Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

2

2016

Главный редактор
Микрин Е.А. — д.т.н., проф., академик РАН, ОАО РКК «Энергия» им. С.П. Королёва

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Белоусов В.Л. — д.э.н., проф., МГУПИ
Ван Сяофэн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Дегтярёв Ю.И. — д.т.н., проф., МАИ
Елисеев В.А. — д.т.н., проф., Ин-т инновац.-технологич. менеджмента
Иванов А.П. — д.э.н., проф., МГУПС (МИИТ)
Криони Н.К. — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)
Мальцева С.В. — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ
Микаева С.А. — д.т.н., проф., МГУПИ
Неусыпин К.А. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Нефёдов Е.И. — д.ф.-м.н., ИРЭ РАН
Никифоров В.М. — д.т.н., проф., ФГУП «НПЦАП им. Н.А. Пилюгина»
Осипова В.Г. — ООО «Изд-во Инновационное машиностроение» (заместитель главного редактора)
Пролетарский А.В. — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана
Румянцева О.Н. — генеральный директор ООО «Изд-во Инновационное машиностроение»
Фёдоров И.Б. — д.т.н., проф., академик РАН, президент МГТУ им. Н.Э. Баумана
Хэ Юн — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т науки и технологии (КНР)
Шахнов В.А. — д.т.н., проф., член-кор. РАН, МГТУ им. Н.Э. Баумана
Шибанов Г.П. — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат. центр им. В.П. Чкалова
Янович Е.А. — д.э.н., проф., Кошалинский политехнич. ин-т (Польша)

Редактор — **Лутовинина О.Н.**
Редактор — **Селихова Е.А.**
Компьютерная вёрстка — **Конова Е.В.**

Адрес редакции:
107076, Москва,
Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (499) 268-41-77.
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;
http://www.mashin.ru

УЧРЕДИТЕЛИ:

ОБЩЕСТВО
С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
"НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"

Журнал зарегистрирован 29 мая 2014 г.
за № ФС77-58102 в Роскомнадзоре

Журнал входит в перечень утверждённых ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей учёных степеней, а также в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

ООО "Издательство
"Инновационное машиностроение"

Адрес издательства:
107076, Москва, Колодезный пер., д. 2А, стр. 2.
Тел.: (495) 661-03-36

© Издательство "Инновационное машиностроение",
"Автоматизация. Современные технологии", 2016

СОДЕРЖАНИЕ

АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Чижиков В.И., Курнасов Е.В. Синтез системы автоматического управления стабилизацией усилия захвата предмета с нечёткой геометрической характеристикой 3

Овсянников В.Ю., Бостынец Н.И., Денежная А.Н., Кондратьева Я.И. Управление процессом низкотемпературного концентрирования жидких сред вымораживанием 10

СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

Микрин Е.А., Зубов Н.Е., Ли М.В., Рябченко В.Н., Ли Е.К. Терминальная переориентация космического аппарата в инерциальной системе координат 14

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Неусыпин К.А., Нгуен Динь Тхай. Алгоритм коррекции инерциальной навигационной системы в условиях аномальных измерений 21

Зотов М.Г. О частотных критериях устойчивости 25

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Дякин В.Н. Проектирование модуля АСУП для определения целей и типа инновационного развития промышленного предприятия 29

Микаева С.А., Микаева А.С., Железникова О.Е., Баринова И.А. Облучатели медицинские бактерицидные 35

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Вакалюк А.А., Басманов С.Н., Басманова А.А. Разработка концептуальной структуры автоматизированной системы управления медицинским диагностическим предприятием . . 42

Елисеев В.А. Основы календарного планирования и информатизации перевозок средствами АСУ 45

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Chizhikov V.I., Kurnasov E.V. Synthesis of an automatic control system for grip force stabilization of the object with fuzzy geometric characteristics 3

Ovsyannikov V.Yu., Bostynets N.I., Denezhnaya A.N., Kondrateva Ya.I. Process control of the liquid media low-temperature concentration by freezing 10

SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

Mikrin E.A., Zubov N.E., Li M.V., Ryabchenko V.N., Li E.K. The terminal re-orientation of the spacecraft in the inertial coordinate system 14

MODERN INFORMATION TECHNOLOGY

Neