1,l}$ от номера уровня.

Утверждение 7. Величины $d'_{1,l}$ при $l \geq 0$ можно вычислить по формуле

$$d'_{1,l} = q_1 (2 - 2^{-l}). \quad (15)$$

Доказательство: На основе свойств ДРК для $d'_{1,l}$ можно записать

$$d'_{1,l} = (1 - q_1) \cdot 0 + \frac{1}{2} q_1 + \frac{1}{2} q_1 \left(1 + \sum_{i=1}^l \frac{1}{2^{i-1}} \right). \quad (16)$$

Выполняя несложные преобразования в (16), получим выражение (15):

$$\begin{aligned} d'_{1,l} & = \frac{1}{2} q_1 + \frac{1}{2} q_1 \left(1 + \frac{2^l - 1}{2^{l-1}} \right) = \\ & = q_1 + q_1 \frac{2^l - 1}{2^l} = q_1 \frac{2^{l+1} - 1}{2^l} = q_1 (2 - 2^{-l}). \end{aligned}$$

Утверждение доказано. Следует отметить, что $d'_{1,l}$ не зависит от вероятности ложного конфликта q_0 .

Утверждение 8. Величины $d_{k,l}$ для АИМПК определяются по формуле

$$d_{k,l} = 1 + \sum_{i=\max(2, k-2^{l-1})}^{\min(k, 2^{l-1})} \Psi_{k,l,i} \times \left(\frac{i}{k} d_{i,l-1} + \frac{k-i}{k} d_{k-i,l-1} + \frac{k-i}{k} T_{i,l-1} \right) + \Psi_{k,l,0} d_{k,l-1} + \frac{k-1}{k} \Psi_{k,l,1} \tilde{d}_{k-1,l-1}$$

$$\tilde{d}_{k-1,l-1} = \begin{cases} d'_{1,l-1}, & \text{если } k=2 \\ d_{k-1,l-1}, & \text{если } k>2 \end{cases} \text{ при } k \geq 2, l \geq 1.$$

Доказательство утверждения основано на выделении из суммы в выражении (14) слагаемого при $i = 1$ и вычислении $d'_{1,l}$ по формуле (15).

Численные результаты

Стандарт ISO/IEC 18000-6 для разрешения конфликтов предлагает использовать блокированный немодифицированный стек-алгоритм [6, 7]. Для краткости этот алгоритм будем называть *стандартным алгоритмом*, а рассмотренный в работе [3] алгоритм, основанный на использовании идентификаторов меток и процедуры ПККС — *предложенным алгоритмом*. Представленные далее результаты численного расчета получены применительно к модели системы, описанной в работе [3]. Для предложенного алгоритма результаты приведены для случая, когда значения вероятностей ложных конфликтов q_0 и q_1 , возникающих при выполнении процедуры ПККС, одинаковы между собой и равны некоторому значению q , т. е. $q_0 = q_1 = q$.

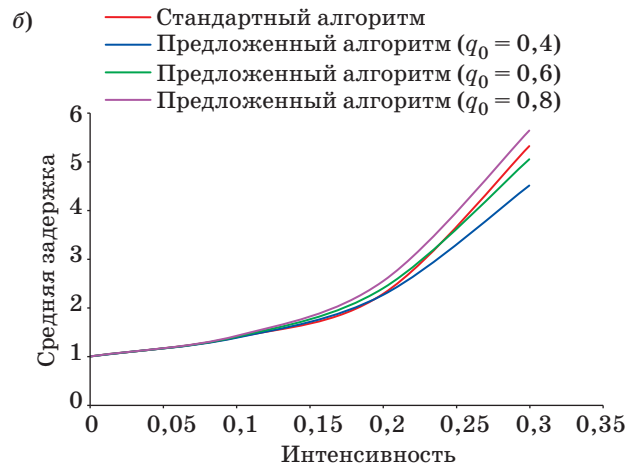
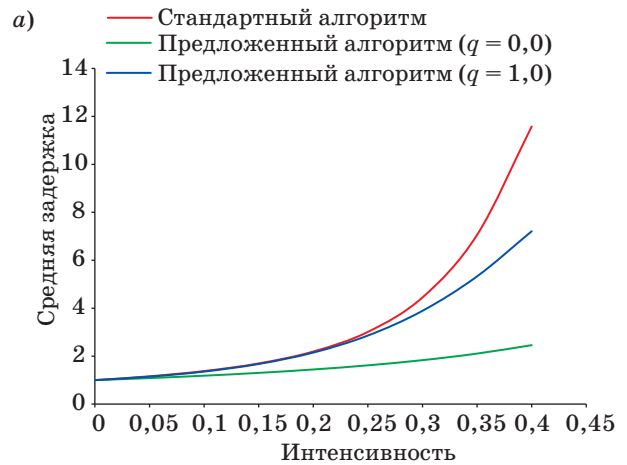
Значения средней задержки при различных интенсивностях входного потока (табл. 1) приведены для системы, состоящей из 16 абонентов. Соответствующая графическая зависимость представлена на рис. 11, а.

Результаты расчета показывают, что при небольшом числе абонентов в системе (8, 16) предложенный алгоритм всегда выигрывает у стандартного алгоритма при любых значениях веро-

ятностей ложных конфликтов, в том числе и при постоянных ошибках ($q = 1$) в процедуре ПККС.

Выигрыш по средней задержке предложенного алгоритма у стандартного алгоритма при отсутствии ошибок в процедуре ПККС представлен в табл. 2.

Следует отметить, что если $q_1 = 0$ (отсутствие ошибки восстановления полезного сигнала), то



■ Рис. 11. Графики зависимости средней задержки от интенсивности для системы из 16 (а) и 32 (б) абонентов

■ Таблица 1

Интенсивность	Средняя задержка, в окнах (M = 16)		
	Стандартный алгоритм	Предложенный алгоритм	
		q = 0,0	q = 1,0
0,05	1,16	1,086	1,145
0,1	1,379	1,186	1,357
0,15	1,698	1,303	1,674
0,2	2,193	1,444	2,15
0,25	3,012	1,618	2,86
0,3	4,449	1,834	3,892
0,35	7,06	2,108	5,33
0,4	11,58	2,459	7,211

■ Таблица 2

M	Отношение средней задержки стандартного алгоритма к средней задержке предложенного алгоритма при q = 0		
	λ = 0,1		
	λ = 0,1	λ = 0,2	λ = 0,3
8	1,170	1,508	2,187
16	1,163	1,519	2,426
32	1,154	1,509	2,634
64	1,146	1,493	2,802
128	1,141	1,479	2,922
256	1,138	1,468	2,997

ложные конфликты кратности 0 при этом также возникать не будут. В этом случае процедура ПККС работает без ошибок.

На рис. 11, б представлена графическая зависимость средней задержки от интенсивности входного потока для системы, состоящей из 32 абонентов для стандартного алгоритма и предложенного алгоритма при $q_1 = 1$ (постоянные ошибки восстановления полезного сигнала в процедуре ПККС) и различных значениях вероятности q_0 . По графику можно сделать вывод, что при небольших значениях вероятности $q_0 = 0,4$ предложенный алгоритм выигрывает у стандартного алгоритма по задержке, а при $q_0 = 0,8$, наоборот, лучше уже стандартный алгоритм. Это можно объяснить тем, что при большом числе абонентов и большом значении вероятности q_0 появляется большое число лишних пустых окон. На графике не представлена зависимость средней задержки от интенсивности при постоянных ошибках в процедуре ПККС ($q_0 = q_1 = 1$). Очевидно, что при этих значениях вероятностей стандартный алгоритм выигрывает у предложенного алгоритма.

Заключение

В данной работе выполнен численный расчет средней задержки алгоритма, основанного на использовании идентификаторов меток и процедуры ПККС. Полученные значения средней задержки являются верхней границей для средней задержки идентификации метки в системе радиочастотной идентификации. С использованием модели, описанной в работе [3], было исследовано влияние ошибок, возникающих при работе процедуры ПККС, на эффективность работы алгоритма. Результаты анализа показывают, что средняя задержка идентификации за счет использования идентификаторов меток и процедуры ПККС может быть уменьшена приблизительно в 3 раза (см. табл. 2). При небольшом числе абонентов (8, 16) предложенный алгоритм всегда выигрывает у стандартного алгоритма по средней задержке, даже при постоянных ошибках в процедуре ПККС. При большем числе абонентов (32 и выше) на среднюю задержку предложенного алгоритма влияет вероятность ошибки восстановления шумового сигнала q_0 .

Литература

1. Джунян В. Л., Шаньгин В. Ф. Электронная идентификация. Бесконтактные электронные идентификаторы и смарт-карты. — М.: АСТ; ИТ-Пресс, 2004. — 695 с.
2. Information Technology — Radio Frequency Identification (RFID) for Item Management. Part 6: Parameters for Air Interface Communications at 860 MHz to 960 MHz. International Standard ISO/IEC 18000-6, 2004. <http://www.youwokeji.com.cn/down/18000-6.pdf> (дата обращения: 17.02.2012).
3. Марковский С. Г., Марковская Н. В. Разрешение конфликтов в системах радиочастотной идентификации с использованием идентификаторов меток и процедуры последовательной компенсации конфликтных сигналов // Информационно-управляющие системы. 2012. № 2. С. 48–56.
4. Марковский С. Г., Тюрликов А. М. Использование идентификаторов абонентов для резервирования канала множественного доступа // Информационно-управляющие системы. 2008. № 2. С. 28–35.
5. Тюрликов А. М., Марковский С. Г. Использование адресов абонентов для организации доступа к высокоскоростному каналу связи // Информационно-управляющие системы. 2003. № 1. С. 32–38.
6. Цыбаков Б. С., Михайлов В. А. Свободный синхронный доступ пакетов в широковещательный канал с обратной связью // Проблемы передачи информации. 1978. Т. 14. № 4. С. 32–59.
7. Capetanakis J. L. Generalized TDMA. The Multi-Accessing Tree Protocol Channels. // IEEE Trans. Commun. 1979. Vol. 27. N 10. P. 1476–1483.

УДК 629.7:621.001

ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ БОРТОВОЙ АППАРАТУРЫ НА СТАДИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

В. П. Ларин,

доктор техн. наук, профессор

Д. К. Шелест,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Изложены принципы формирования информационного обеспечения при отработке на надежность сложных ответственных изделий. Рассмотрен процесс анализа критичности аппаратуры гиперзвуковых летательных аппаратов и элементы информационного сопровождения при решении надежности задач, необходимые для формирования электронной информации в интегрированной информационной среде специализированной программно-ориентированной системы.

Ключевые слова — надежность, формирование информационного обеспечения, интегрированная информационная среда, отработка на надежность, анализ критичности, модули функциональной модели, модули информационного обеспечения, модули информационного сопровождения.

Введение

Развитие технических систем, интенсификация их использования приводят к постоянно увеличивающемуся количеству техногенных катастроф и аварий и тяжести их последствий. При выяснении причин и проведении детального анализа катастроф и аварий огромное значение имеет полнота документационного сопровождения процессов формирования, обеспечения и поддержания надежности соответственно при проектировании, изготовлении и эксплуатации изделия. К сожалению, большая доля катастроф и аварий приходится на объекты аэрокосмической техники.

Проблема обеспечения надежности аэрокосмической аппаратуры становится все острее с повышением ее функциональной и конструктивной интеграции. Современные электронные средства авиационных и ракетных систем и комплексов представляют собой сложные наукоемкие изделия, проектирование которых выполняется с применением информационных технологий в качестве инструмента для решения различных задач отработки аппаратуры на надежность. Основой для обеспечения требуемого уровня надежности электронных средств военного и специального назначения является выполнение требований ГОСТ

РВ 20.39.302 [1]. При создании информационных технологий в процессе обеспечения надежности сложных электронных средств базовой основой служат требования и рекомендации международных стандартов ISO серии 9000 (в области качества), серии 10303 (CALS-технологии) и российских военных стандартов.

В последние десятилетия стремительно развиваются CALS-технологии, представляющие собой логически структурированный набор принципов и технологий, реализующих стратегию построения интегрированной информационной среды. В интегрированной информационной среде действует единая система правил представления и хранения информации, а также обмена ею, в соответствии с которыми протекают информационные процессы, сопровождающие и поддерживающие жизненный цикл изделия. Можно отметить несомненные успехи в области разработки теоретических положений CALS-технологий, практических методик сопровождения проектной информации и создания нормативной документации. Однако внимание разработчиков нормативных документов обращено в основном на стадию эксплуатации изделий и регламентацию технического обслуживания и документационного сопровождения процессов обслуживания и ремон-

та [2, 3]. В значительно меньшей степени разработаны вопросы информационного сопровождения и документационного оформления результатов обработки на надежность сложных ответственных изделий, т. е. те задачи, которые должны были войти в ГОСТ 27.114 «Информационное обеспечение надежности (системы ССНТ)». Состояние этой проблемы наиболее полно отражает публикация [4], содержащая обзор по практически всем наиболее значимым зарубежным и отечественным программным средствам для формирования надежности сложных технических систем. Рассмотренные средства предназначены для выполнения расчета показателей надежности, а часть из них решают задачи логико-вероятностного моделирования, но ни одно из них не решает в полной мере всю совокупность задач обработки изделия на надежность [2]. В то же время заказчик, потребитель изделия должен иметь полную информацию о комплексе проведенных мероприятий по обработке на надежность, о примененных расчетных методиках, а главное, о процессах и результатах испытаний на надежность и др. Получить подобную информацию в настоящее время крайне сложно.

Целью данной статьи является рассмотрение отдельных вопросов формирования информационного обеспечения процесса обработки на надежность. В качестве примера приводится процесс формирования надежности при проектировании аппаратуры гиперзвуковых летательных аппаратов (ГЛА), значительная часть которой критичная.

Принципы формирования информационного обеспечения проектирования бортовой аппаратуры ГЛА

В основе применения ГЛА лежит принцип гарантированного поражения объектов противника, следовательно, приборная аппаратура (ПА) ГЛА должна обладать такими показателями безотказности, которые позволяли бы при любых факторах полета сохранить живучесть, достаточную для выполнения боевого задания. Отказоустойчивость ГЛА как системы определяется критичностью составляющих элементов. Под критичностью элемента понимается его свойство, которое отражает возможность возникновения отказа и определяет степень влияния на работоспособность системы в целом для рассматриваемого ранга последствий.

Задача исследования критичности ПА ГЛА при воздействии факторов полета на гиперзвуковых скоростях рассматривалась в работе [5], где отмечено, что совместное действие механических сил и теплового нагрева на все элементы конструкции аппаратуры требует комплексных решений по защите от воздействующих факторов или ослаблению их действия до допустимых норм.

Основным критерием оценки допустимого уровня воздействия факторов полета ГЛА на аппаратуру является ее надежное функционирование в процессе выполнения задания по показателям безотказности.

В процессе проектирования анализ и отработка конструкции ПА ГЛА на устойчивость к механическим и тепловым воздействиям заключается в решении следующих задач в соответствии с положениями ГОСТ 27.310 [6]:

- выявлении возможных видов отказов элементов аппаратуры, их причин, механизмов и условий возникновения и развития;
- определении возможных неблагоприятных последствий возникновения выявленных отказов, проведении качественного анализа тяжести последствий отказов;
- составлении перечней критичных элементов конструкции.

Все результаты этих и последующих этапов обработки на надежность должны быть определенным образом оформлены и представлены в интегрированной информационной среде CALS. Программой основой построения этой среды является специализированный класс проблемно-ориентированных программных систем, получивших название PDM-систем (Product Data Management). Системы типа PDM обобщают такие технологии, как управление документами, конструкторскими и технологическими данными об изделии, управление проектами, работами и ресурсами. На основе базовых технологий PDM, комплексная реализация которых позволяет отслеживать и контролировать процесс разработки и выпуска продукции, применительно к решению задач надежности определены функции по управлению:

- конфигурацией изделия, обрабатываемого на надежность;
- качеством изделия по показателям надежности;
- процессом и ресурсами обработки (включая испытания) на надежность.

Формирование информации об отказоустойчивых элементах системы

Рассмотрим основные принципиальные особенности построения PDM-системы для управления обработкой на надежность, создания информационного обеспечения процесса, контроля обновляющихся массивов и т. д. Такая проблемно-ориентированная PDM-система должна иметь категорию «Надежность изделия» с характеристикой свойств надежности, подлежащих обработке. Общая база данных о надежности в программной среде PDM-системы должна содержать следующие разделы:

— архив методик по расчету показателей надежности;

— архив готовых решений по отработке на надежность и проведению испытаний на надежность;

— базу данных текущего проектирования.

Поскольку конфигурация изделия в целом и составляющие ее объекты конструирования должны быть соответствующим образом документированы, а эти документы утверждены, то и информация по формированию надежности должна быть представлена в виде массивов электронных данных и документально оформлена.

При решении задач формирования информации об отказоустойчивости и критичности ПА ГЛА как сложной многофункциональной системы в работе [5] использован комбинированный структурно-функциональный метод анализа. Общая схема (алгоритм) проведенного анализа представлена на рис. 1. Алгоритм описывает более простую процедуру анализа по сравнению с методами ФМЕСА и ФТА, реализованными в зарубежных RAM-системах.

Рассмотрим содержание информации, получаемой при анализе критичности ПА ГЛА. Об-

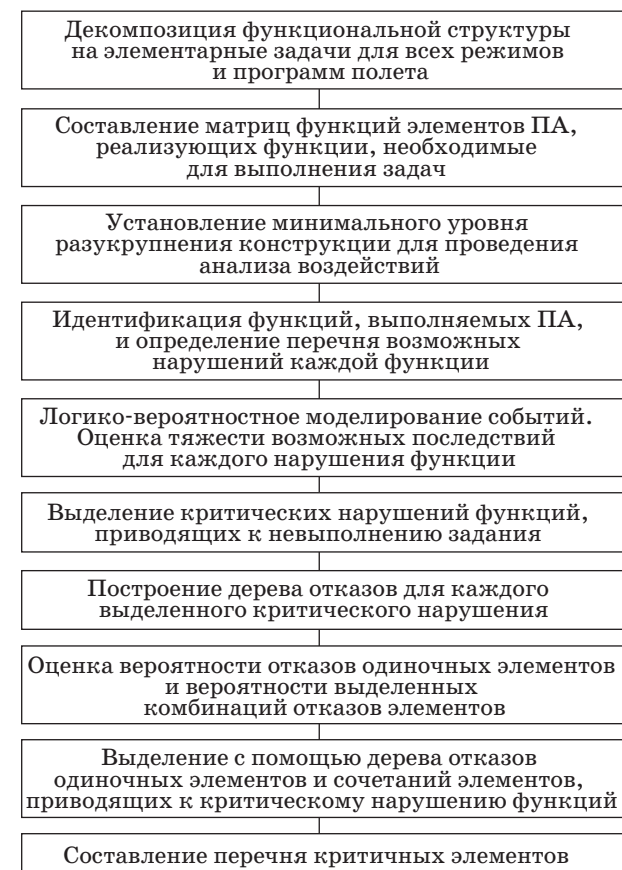
щее число возможных отказов в формируемом перечне складывается из общего числа всех выделенных условно независимых параметров по каждой функции системы с учетом возможного числа нарушений предельно допустимых значений по каждому параметру. При составлении перечня учитываются ограничения на условия применения изделия, нарушения которых рассмотрены как возможные отказы.

Далее перечень уточняется при анализе причин отказов и оценке вероятностей возникновения, возможностей обнаружения отказов и их последствий.

Существенным является четкое определение минимального уровня разукрупнения ПА. За минимальный уровень разукрупнения конструкции для анализа воздействий факторов полета авторами [5] приняты неделимые элементы конструкции. Этот уровень, в зависимости от вида конструкции, ее конструктивного исполнения, представлен пленочными элементами микросхем и микросборок; соединениями кристаллов микросхем, микросистемных элементов с корпусами; печатными проводниками и контактными площадками плат; микросварными и паяными соединениями компонентов и электрических цепей; соединениями оптоволоконных цепей.

Поиск отказоустойчивых вариантов конструкций и технологий

В качестве методических основ задания границ системы при анализе опасных состояний и отказов были приняты следующие принципы. Только главные, наиболее вероятные или критические события рассматривались на начальной стадии анализа. Для определения этих событий использован анализ критичности. Вся совокупность элементов конструкции летательного аппарата, бортового оборудования, приборов и устройств с позиции надежности рассматривалась как система, обеспечивающая работоспособное состояние ГЛА в целом в условиях воздействия всех факторов полета. Последующее разбиение структуры системы на отдельные конструктивные уровни позволяет провести анализ величины воздействия факторов полета ГЛА на элементы конструкции, рассмотреть виды нагружения элементов на различных этапах полета и исследовать механизмы потери работоспособности. Конечная цель такого анализа — поиск отказоустойчивых вариантов конструкций и технологических вариантов их реализации. Критичность не может быть определена только одним свойством элемента, а должна определяться в рамках всего технического объекта, его функциональной структуры. Наибольшую важность поэтому имеет функциональная надеж-



■ **Рис. 1.** Схема последовательности операций анализа при проведении отработки конструкций ПА и ее элементов на устойчивость к внешним воздействиям

ность, т. е. те последствия, которые могут иметь место в результате полного или частичного нарушения выполнения какой-либо функции. При ранжировании отказов по тяжести их последствий учитывались следующие факторы:

— опасность отказа (с учетом немедленных и отдаленных последствий) для целостности конструкции и сохранения работоспособного состояния до выполнения задания;

— влияние отказа на качество функционирования ПА и полноту выполнения ею назначенных функций, возможный ущерб любого вида, обусловленный снижением качества функционирования составных частей ПА или невыполнением определенных функций.

Ранжирование элементов по степени критичности может проводиться на различных уровнях структурирования объектов систем, агрегатов и узлов, частей конструкций и отдельных элементов на основе анализа морфологических блоков и структурных взаимосвязей. Чем больше «вес» элемента, тем он важнее для обеспечения безопасности объекта.

Формально задача ранжирования элементов по степени критичности с учетом одного или совокупности критериев относится к классу задач определения предпочтений многомерных альтернатив. Ее решение в каждом конкретном случае зависит от типов систем, выбранных частных показателей критичности, экспертной информации и т. д.

Все функции, реализуемые бортовыми системами, по степени влияния на целевую функцию ГЛА и тяжести последствий при нарушениях были разбиты на две группы. К первой группе отнесены функции, нарушение которых (полное или частичное) приводит к срыву задания, т. е. к невыполнению целевой функции ГЛА. Ко второй группе отнесены функции, нарушение которых (полное или частичное) приводит к частичной потере функционирования, но целевая функция ГЛА при этом может быть выполнена. Любые нарушения функций, приводящих к поражению незапланированной цели, отнесены к первой группе, так как тяжесть таких последствий может иметь значительный ущерб (для жизни людей, материальный, политический и др.) [5].

Задача выявления критичных элементов и их ранжирования особенно актуальна при анализе безопасности технических систем в условиях ограниченных ресурсов. Применительно к ПА ГЛА под ограниченностью ресурсов понимается невозможность физического вмешательства в процесс ликвидации отказа, ограниченность в широком использовании средств дублирования и резервирования, построения адаптивных средств восстановления, основанных на элементах искусственного интеллекта и т. п., из-за жестких огра-

ничений массогабаритных характеристик. Поскольку системы ПА ГЛА содержат большое количество элементов, то в условиях жестко ограниченных ресурсов обеспечить повышение надежности путем улучшения качества одновременно всех элементов не представляется возможным. Однако разные подсистемы, агрегаты или системы играют при функционировании объекта далеко не одинаковую роль, и отказы разных компонентов, как было выявлено, могут приводить к разным последствиям. Поэтому основное внимание было сосредоточено на разработке вариантов конструкций узлов, критичных элементов, играющих в обеспечении безотказности наиболее важную (ключевую) роль.

Выполнение описанных и последующих работ по созданию информационного обеспечения и сопровождения процесса отработки изделия на надежность и формирования документации отражает представленная на рис. 2 функциональная модель процесса.



■ **Рис. 2.** Функциональная модель информационно-сопровождения отработки на надежность сложных ответственных изделий: ПОН — программа обеспечения надежности; СЧ — составная часть; ВВФ — внешние воздействующие факторы

По результатам проведенных работ разрабатываются документы, состав которых определяется выбранными видами испытаний и соответствующими методиками на стадиях проектирования и изготовления (ускоренных испытаний, термоциклических испытаний, термотренировок, технологического прогона и др.).

Группу модулей VI составляют электронные документы, сопровождающие проектируемое изделие на последующих стадиях жизненного цикла изделия. Построение этих модулей выполняется на основе требований системы сбора и обработки информации о надежности.

Каждый модуль данных по отработке надежности ПА ГЛА состоит из двух частей: идентификационной (статусной) и содержательной. Идентификационная часть модуля данных содержит код модуля, номер версии модуля, дату издания,

причину издания, язык, уровень секретности сведений, применяемость. Содержательная часть состоит из описательной, процедурно-технологической информации, информации о возможных неисправностях при проведении приемосдаточных испытаний, регламента технического контроля, инструкции для оператора и др.

Заключение

Решение задач формирования информационного обеспечения процесса обработки изделий на надежность на основе предложенных подходов и принципов модульного построения позволит создать основу информационного сопровождения и документирования процесса отработки сложных изделий на надежность на стадии проектирования.

Литература

1. ГОСТ РВ 20.39.302–98. КСОТТ. Требования к программам обеспечения надежности и стойкости к воздействию ионизирующих и электромагнитных излучений. — М.: Госстандарт России, 1998. — 55 с.
2. Жаднов В. В. и др. Информационная технология обеспечения надежности сложных электронных средств военного и специального назначения // Компоненты и технологии. 2011. № 6. С. 168–174.
3. ГОСТ Р ИСО 10303-203–2003. Системы автоматизации производства и их интеграция. Представление данных об изделии и обмен этими данными. Ч. 203: Прикладной протокол. Проекты с управляемой конфигурацией. — М.: Госстандарт России, 2003. — 309 с.
4. Строганов А., Жаднов В., Полесский С. Обзор программных комплексов по расчету надежности сложных технических систем // Компоненты и технологии. 2007. № 5. С. 183–190.
5. Ларин В. П. Проблемы обеспечения надежности аппаратуры гиперзвуковых летательных аппаратов // Научная сессия ГУАП: Сб. докл.: В 4 ч. Ч. 1: Технические науки. СПб.: СПбГУАП, 2010. С. 28–30.
6. ГОСТ 27.310–95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критичности отказов. Основные положения. — М.: Госстандарт России, 1995. — 12 с.

УДК 621.396.966

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗОНЫ ПОИСКА НАДВОДНОГО ОБЪЕКТА ПО ДАННЫМ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЦЕЛЕУКАЗАНИЯ

А. П. Шепета,

доктор техн. наук, профессор

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

Выводятся аналитические соотношения, позволяющие рассчитывать зону поиска движущегося объекта, «накрывающую» объект с заданной вероятностью, по данным предварительного целеуказания координат объекта на поверхности.

Ключевые слова — зона поиска, вероятность накрытия, закон распределения.

Пусть на плоскости XOY обнаружен объект, координаты которого (X, Y) вводятся в бортовую систему автономного управления (САУ) летательного аппарата (ЛА). Летательный аппарат начинает полет к обнаруженному объекту, при этом координаты объекта (дальность) относительно ЛА рассчитываются в САУ. При достижении ЛА через время полета t расчетной точки, определяемой возможностями бортовой радиолокационной системы ЛА, на дальности L включается радиолокационный обзор зоны, в которой происходит поиск объекта. Координаты центра зоны поиска объекта на плоскости относительно системы координат XOY , связанной с ЛА, положим равными $(X = L, Y = 0)$, а размеры зоны по дальности и по азимуту обозначим через $\Delta L, \Delta \alpha$ соответственно. Найдем размеры зоны поиска, «накрывающей» объект с заданной вероятностью $P_{\text{накр}}$.

За время t обнаруженный объект движется в неизвестном направлении φ со скоростью V . Начальные координаты объекта (X, Y) определяются с некоторой случайной ошибкой, при расчете координат объекта в течение времени полета t также происходит накопление ошибки, обусловленной особенностями САУ. Поэтому к моменту начала поиска координаты объекта на плоскости XOY относительно ЛА, вычисленные в САУ, являются случайными величинами. Будем считать, что к моменту поиска начальное положение объекта (X_0, Y_0) на плоскости XOY определяется двумерным нормальным законом распределения

$$f_0(X_0, Y_0) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{(X_0 - L)^2}{\sigma_x^2} - \frac{Y_0^2}{\sigma_y^2}\right), \quad (1)$$

где σ_x^2 и σ_y^2 — дисперсии ошибок координат объекта в зоне поиска. Ошибки обусловлены ошибками первоначального определения координат объекта, ошибками ввода координат в систему САУ и ошибками системы САУ [1], определяющей координаты объекта в течение времени полета ЛА до расчетной точки включения активного поиска объекта в зоне $(\Delta L, \Delta \alpha)$.

К моменту включения режима поиска, через время t , положение объекта на плоскости XOY из-за движения объекта будет отличаться от рассчитанного. Обозначим координаты объекта к моменту t через X_t, Y_t . Тогда при движении объекта с постоянной скоростью V в направлении φ условная плотность распределения координат объекта на плоскости XOY определяется из выражения (1) в виде [2]

$$f_t(X_t, Y_t / V, \varphi) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \times \exp\left(-\frac{(X_0 - L - Vt \cos \varphi)^2}{\sigma_x^2} - \frac{(Y_0 - Vt \sin \varphi)^2}{\sigma_y^2}\right). \quad (2)$$

Размеры зоны поиска будут максимальны, если в качестве скорости V взять максимальную скорость V_{max} , а φ считать случайной величиной, равномерно распределенной в интервале $(-\pi, \pi)$. В этом случае, усредняя выражение (1) по φ и подставляя $V = V_{\text{max}}$ (усредняя по V , плотность рас-

пределения которой считаем дельта-функцией), получим

$$f_t(X_t, Y_t) = \frac{1}{4\pi^2 \sigma_x \sigma_y} \int_{-\pi}^{+\pi} \times \exp\left[-\frac{(X_0 - L - V_{\max} t \cos \varphi)^2}{\sigma_x^2} - \frac{(Y_0 - V_{\max} t \sin \varphi)^2}{\sigma_y^2}\right] d\varphi. \quad (3)$$

Выражение (3) и является искомым для расчета размеров зоны поиска (ΔL , $\Delta \alpha$) по дальности и по азимуту соответственно.

Рассмотрим частный случай выражения (3), а именно, положим $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$. В этом случае интеграл в выражении (3) может быть вычислен в явном виде

$$\begin{aligned} f_t(X_t, Y_t) &= \frac{1}{2\pi\sigma^2} \times \\ &\times \exp\left[-\frac{(X_t - L)^2 + Y_t^2 + (V_{\max} t)^2}{\sigma^2}\right] \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{+\pi} \times \\ &\times \exp\left[-\frac{V_{\max} t \sqrt{(X_t - L)^2 + Y_t^2}}{\sigma^2} \cos\left(\varphi - \arctg \frac{Y_t}{X_t - L}\right)\right] d\varphi = \\ &= \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{(X_t - L)^2 + Y_t^2 + (V_{\max} t)^2}{\sigma^2}\right] \times \\ &\times I_0\left(\frac{V_{\max} t \sqrt{(X_t - L)^2 + Y_t^2}}{\sigma^2}\right), \end{aligned} \quad (4)$$

где $I_0(\cdot)$ — функция Бесселя нулевого порядка от мнимого аргумента. Для рассматриваемого частного случая $\sigma_x = \sigma_y = \sigma$ выражение (4) совпадает с аналогичным выражением, полученным другим способом [3].

Зона поиска объекта с помощью радиолокационных средств задается в полярных координатах (ρ_t, α_t) , где ρ_t — дальность до объекта; α_t — азимут, $\alpha_t = 0$ вдоль оси (OX). Перейдем в выражении (4) к полярным координатам:

$$\begin{cases} \rho_t = \sqrt{X_t^2 + Y_t^2}, \\ \alpha_t = \arctg \frac{Y_t}{X_t}, \end{cases} \begin{cases} X_t = \rho_t \cos \alpha_t, \\ Y_t = \rho_t \sin \alpha_t, \end{cases} \quad (5)$$

поэтому

$$f_t(\rho_t, \alpha_t) = f_t(X_t, Y_t) \begin{vmatrix} \frac{\partial X_t}{\partial \rho_t} & \frac{\partial Y_t}{\partial \rho_t} \\ \frac{\partial X_t}{\partial \alpha_t} & \frac{\partial Y_t}{\partial \alpha_t} \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Подставляя в (6) значения декартовых координат из (5), получаем выражение

$$\begin{aligned} f_t(\rho_t, \alpha_t) &= \frac{\rho_t}{2\pi\sigma^2} \exp\left[-\frac{\rho_t^2 - 2\rho_t L \cos \alpha_t + L^2 + (V_{\max} t)^2}{2\sigma^2}\right] \times \\ &\times I_0\left(\frac{V_{\max} t \sqrt{\rho_t^2 - 2\rho_t L \cos \alpha_t + L^2}}{\sigma^2}\right), \end{aligned} \quad (7)$$

которое и является исходным для расчета зоны поиска, «накрывающей» объект с заданной вероятностью $P_{\text{накр}}$, а именно, ΔL и $\Delta \alpha$ должны удовлетворять соотношению

$$P_{\text{накр}} = 2 \int_{L - \frac{\Delta L}{2}}^{L + \frac{\Delta L}{2}} \int_0^{\Delta \alpha / 2} f_t(\rho_t, \alpha_t) d\rho_t d\alpha_t. \quad (8)$$

Выражение (8) определяет размеры зоны поиска неоднозначно: существует множество пар $(\Delta L, \Delta \alpha)$, которые удовлетворяют (8). Поэтому на размеры зоны в полярных координатах можно наложить дополнительные условия. Например, фиксирование числа каналов обнаружения по дальности ограничивает выбор ΔL , а фиксирование времени поиска (при сканировании зоны поиска радиолокационным лучом) ограничивает $\Delta \alpha$.

Выражение (4) получено при условии, что зона поиска $(\Delta L, \Delta \alpha)$ имеет максимальные размеры, что эквивалентно заданию плотности распределения случайных величин (V, φ) в виде

$$f(V, \varphi) = \frac{1}{2\pi} \delta(V - V_{\max}), \quad (9)$$

т. е. в виде произведения равномерно распределенной в интервале $(-\pi, \pi)$ величины φ и детерминированной величины V , плотность распределения которой считаем дельта-функцией. Можно задать другие условия относительно априорной информации о движении объекта обнаружения, что выразится в ином функциональном виде плотности распределения $f(V, \varphi)$, по которой необходимо усреднить выражение (2). При этом выражения (5), (6) и окончательное выражение (8) остаются в неизменном виде.

Литература

1. Коржавин Г. А., Подоплекин Ю. Ф., Шаров С. Н. Особенности радиолокационного обнаружения, селекции и классификации морских целей // Изв. РАН. 2006. Вып. 50. С. 81–86.
2. Ким Д. П. Методы поиска и преследования подвижных объектов. — М.: Наука, 1989. — 336 с.
3. Шепета А. П., Финоженко Г. Н. Определение зоны поиска при движении объекта. Комплексные радиоэлектронные системы управления // Межвуз. сб. ЛЭТИ / Под. ред. В. И. Бесекерского. Л., 1977. С. 119–121.

СОХРАНЯЯ И ПРИУМНОЖАЯ ТРАДИЦИИ

История факультета интеллектуальных систем управления и нанотехнологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения (ГУАП, в прошлом ЛИАП) берет свое начало с 1962 г., когда факультет авиационных приборов и электрооборудования Ленинградского института авиационного приборостроения был разделен на два факультета — приборов и автоматики летательных аппаратов и электрооборудования летательных аппаратов. Название и состав кафедр менялся в соответствии с развитием перспективных направлений науки и техники и потребностями промышленности, которые были всегда приоритетными для факультета в плане подготовки инженерных кадров и специалистов высшей квалификации.

Первым деканом факультета (1962–1973) был *Г. И. Дорофеев*, затем этот пост занимали *В. Ф. Шукалов*, *И. А. Огурк*, *В. В. Хрущев*, *Б. С. Петровский*, *Н. А. Шехунова*. С 2006 г. и по настоящее время факультет возглавляет *Л. И. Чубраева*.

Годы с 1962-го по 80-е можно охарактеризовать как период становления факультета, органически связанный с развитием профилирующих кафедр, с формированием научных школ, взрастивших плеяду ученых мирового уровня, с большим вкладом в развитие отечественной промышленности; расширения и углубления связей вуза с исследовательскими, проектными и производственными предприятиями страны.

История кафедр, составивших основу факультета и определивших его развитие, непосредственно связана с историей самого университета, образованного в 1941 г.

Кафедра электропривода летательных аппаратов

Первым заведующим кафедрой был *Б. А. Ягунов*, затем *И. А. Верebrюсов*, *И. А. Огурк*, *О. С. Попов*, *А. С. Коновалов*. С 2011 г. кафедрой заведует *В. Ф. Шишлаков*.

В 1965 г. кафедра была переименована в кафедру электрооборудования летательных аппаратов. Наряду с традиционными курсами по электроприводу, системам электроснабжения летательных аппаратов, полупроводниковым приборам усилительных и преобразовательных устройств начали преподаваться такие дисциплины, как «Цифровые системы управления», «Теория адаптивного управления», «Оптимальные самонастраивающиеся системы», «Автоматизация проектирования систем автоматического управления». Тем самым была заложена база для развития на кафедре новых направлений науки и техники.

В 1969 г. на кафедре была организована отраслевая лаборатория, где проводились исследования по созданию оптимальных самонастраивающихся САУ тормозными системами воздушных судов. Разработанные в этой лаборатории системы торможения применяются как штатные на самолетах ИЛ-86, ИЛ-96, ТУ-204, АН-124.

Велась большая научная работа по разработке учебно-исследовательской САПР нелинейных САУ, которая успешно завершилась созданием такой САПР и подсистемы промышленной САПР САУ.

С 1981 г. стали развиваться новые научные направления. В частности, решались задачи адаптивного, а затем интеллектуального управления сложными технологическими объектами. Результаты исследований были использованы при управлении автономными и буксируемыми подводными аппаратами, предназначенными для изучения шельфа.

Развитие новых направлений в научных исследованиях и в учебном процессе привело к тому, что прежнее название перестало соответствовать профилю кафедры, и она была переименована в кафедру управления и информатики в технических системах.

В период 1998–2011 гг. получили развитие научные связи кафедры с Российской академией наук, в частности, с Институтом проблем машиноведения РАН. Сотрудники кафедры работали над масштабным проектом разработки системы управления большим радиотелескопом РТ-70. В последние годы тематика научных исследований связана с приложениями систем искусственного интеллекта в задачах управления.



■ *Сотрудники кафедры управления и информатики в технических системах*

На кафедре развиваются идеи искусственного интеллекта, нейросетевого и нечеткого управления применительно к техническим системам.

Кафедра электрических машин

Образование кафедры относится к 1946 г. Создатель кафедры *Д. А. Завалишин* был основоположником школы электромашинно-вентильных преобразователей энергии.

Учебно-научная деятельность кафедры была тесно связана с производством, что явилось залогом внедрения многих разработок. С 1946-го по 1952 г. на кафедре работал *И. А. Глебов*, впоследствии лауреат многих Государственных премий, действительный член АН СССР. Он занимался исследованием синхронного генератора с ионным преобразователем в цепи возбуждения. Данная работа была началом нового научного направления в отечественном и мировом энергомашиностроении по разработке высокоэффективных вентильных систем возбуждения турбо- и гидрогенераторов и завершилась практически разработками на предприятиях электромашиностроения.

С приходом на кафедру в 1961 г. *В. В. Хрущева* появилось новое научное направление по разработке информационных микромашин для авиационных систем автоматики. Были выполнены основополагающие работы по теории, расчету и проектированию микроэлектромашин для систем автоматики. *В. В. Хрущев* (заведующий кафедрой с 1972 г.) считается основателем научно-педагогической школы в области малых электрических машин, главные направления которой: повышение точности информационных электрических машин, создание прецизионных аналоговых и цифроаналоговых преобразователей, разработка исполнительных бесконтактных электродвигателей с электронными коммутаторами (вентильных электродвигателей), создание САПР электрических машин малой мощности, применение микропроцессорных устройств для управления и улучшения характеристик малых электрических машин. Эти работы были отмечены Государственной премией СССР в области науки и техники.

На кафедре обучались и работали аспиранты целевой подготовки для вузов и НИИ других городов страны — Томска, Оренбурга, Воронежа, Севастополя, Симферополя, Еревана, Вильнюса.

Велась большая научно-исследовательская работа по договорам с ведущими отраслевыми предприятиями города: по созданию прецизионных электромашинных датчиков угла с погрешностью на уровне единиц угловых секунд, вращающихся трансформаторов при импульсном питании для индикаторов кругового обзора радиолокационных станций, вентильных двигателей по-

стоянного тока, асинхронных двигателей, тахогенераторов.

Заметной вехой в развитии кафедры стало открытие в 1974 г. технологической специализации в рамках специальности «Электрические машины». Подготовка студентов велась на базе Научно-исследовательского института специальных электрических машин (НИИСЭМ, ныне ВНИТИ «Электромашиностроение»). Такая форма обучения явилась ценным опытом при создании в дальнейшем базовых кафедр факультета на ряде предприятий города.

В 1982 г. на кафедре была открыта новая специальность «Робототехнические системы и комплексы», содержание которой отвечало новейшим тенденциям развития науки и техники. Для преподавания были приглашены специалисты по робототехнике, системам управления и микропроцессорной технике. Учитывая электромеханическую направленность в подготовке студентов, в 1985 г. кафедра была переименована в кафедру робототехнических и электромеханических систем.

Заслуживает внимания участие кафедры в эксперименте по целевой интенсивной подготовке студентов (ЦИПС). Благодаря такому участию кафедра получила опыт обучения студентов с ориентацией на конкретную отрасль и предприятие.

Высокий профессиональный уровень коллектива, высочайший уровень научных исследований, тесная связь с промышленностью и научными институтами, в том числе и со структурами РАН, сделали кафедру известной не только в России, но и за рубежом. С 1991 г. кафедрой заведовал *Г. В. Тазов*, а затем *А. В. Тимофеев*. В 2000 г. по решению ученого совета кафедра была переименована в кафедру информационных технологий в электромеханике, возглавила ее *Л. И. Чубраева*. В соответствии с новыми потребностями,



■ Сотрудники кафедры робототехнических и электромеханических систем

наряду с традиционными направлениями, кафедра занята научной деятельностью по созданию сверхпроводящих электрических машин, накопителей энергии, микро- и нанотехнологий.

Кафедра теоретических основ электротехники

Формирование кафедры связано с приходом в институт в 1947 г. замечательного педагога и талантливого ученого *М. И. Оранского*, ставшего первым ее заведующим. Его сменил *О. Б. Брон*, затем кафедрой руководил ученик *Д. А. Завалишина* *Б. В. Фролов*.

Ведущие ученые, заведя кафедрой (*Ю. А. Розовский*, *П. Ю. Каасик*, *А. К. Явленский*) на долгие годы определили самые разные направления научных исследований кафедры: в области низковольтного электроаппаратостроения, синтеза электрических машин и полупроводниковых преобразователей, определения диаграмм направленности антенных систем и идентификации электромагнитных полей, многокоординатного электропривода на базе индукторного электродвигателя с управлением от отечественной мини-ЭВМ «Электроника-60» для роботизированных систем; расчет параметров и характеристик шаровых гироскопов, электрических машин с цилиндрическим и сферическим ротором; создание безредукторного электродвигателя для симулятора системы ориентации и навигации космических аппаратов со скоростью вращения один оборот в сутки и высокой равномерностью углового перемещения вала; разработка диагностических моделей устройств силовой электроники и машинно-вентильных систем и систем контроля и диагностики электротехнического оборудования.

Созданы новые лабораторные работы по курсам линейных и нелинейных цепей, теории электромагнитного поля с элементами учебных исследований (УИРС) и внедрен фронтальный метод проведения работ.



■ Сотрудники кафедры электротехники и технической диагностики

В 2005 г. кафедра переименована в кафедру электротехники и технической диагностики, а заведующим назначен *А. А. Ефимов*.

Развитие факультета с начала 1980-х гг. по настоящее время

К началу 1980-х гг. кафедры факультета обладали серьезным научным потенциалом, развитой учебно-лабораторной и методической базой, сплоченным и квалифицированным кадровым составом. Это позволило факультету достаточно просто пройти период реорганизации, пришедшийся на середину 80-х гг.

В связи с развитием мировой и отечественной науки и техники и новыми потребностями отечественной промышленности происходит расширение номенклатуры специальностей факультета и модернизация традиционных направлений подготовки инженеров. В эти годы в состав факультета входит кафедра автоматизированных систем управления (АСУ), в связи с чем факультет меняет название на факультет систем управления и электрооборудования летательных аппаратов. В 1984 г. в институте была образована кафедра систем автоматизированного проектирования (САПР), которая в 1986 г. вошла в состав факультета авиационных приборов и автоматов. Несмотря на кратковременность работы в составе третьего факультета, кафедра САПР дала заметный импульс в развитии факультета, особенно в направлении систем управления робототехнических комплексов. Таким образом, на факультете была выстроена логическая последовательность в подготовке молодых специалистов: «АСУ промышленного предприятия — САПР — гибкая производственная система (ГПС)», — составляющая основу современного гибкого интегрированного производства.

В 2009 г. в состав факультета вошла кафедра микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения, история которой начинается в 1945 г.



■ Сотрудники кафедры микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения

Первым заведующим кафедрой был назначен *П. И. Буловский*. Наряду с традиционным направлением научных исследований, связанных с технологией производства приборных комплексов, в 70–80-х гг. получили развитие такие направленные научные исследования, как автоматизированное проектирование технологической оснастки, разработка и эксплуатация гибких производственных комплексов и систем, неразрушающие методы и приборы контроля качества промышленной продукции.

Результаты научных исследований коллектива кафедры нашли широкое применение на предприятиях и в проектных организациях.

Тесное сотрудничество с ведущими технологическими предприятиями аэрокосмической отрасли позволило кафедре эффективно работать в области современного научного направления — исследования и разработки нанотехнологий. Кафедра является выпускающей по специальностям «Технология приборостроения (в аэрокосмическом приборостроении)» и «Проектирование и технология электронно-вычислительных средств» и обеспечивает технологическую подготовку студентов всех технических специальностей университета. С 2008 г. кафедрой заведует *В. П. Ларин*.

В 2011 г. состоялся первый прием студентов для обучения на кафедре термоядерной и ядерной энергетики, образованной на факультете в 2007 г. Инновационный проект «Сверхпроводящие индуктивные накопители электромагнитной энергии», выполняемый с участием специалистов кафедры в 2008–2009 гг., отмечен Золотой медалью оргкомитета специализированной выставки.

Логическим продолжением в развитии факультета и его связей с промышленностью и ведущими научными институтами явилось создание базовых кафедр. Так, в 1997 г. в соответствии с договором о сотрудничестве между ГУАП и Санкт-Петербургским институтом информатики и автоматизации РАН (СПИИРАН) была организована базовая кафедра нейроинформатики и робототехники, что позволило использовать новые информационные технологии и научные достижения СПИИРАН в учебном процессе. Привлечение студентов и аспирантов ГУАП к научно-исследовательской работе по грантам и научным проектам СПИИРАН определяет высокий уровень подготовки выпускников, получающих в процессе обучения сочетание теоретических знаний с практическими навыками в решении актуальных технических задач и научных проблем.

В 2008 г. в ОАО «Силовые машины» была организована базовая кафедра диагностики электромеханотронных систем. Преподаватели читают курсы лекций по проблемным вопросам диагно-

стики и контроля качества электромеханических и электромеханотронных систем.

В 2012 г. открыта базовая кафедра наноматериалов в электромеханических и электротехнических системах в Институте химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН.

Создание в 2001 г. базовой кафедры технологий приборостроения явилось естественным продолжением сотрудничества кафедры технологии ГУАП и ЦНИИ «Авангард», начавшегося в 1960-х гг. В то время удалось создать своего рода полигон по подготовке инженеров, владеющих новыми технологиями изготовления микросхем и микросборок. В ОАО «Авангард» создан специализированный класс для занятий студентов; разработана образовательная система на базе двух колледжей, ГУАП и ОАО «Авангард», с согласованной трехсторонними договорами программой подготовки. В настоящее время главными направлениями работы базовой кафедры являются подготовка магистров, целевая подготовка кадров высшей квалификации, индивидуальная учебно-научная работа со студентами.

Помимо перечисленных, факультет в самых разных областях сотрудничал с ведущими организациями и предприятиями отрасли: ПО «Ленинец» ЦНИИ «Электроприбор», НПО «Прикладная механика», ОКБ «Кристалл», заводами «Машиноаппарат», «Пирометр», Вологодским подшипниковым заводом, ФГУП «ЦНИИСЭТ», ЗАО «Взлет», НПП «Дальняя связь», ОАО «Позитрон», «Информационные спутниковые системы», «Техприбор» и др.

Факультет интеллектуальных систем управления и нанотехнологий, имея пятидесятилетнюю историю, за годы своего существования подготовил тысячи инженеров и ученых, внес неосценимый вклад в развитие отечественной науки и промышленности. По инициативе выпускников факультета и под их руководством выполняются актуальные исследования и разработки технических систем и устройств с уникальными характеристиками. Сохраняя и приумножая традиции, заложенные его основателями, коллектив факультета достойно продолжает благородное дело воспитания молодого поколения технически грамотных, разносторонне образованных, владеющих современными методами научных исследований специалистов.

*М. А. Волохов — канд. техн. наук, доцент
кафедры информационных технологий
в электромеханике и робототехнике ГУАП*

*В. Д. Косулин — канд. техн. наук, доцент
кафедры электромеханики
и технической диагностики ГУАП*

АГАПОВ
Владимир
Анатольевич



Соискатель ученой степени кандидата технических наук, младший научный сотрудник лаборатории методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург.

В 2011 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

Является автором одной научной публикации.

Область научных интересов — моделирование механических систем, проектирование систем управления.

Эл. адрес: agapov1989@mail.ru

АРТЕМЕНКО
Юрий
Николаевич



Заведующий отделом проектирования и координации работ Физического института им. П. Н. Лебедева РАН, г. Москва.

В 1975 году окончил Московский авиационный институт по специальности «Производство летательных аппаратов».

В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций и двух запатентованных изобретений.

Область научных интересов — методы математического моделирования, оценивания и управления механическими системами, антенные системы и комплексы для решения радиоастрономических задач.

Эл. адрес: feli@asc.rssi.ru

ВОЛХОНСКИЙ
Владимир
Владимирович



Профессор кафедры твердотельной оптоэлектроники Санкт-Петербургского национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики.

В 1974 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Радиотехника».

В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 190 научных и учебно-методических публикаций, в том числе 11 монографий.

Область научных интересов — интегрированные системы безопасности, системы охранной сигнализации, контроля доступа, телевизионного наблюдения.

Эл. адрес: volkhonski@mail.ru

АНТИПОВ
Виктор
Николаевич



Ведущий научный сотрудник лаборатории химической энергетики и экологии ордена Трудового Красного Знамени Института химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, действительный член Академии электротехнических наук РФ.

В 1963 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Электрические машины и аппараты».

В 1989 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 130 научных публикаций и шести запатентованных изобретений.

Область научных интересов — электромеханика, электромеханические преобразователи энергии, расчет электромагнитных и тепловых полей.

Эл. адрес: bht@mail.ru

ВЛАДЫКО
Андрей
Геннадьевич



Начальник управления экспериментальных разработок Санкт-Петербургского государственного университета телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича.

В 1996 году окончил Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет.

В 2000 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 30 научных публикаций, одного запатентованного изобретения и одного зарегистрированного комплекса программ.

Область научных интересов — информационные системы, интеллектуальные системы управления.

Эл. адрес: vladiko@bk.ru

ВОРОНЦОВ
Алексей
Геннадьевич



Ведущий инженер бюро электроприводов переменного тока завода «Электросила», старший преподаватель базовой кафедры диагностики электромехатронных систем ОАО «Силловые машины» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1998 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 50 научных публикаций.

Область научных интересов — математическое моделирование и синтез систем управления устройств силовой электроники и электромеханических систем.

Эл. адрес: ag.vorontsov@gmail.com

**ГЛАЗКОВ
Сергей
Викторович**



Аспирант Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 2008 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М. А. Бонч-Бруевича по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

Является автором шести научных публикаций.

Область научных интересов — разработка многомодальных интерфейсов для телекоммуникационных приложений.

Эл. адрес: glazkov@ias.spb.su

**ГОРОДЕЦКИЙ
Андрей
Емельянович**



Доктор технических наук, профессор, заведующий лабораторией методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург, заслуженный деятель науки и техники.

В 1965 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина.

В 1993 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 150 научных публикаций и 70 изобретений.

Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика.

Эл. адрес:

gorodetsky@mail23.ipme.ru

**ДЕНИСЕНКО
Дмитрий
Анатолевич**



Аспирант кафедры электроники и биомедицинских технологий Уфимского государственного авиационного технического университета.

В 2009 году окончил Уфимский государственный авиационный технический университет по специальности «Авиационные приборы и измерительно-вычислительные комплексы».

Является автором пяти научных публикаций и одного программного модуля.

Область научных интересов — исследование систем управления летательными аппаратами в условиях интервальной неопределенности.

Эл. адрес: bender_ostap@bk.ru

**ДУБАРЕНКО
Владимир
Васильевич**



Ученый секретарь Института проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург.

В 1963 году окончил Ленинградский военно-механический институт по специальности «Механика», в 1965 году — по специальности «Системы управления».

В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 70 научных публикаций.

Область научных интересов — интеллектуальные системы и системы управления.

Эл. адрес: dvv@msa.ipme.ru

**ЕФАНОВ
Владимир
Николаевич**



Профессор, заведующий кафедрой авиационного приборостроения Уфимского государственного авиационного технического университета.

В 1973 году окончил Уфимский авиационный институт им. С. Орджоникидзе по специальности «Промышленная электроника».

В 1995 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 300 научных публикаций и 30 запатентованных изобретений.

Область научных интересов — информационные технологии управления сложными техническими системами.

Эл. адрес: efanov@mail.rb.ru

**ИВАНОВ
Николай
Николаевич**



Заместитель директора по научной работе ОАО «Авангард», доцент кафедры микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный радист РФ.

В 1975 году окончил Ленинградский электротехнический институт связи им. проф. М. А. Бонч-Бруевича по специальности «Конструирование и производство радиоэлектронной аппаратуры».

В 1990 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук.

Является автором 25 научных публикаций и 11 запатентованных изобретений.

Область научных интересов — технология изготовления радиоэлектронных средств и изделий микросистемной техники.

Эл. адрес: ivaniknik@gmail.com

ИВАНОВ
Сергей
Александрович



Преподаватель кафедры боевого применения подразделений артиллерийской разведки Михайловской военной артиллерийской академии, г. Санкт-Петербург.

В 1999 году окончил Михайловский военный артиллерийский университет по специальности «Радиоэлектронные системы». В 2005 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 80 научных публикаций и трех запатентованных изобретений. Область научных интересов — радионавигационные системы, радиотехнические многопозиционные системы.
Эл. адрес: kabalustuk@mail.ru

КОЗЮЧЕНОК
Сергей
Сергеевич



Старший научный сотрудник НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, г. Санкт-Петербург.

В 1979 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Экспериментальная ядерная физика».

Является автором шести научных публикаций.

Область научных интересов — распределенные системы управления технологическими процессами.

Эл. адрес: kozuchonok@mit.niiefa.spb.su

КОСТЮКОВА
Ольга
Ивановна



Гражданка Беларуси.

Профессор, главный научный сотрудник Института математики Национальной академии наук Беларуси.

В 1976 году окончила Белорусский государственный университет по специальности «Прикладная математика».

В 1991 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора физико-математических наук.

Является автором более 150 научных публикаций, в том числе трех монографий.

Область научных интересов — теория оптимального управления динамическими системами, параметрические задачи оптимизации и анализ чувствительности.

Эл. адрес: kostyukova@im.bas-net.by

КРУЧИНИНА
Ирина
Юрьевна



Заместитель директора по научной работе Института химии силикатов им. И. В. Гребенщикова РАН, заведующая базовой кафедрой наноматериалов в электромеханических и электротехнических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

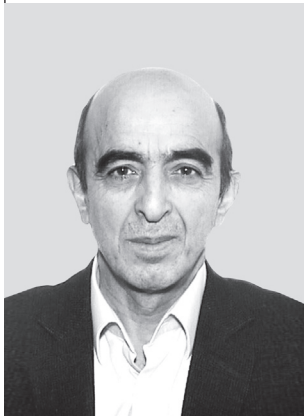
В 1984 году окончила Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина.

В 2006 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 75 научных публикаций и трех запатентованных изобретений.

Область научных интересов — методы проектирования электромеханических преобразователей энергии на основе новых материалов и нанотехнологий.

Эл. адрес: ikruch@isc.nw.ru

КУРБАНОВ
Вугар
Гариб оглы



Старший научный сотрудник лаборатории методов и средств автоматизации Института проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург.

В 1976 году окончил Азербайджанский государственный университет им. С. М. Кирова по специальности «Прикладная математика».

В 1983 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук.

Является автором 50 научных публикаций.

Область научных интересов — математическое моделирование процессов управления, методы логического анализа систем, логико-вероятностные методы.

Эл. адрес: vugar_borchali@yahoo.com

КУЧМИН
Андрей
Юрьевич



Старший научный сотрудник лаборатории механики управляемых систем Института проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург.

В 2005 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения.

В 2007 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 22 научных публикаций и двух запатентованных изобретений.

Область научных интересов — математическое моделирование в естественных науках, искусственный интеллект и принятие решений, математические проблемы теории управления и др.

Эл. адрес: radiotelescope@yandex.ru

**ЛАРИН
Валерий
Павлович**



Профессор, заведующий кафедрой микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, почетный работник высшего профессионального образования РФ. В 1964 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения. В 1998 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 90 научных публикаций. Область научных интересов — конструирование бортовой аппаратуры, технология монтажа и контроля приборов и электронных устройств, внутренний монтаж электронных узлов, технологическое обеспечение надежности. Эл. адрес: larinvp39@yandex.ru

**МАРКОВСКИЙ
Станислав
Георгиевич**



Доцент кафедры информационно-сетевых технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1986 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электронные вычислительные машины». В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 40 научных публикаций и двух запатентованных изобретений. Область научных интересов — протоколы случайного множественного доступа, мобильные системы связи, нетрадиционные архитектуры компьютеров. Эл. адрес: msg_k53@mail.ru

**ПАВЛОВ
Константин
Юрьевич**



Научный сотрудник НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, г. Санкт-Петербург. В 2008 году окончил Санкт-Петербургский государственный политехнический университет по специальности «Оптическая физика и квантовая электроника». Является автором 12 научных публикаций. Область научных интересов — лазерная физика, программируемые электронные устройства. Эл. адрес: pavlovk@mit.niiefa.spb.su

**МАРКОВСКАЯ
Наталья
Владимировна**



Доцент кафедры информационно-сетевых технологий Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1996 году окончила Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет) по специальности «Химическая технология тугоплавких неметаллических и силикатных материалов». В 2003 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором десяти научных публикаций и двух запатентованных изобретений. Область научных интересов — многообонентные системы связи, нетрадиционные архитектуры компьютеров. Эл. адрес: msg_k53@mail.ru

**ПАВЛЕНКО
Александр
Васильевич**



Старший научный сотрудник, начальник лаборатории НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, г. Санкт-Петербург. В 1974 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Радиофизика, включая квантовую электронику». В 1984 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Является автором более 50 научных публикаций. Область научных интересов — интегральная и волоконная оптика, системы управления. Эл. адрес: pavlenko@mit.niiefa.spb.su

**ПРОНИН
Михаил
Васильевич**



Начальник бюро электроприводов переменного тока завода «Электросила», профессор, заведующий базовой кафедрой диагностики электромехатронных систем ОАО «Силловые машины» Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения. В 1969 году окончил Ленинградский электротехнический институт им. В. И. Ульянова (Ленина) по специальности «Электрооборудование судов». В 2006 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором 100 научных публикаций. Область научных интересов — математическое моделирование и синтез систем управления устройств силовой электроники и электромеханических систем. Эл. адрес: m_pronin@elsila.spb.su

РОНЖИН
Андрей
Леонидович



Доцент, заведующий лабораторией речевых и многомодальных интерфейсов Санкт-Петербургского института информатики и автоматизации РАН.

В 1999 году окончил Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором 167 научных публикаций.

Область научных интересов — разработка речевых и многомодальных интерфейсов.

Эл. адрес: ronzhin@iias.spb.su

САКСАГАНСКИЙ
Георгий
Леонидович



Профессор, заведующий кафедрой термоядерной и ядерной энергетики Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1959 году окончил Ленинградский политехнический институт по специальности «Электровакуумные машины», в 1964 году — Северо-Западный заочный политехнический институт по специальности «Радиотехника».

В 1986 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором около 200 научных публикаций и более 90 изобретений.

Область научных интересов — экспериментальное и математическое моделирование вакуумного тракта термоядерных реакторов и ускорительных комплексов и др.
Эл. адрес: sageol@mail.ru

ТАРАСОВА
Ирина
Леонидовна



Доцент, старший научный сотрудник Института проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург.

В 1978 году окончила Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина.

В 1998 году защитила диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором более 50 научных публикаций.

Область научных интересов — математическое моделирование, оптимальное управление, идентификация и диагностика.

Эл. адрес: til@msa2.ipme.ru

УЛЬЯНОВ
Геннадий
Николаевич



Профессор, ведущий инженер отдела ОКБ ОАО «НПО «ЛЭМЗ», г. Москва, заслуженный деятель науки и техники РФ, академик Академии военных наук, член-корреспондент Санкт-Петербургской инженерной академии, почетный профессор Михайловской военной артиллерийской академии.

В 1964 году окончил Военную артиллерийскую академию им. М. И. Калинина.

В 1989 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 200 научных публикаций и 15 запатентованных изобретений.

Область научных интересов — радиолокация, радионавигация.
Эл. адрес: gulyanov@yandex.ru

ФЕДОРЦОВА
Наталья
Михайловна



Гражданка Беларуси.

Главный инженер проекта Конструкторско-технического центра Государственного объединения «Белорусская железная дорога».

В 2006 году окончила Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники по специальности «Информатика», в 2007 году — магистратуру при Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники по специальности «Прикладная математика и информатика».

Является автором десяти научных публикаций.

Область научных интересов — теория управления динамическими системами с неопределенностями.
Эл. адрес: fedartsova@tut.by

ХОН
Александр
Юрьевич



Начальник группы специальных источников питания НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова, г. Санкт-Петербург.

В 1980 году окончил Ленинградский политехнический институт им. М. И. Калинина по специальности «Электрофизика». Является автором более 20 научных публикаций.

Область научных интересов — мощная импульсная техника микросекундного диапазона, сильные точечные источники питания и высокочастотные преобразователи энергии.

Эл. адрес: hon@sintez.niiefa.spb.ru

ЧУБРАЕВ
Дмитрий
Валерьевич



Доцент кафедры информационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, руководитель группы поддержки приложений на фирме-операторе швейцарской передающей электрической сети Swissgrid, Швейцария.

В 1993 году окончил с отличием Санкт-Петербургский государственный технический университет по специальности «Электромеханика».

В 1998 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук. Является автором 25 научных публикаций.

Область научных интересов — информационные системы в электротехнике и электроэнергетике. Эл. адрес: dtchoubraev@ieee.org

ЧУБРАЕВА
Лидия
Игоревна



Профессор, декан факультета интеллектуальных систем управления и нанотехнологий, заведующая кафедрой информационных технологий в электромеханике и робототехнике Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, член-корреспондент РАН, академик Академии электротехнических наук РФ.

В 1970 году окончила Ленинградский институт авиационного приборостроения.

В 1992 году защитила диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук. Является автором более 180 научных публикаций, четырех монографий, 15 изобретений.

Область научных интересов — электромеханика, нетрадиционная электромеханика, прикладная сверхпроводимость. Эл. адрес: kaf_32@aanet.ru

ШЕЛЕСТ
Дмитрий
Константинович



Профессор кафедры микро- и нанотехнологий аэрокосмического приборостроения Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1973 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Конструирование и технология производства радиоаппаратуры». В 1999 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 160 научных публикаций.

Область научных интересов — конструирование бортовой аппаратуры, технологическое обеспечение надежности, контрольно-регулирующие процессы производства, конструирование микроузлов электронной и приборной аппаратуры. Эл. адрес: shelestd@mail.ru

ШЕПЕТА
Александр
Павлович



Профессор, декан факультета вычислительных систем и программирования, заведующий кафедрой моделирования вычислительных и электронных систем Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения, академик Международной академии наук высшей школы.

В 1972 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения.

В 1995 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 170 научных публикаций.

Область научных интересов — обработка информации в условиях априорной неопределенности, математическое моделирование стохастических процессов и полей. Эл. адрес: alex@shepeta.com

ШИШЛАКОВ
Владислав
Федорович



Профессор, заведующий кафедрой управления и информатики в технических системах Санкт-Петербургского государственного университета аэрокосмического приборостроения.

В 1982 году окончил Ленинградский институт авиационного приборостроения по специальности «Электрооборудование летательных аппаратов».

В 2002 году защитил диссертацию на соискание ученой степени доктора технических наук.

Является автором более 100 научных и учебно-методических публикаций, в том числе трех монографий.

Область научных интересов — синтез нелинейных систем автоматического управления с различными видами модуляции сигнала. Эл. адрес: kaf_32@aanet.ru

УДК 681.5

Групповое управление актуаторами контррефлектора радиотелескопа

Артеменко Ю. Н., Агапов В. А., Дубаренко В. В., Кучмин А. Ю. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 2–9.

Рассматривается задача построения кинематической и динамической моделей гексапода, используемого для перемещения контррефлектора. Исследуется проблема расчета выдвинутых штоков актуаторов с учетом быстродействия их приводов и инерции системы контррефлектор — гексапод.

Ключевые слова — радиотелескоп, гексапод, актуатор.

Список лит.: 2 назв.

УДК 621.791.35

Роль информационных технологий при создании новой техники

Чубраева Л. И., Шишляков В. Ф. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 10–15.

Рассмотрены вопросы, связанные с применением информационных технологий при создании электроэнергетических устройств, систем и комплексов нового поколения, принцип действия которых основан на использовании явления высокотемпературной сверхпроводимости.

Ключевые слова — информационные технологии, высокотемпературная сверхпроводимость.

Список лит.: 3 назв.

УДК 681.5

Комплексная система управления установкой для тестирования элементов дивертора ИТЭР

Козюченко С. С., Павленко А. В., Павлов К. Ю., Саксаганский Г. Л. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 16–19.

Описана комплексная система управления установки, предназначенной для квалификационных испытаний диверторных пластин термоядерной установки ИТЭР под воздействием электронного пучка. Кратко сформулирован порядок работы стенда, функции и задачи системы управления. Приведены состав и структура используемого оборудования, архитектурные особенности разработанного прикладного программного обеспечения.

Ключевые слова — ИТЭР, дивертор, система управления.

Список лит.: 3 назв.

УДК 621.314.263

Управление сверхпроводящим индуктивным накопителем энергии

Пронин М. В., Воронцов А. Г., Хон А. Ю. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 20–24.

Предложена схема и алгоритм управления накопителем энергии со сверхпроводящими индуктивными катушками. В накопителе использован многотактный активный выпрямитель и широтно-импульсные преобразователи. Предложено векторное управление, которое обеспечивает регулирование активной и реактивной мощностей сети переменного напряжения, а также напряжения нагрузки.

Ключевые слова — сверхпроводящий накопитель энергии, активный выпрямитель, векторное управление, математическая модель, компьютерная модель.

Список лит.: 12 назв.

УДК 681.5

Co-operative Control of Subdish Actuators of Radio-Telescope

Artemenko Yu. N., Agapov V. A., Dubarenko V. V., Kuchmin A. Yu. IUS, 2012. N 4. P. 2–9.

The development task of kinematic and dynamic models of hexapod used for pointing of a subdish is considered. The problem of finding actuators displacements with account of their response times and inertia of hexapod-subdish system is studied.

Keywords — Radio-Telescope, Hexapod, Actuator.

Refs: 2 titles.

УДК 621.791.35

The role of Information Technologies at Developing New Devices

Chubraeva L. I., Shishlakov V. F. IUS, 2012. N 4. P. 10–15.

The issues regarding the application of IT at developing new generation power devices, systems and sets which working principle is based on use of the high-temperature superconductivity phenomenon are considered.

Keywords — Information Technologies, High-Temperature Superconductivity.

Refs: 3 titles.

УДК 681.5

Complex Automatic Control System for ITER Divertor Components Testing

Kozuchenko S. S., Pavlenko A. V., Pavlov K. Yu., Saksa-gansky G. L. IUS, 2012. N 4. P. 16–19.

The complex automatic control system designed to implement qualification tests on divertor components for the International Thermonuclear Experimental Reactor facility at the exposure to an electron beam is presented. The principles of the facility operation and automatic control system functions and objectives are debriefed. Hardware hierarchy structure and architectural features of the developed application software are described.

Keywords — ITER, Divertor, Automatic Control System.

Refs: 3 titles.

УДК 621.314.263

Control over the Superconducting Inductive Energy Storage

Pronin M. V., Vorontsov A. G., Khon A. Yu. IUS, 2012. N 4. P. 20–24.

The scheme and algorithm of control of the energy storage with superconducting inductive coils is proposed. A multistage active rectifier and PWM converters is used in the store. The vector control equation which provides regulation of active and reactive powers of a variable voltage network as well as load voltage is offered.

Keywords — Superconducting Energy Storage, Active Rectifier, Vector Control, Mathematical Model, Computer Model.

Refs: 12 titles.

УДК 621.313

Проблемные вопросы создания высокоскоростных мини-турбогенераторов и пути их решения

Кручинина И. Ю., Антипов В. Н. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 25–34.

Выполнены исследования по созданию мини-турбогенераторов предельных мощностей, основанные на применении новых материалов. Определены максимально допустимые электромагнитные и механические нагрузки мини-турбогенераторов мощностью 100 и 200 кВт в зависимости от допустимых размеров сердечника статора. Разработаны модели для комплексной оптимизации выбранных параметров генератора и для решения трехмерной контактной задачи теории упругости методом конечных элементов на математической модели фрагмента конструкции ротора. Для решения принципиальных проблем создания мини-турбогенератора мощностью 200 кВт с частотой вращения 100 000 мин⁻¹ и выше необходимо получить более прочные материалы и антифрикционные покрытия для ротора, аморфные сплавы для сердечника статора и улучшить высококоэрцитивные магниты. В статье приведена расчетная оценка влияния свойств материалов на технико-экономические показатели мини-турбогенераторов.

Ключевые слова — высокоскоростной генератор, новые материалы, покрытия, постоянные магниты, аморфные сплавы.

Список лит.: 13 назв.

УДК 621.311

Информационная система оперативного планирования европейского оператора передающей сети

Чубраев Д. В. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 35–42.

В современной фирме-операторе передающей сети в условиях развития рынка и широкого внедрения возобновляемой энергетики одними из основных стали процессы оперативного планирования нового поколения. В статье описывается развитие концепции реализации и автоматизации процессов оперативного планирования на фирме Swissgrid, являющейся системным оператором швейцарской передающей сети и координатором энергетического блока «Юг» европейской объединенной сети.

Ключевые слова — оперативное планирование, система планирования, оператор передающей сети, SCADA, EMS.

Список лит.: 6 назв.

УДК 621.313

Creation Problems of High-Speed Mini Turbo Generators and Ways of their Solution

Kruchinina I. Yu., Antipov V. N. IUS, 2012. N 4. P. 25–34.

Investigations on creation of ultimate rating mini turbo generators using modern materials are carried out. Maximum permissible electromagnetic and mechanical loads depending on permissible core dimensions of mini-turbo generators with power of 100 and 200 kW. Complex simulation models for optimization of the generator chosen parameters and for the elasticity theory 3D contact problem solution based on numerical finite element method are worked out. In order to tackle the principal problem of the mini turbo generator with rating of 200 kW and speed of rotation 100 000 rpm and more it is necessary to develop highstrength materials and anti-friction coatings for the rotor, amorphous alloys for stator's core and to enhance highcoercivity of permanent magnets. The technical and economic estimation of mini turbo generators using various materials is given in the paper.

Keywords — High Speed Generator, New Materials, Coatings, Permanent Magnets, Amorphous Alloys.

Refs: 13 titles.

УДК 621.311

New Generation Operational Planning Software System for the European TSO

Tchoubraev D. V. IUS, 2012. N 4. P. 35–42.

The major elements of operational security of the Continental Europe Synchronous Area interconnected power network are the Operational Planning processes including Day-Ahead Congestion Forecast process that is to be performed by all member states of the European Network. This article describes the approach of the Swiss Transmission System Operator Swissgrid during creation of the operational planning system of the new generation performed in the environment of further market development, wide renewable energy endorsement and intensive integration of operational planning processes in Europe.

Keywords — Operational Planning, Planning System, TSO, SCADA, EMS.

Refs: 6 titles.

УДК 517.977.58

Исследование свойств решений линейно-квадратичных параметрических задач оптимального управления
Костюкова О. И., Федорцова Н. М. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 43–51.

Рассматривается однопараметрическая линейно-квадратичная задача оптимального управления с особыми участками. Исследуются свойства решений данной задачи в окрестности нерегулярного параметра. Показано, что в нерегулярном случае при достаточно малых возмущениях параметра может измениться структура решения задачи. Приведены условия, позволяющие определить структуру решения задачи при возмущенном значении параметра, используя решение невозмущенной задачи.

Ключевые слова — оптимальное управление, параметрическая оптимизация, возмущенные задачи, линейно-квадратичные задачи, особые участки.

Список лит.: 10 назв.

УДК 519.71

Синтез робастных систем управления в среде ортогональных функций экспоненциального вида

Денисенко Д. А., Ефанов В. Н. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 52–58.

Описывается методика синтеза систем управления с интервально заданными параметрами. Показано, что разложение временных характеристик системы в ряд по системе ортогональных функций экспоненциального вида позволяет сформулировать условия, при выполнении которых выходные координаты принадлежат допустимой временной области для всего диапазона изменения параметров объекта.

Ключевые слова — синтез, ортогональный ряд, интервальный анализ, система неравенств.

Список лит.: 6 назв.

УДК 681.5

Экспертная система анализа и прогнозирования аварийных ситуаций в энергетических установках

Городецкий А. Е., Курбанов В. Г., Тарасова И. Л. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 59–63.

Предложена экспертная система, которая позволяет прогнозировать аварийные ситуации в энергетических установках большой единичной мощности на основе логико-вероятностного моделирования.

Ключевые слова — логико-вероятностная модель, логико-вероятностная переменная, вероятность безотказной работы, база данных, база знаний, машина логического вывода.

Список лит.: 4 назв.

УДК 621.396.6.019.3:621.79

Вероятностная модель диффузионного распределения для оценки надежности радиоэлектронных приборов
Иванов Н. Н. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 64–69.

Даются рекомендации по применению вместо однопараметрического экспоненциального распределения двухпараметрического диффузионного немонотонного распределения при описании надежности паяных соединений радиоэлектронных приборов.

Ключевые слова — паяное соединение, вероятностная модель, радиоэлектронный прибор, надежность, диффузионное немонотонное распределение.

Список лит.: 12 назв.

УДК 517.977.58

Investigation of Solution Properties of Linear-Quadratic Parametric Optimal Control Problems

Kostyukova O. I., Fedartsova N. M. IUS, 2012. N 4. P. 43–51.

One-parametric linear-quadratic optimal control problem with singular arcs is considered. Solution properties of the above mentioned problem are investigated in a neighbourhood of an irregular parameter. It is shown that in irregular case sufficiently small perturbations of the parameter value can change the problem solution structure. Conditions are given that allow to determine solution structure for a perturbed parameter value using solution of the unperturbed problem.

Keywords — Optimal Control, Parametric Optimization, Perturbed Problems, Linear-Quadratic Problems, Singular Arcs.

Refs: 10 titles.

УДК 519.71

Synthesis of Robust Control Systems in the Environment of Orthogonal Functions of Exponential Type

Denisenko D. A., Efanov V. N. IUS, 2012. N 4. P. 52–58.

The technique of synthesis of control systems with interval specified parameters is depicted. It is shown that the expansion of temporal characteristics of the system in a series of orthogonal functions of exponential type allows to formulate the conditions in which the output coordinates belong to a valid time domain for the whole range of the object parameters change.

Keywords — Synthesis, Orthogonal Series, Interval Analysis, System of Inequalities.

Refs: 6 titles.

УДК 681.5

Expert System of Analysis and Forecasting Emergencies in Power Generating Systems

Gorodetsky A. E., Kurbanov V. V., Tarasova I. L. IUS, 2012. N 4. P. 59–63.

The description of structure of expert system for the analysis and forecasting development of emergencies in power generating systems of a large unit capacity and the algorithm of logical-and-probabilistic modeling of degradation of the equipment while in service taking into account a probabilistic estimation of their parameters and mutual influence of the basic technical operational indicators of connected blocks is given in the article.

Keywords — Logical-and-Probabilistic Model, Logical-and-Probabilistic Variable, Probability of Non-Failure Operation, Database, Knowledge Base, Machine of Logic Conclusion.

Refs: 4 titles.

УДК 621.396.6.019.3:621.79

Probabilistic Model of Diffusion Distributions for Estimation of Reliability in Radio-Electronic Devices

Ivanov N. N. IUS, 2012. N 4. P. 64–69.

The recommendations concerning application of two-parametric diffusion of the non-monotonic distribution instead of one-parametric exponential distributions describing reliability of solder bonds in radio-electronic devices are made.

Keywords — Solder Bond, Probabilistic Model, Radio-Electronic Device, Reliability, Diffusion Non-Monotonic Distribution.

Refs: 12 titles.

УДК 681.51

Модель канала управления беспилотного летательного аппарата с нечетким логическим контроллером
Ульянов Г. Н., Иванов С. А., Владыко А. Г. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 70–73.

Рассматривается модель канала управления с нечетким логическим контроллером в системе управления беспилотного летательного аппарата. Формируется методика проектирования модели системы регулирования с нечетким логическим контроллером. Приводятся результаты имитационного моделирования системы с нечетким логическим контроллером.

Ключевые слова — система управления, беспилотный летательный аппарат, нечеткая логика.

Список лит.: 5 назв.

УДК 004.896

Метод автоматического распознавания голосовых команд и неречевых акустических событий

Ронжин А. Л., Глазков С. В. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 74–77.

Рассматривается метод анализа акустических данных, позволяющий классифицировать по голосовым командам пользователя и неречевым звукам текущую ситуацию в помещении и принять меры в случае возникновения чрезвычайных обстоятельств. Разработанный метод распознавания акустических элементов основан на применении математического аппарата скрытых марковских моделей.

Ключевые слова — автоматическое распознавание речи, цифровая обработка сигналов, ассистивные системы, интеллектуальное пространство.

Список лит.: 14 назв.

УДК 621.39

Некоторые вопросы разработки методологии построения систем контроля доступа и выбора технологии идентификации

Волхонский В. В. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 78–83.

Рассмотрена модель системы контроля доступа с использованием теории множеств и понятия переходов. На ее основе сформулированы принципы построения таких систем как одного из основных элементов систем защиты объектов информатизации. Предложены критерии выбора технологии идентификации, позволяющие повысить надежность идентификации.

Ключевые слова — контроль доступа, принципы построения, критерии выбора технологии идентификации.

Список лит.: 7 назв.

УДК 681.51

The Model of Controlling the Unmanned Aerial Vehicle with a Fuzzy Logic Controller

Ulyanov G. N., Ivanov S. A., Vladyko A. G. IUS, 2012. N 4. P. 70–73.

The model of the control channel with a fuzzy logic controller in the control system of the unmanned aerial vehicle is considered. The method of designing a regulation system model with a fuzzy logic controller is articulated. The results of the simulation system modeling with a fuzzy logic controller are presented.

Keywords — Unmanned Aerial Vehicle, Control System, Fuzzy Logics.

Refs: 5 titles.

УДК 004.896

The Method of Automatic Recognition of Voice Commands and Non-Speech Acoustic Events

Ronzhin A. L., Glazkov S. V. IUS, 2012. N 4. P. 74–77.

The method of analysis of acoustical data applied for classification of current situation in a room by voice user commands and non-speech sounds and then for taking measures to avoid emergency situation is considered. The developed method of acoustical element recognition is based on the mathematics of hidden Markov models.

Keywords — Automatic Speech Recognition, Digital Signal Processing, Assistive Systems, Intelligent Environment.

Refs: 14 titles.

УДК 621.39

Some Issues of Access Control Systems Methodology Development and Choice Criteria of ID Technology

Volkhonskiy V. V. IUS, 2012. N 4. P. 78–83.

The access control system model is considered using the set theory and cross terms. Based on it the principles of access control systems development and choice criteria of ID technology are formulated. The ID technology choice criteria which allow to increase identification reliability are proposed.

Keywords — Access Control, Development Principles, Choice Criteria, ID Technology.

Refs: 7 titles.

УДК 004.728.3.057.4

Расчет средней задержки алгоритма разрешения конфликтов в системах радиочастотной идентификации
Марковский С. Г., Марковская Н. В. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 84–92.

Для системы радиочастотной идентификации производится численный расчет средней задержки древовидного алгоритма, использующего для разрешения конфликтов идентификаторы меток и процедуру последовательной компенсации конфликтных сигналов. Показывается, что средняя задержка алгоритма существенно меньше средней задержки алгоритма, описанного в стандарте ISO/IEC 18000-6. Исследуется влияние ошибок процедуры последовательной компенсации конфликтных сигналов на работу алгоритма разрешения конфликта.

Ключевые слова — системы радиочастотной идентификации, идентификаторы меток, процедура последовательной компенсации конфликтных сигналов, алгоритм разрешения конфликтов.

Список лит.: 7 назв.

УДК 629.7:621.001

Формирование информационного обеспечения надежности бортовой аппаратуры на стадии проектирования

Ларин В. П., Шелест Д. К. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 93–97.

Изложены принципы формирования информационного обеспечения при отработке на надежность сложных ответственных изделий. Рассмотрен процесс анализа критичности аппаратуры гиперзвуковых летательных аппаратов и элементы информационного сопровождения при решении надежностных задач, необходимые для формирования электронной информации в интегрированной информационной среде специализированной программно-ориентированной системы.

Ключевые слова — надежность, формирование информационного обеспечения, интегрированная информационная среда, отработка на надежность, анализ критичности, модули функциональной модели, модули информационного обеспечения, модули информационного сопровождения.

Список лит.: 6 назв.

УДК 621.396.966

Определение зоны поиска надводного объекта по данным предварительного целеуказания

Шепета А. П. Информационно-управляющие системы, 2012. № 4. С. 98–99.

Выводятся аналитические соотношения, позволяющие рассчитывать зону поиска движущегося объекта, «накрывающую» объект с заданной вероятностью, по данным предварительного целеуказания координат объекта на поверхности.

Ключевые слова — зона поиска, вероятность накрытия, закон распределения.

Список лит.: 3 назв.

УДК 004.728.3.057.4

Collision Resolution in Radio Frequency Identification Systems using Tag Identifiers

Markovsky S. G., Markovskaya N. V. IUS, 2012. N 4. P. 84–92.

An average delay of the tree algorithm using tag identifiers and successive interference cancellation procedure is calculated to resolve collisions for Radio Frequency Identification systems. The average delay of the algorithm is demonstrated to be greatly smaller than the average delay of the algorithm described in ISO/IEC 18000-6 standard. The influence of the successive interference cancellation procedure errors on the performance of the collision resolution algorithm is investigated.

Keywords — Radio Frequency Identification Systems, Tag Identifiers, Successive Interference Cancellation Procedure, Collision Resolution Algorithm.

Refs: 7 titles.

УДК 629.7:621.001

Shaping of the Information Support for Reliability of Onboard Equipment at the Design Stage

Larin V. P., Shelest D. K. IUS, 2012. N 4. P. 93–97.

The principles of shaping the information support at working out reliability of difficult responsible products are stated. The process of the equipment criticality analysis for hypersonic flying machines and elements of information support are considered at solution of reliability problems that are necessary for shaping the electronic information in the integrated information environment of the specialized program-focused system.

Keywords — Reliability, Shaping of Information Support, Integrated Information Environment, Working out Reliability, Criticality Analysis, Functional Model Units, Units of Information Support.

Refs: 6 titles.

УДК 621.396.966

Definition of the Search Area of an Above-Water Object based on Preliminary Targeting Data

Shepeta A. P. IUS, 2012. N 4. P. 98–99.

Analytical relations allowing to calculate the search area of a moving object covering the object with the given probability based on preliminary surface object coordinates targeting data are set.

Keywords — Search Area, Covering Probability, the Law of Distribution.

Refs: 3 titles.



TURKMENTEL



THE 6TH INTERNATIONAL EXHIBITION AND CONFERENCE FOR TELECOMMUNICATIONS, TELEMETRY AND INFORMATION TECHNOLOGIES "TURKMENTEL-2012"

17-19 SEPTEMBER
ASHGABAT, TURKMENISTAN

VI МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА И КОНФЕРЕНЦИЯ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ, ТЕЛЕМЕТРИИ, ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ "ТУРКМЕНТЕЛ-2012"

17-19 СЕНТЯБРЯ
АШХАБАД, ТУРКМЕНИСТАН

www.turkmenistantelecoms.com

Organised by | Организаторы:



Ministry of Communication of Turkmenistan
Министерство связи Туркменистана



Chamber of Commerce and Industry of Turkmenistan
Торгово-промышленная палата Туркменистана

Co-Organisers | Co-Организаторы

summit
TRADE EVENTS



For further information please contact
Summit Trade Events on the following details:
За более полной информацией обращайтесь
к Summit Trade Events по следующим координатам:

In London / в Лондоне:
Tel: +44 (0) 207 328 8899 / Fax: +44 (0) 207 624 9030
e-mail: mm@summittradeevents.com

In Ashgabat / в Ашхабаде
Tel: +993 12 264000
e-mail: summittradeevents@gmail.com

ITE LLC Moscow
Tel: +7 495 935 7350#4251 / Fax: +7 495 935 7351
e-mail: kochergina@ite-expo.ru
www.ite-expo.ru

ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

17–19 октября 2012

X специализированная
выставка

/Информационные
технологии/
/Телекоммуникации/

ВЫСТАВКА
itCOM



Современные услуги связи

Телекоммуникационные
технологии

Мультимедиа

Программное
обеспечение

Оргтехника



Автоматизация бизнеса

Информационные
технологии в рекламе

ФотоЭкспо

E-business

Кабельное
и спутниковое
телевидение

Официальная
поддержка:



сибирь
международный
выставочно-деловой центр
имени Карена Мурадяна

Организатор – ВК «Красноярская ярмарка»

МВДЦ «Сибирь», ул. Авиаторов, 19
тел.: (391) 22-88-613, 22-88-611 — круглосуточно
itcom@krasfair.ru, www.krasfair.ru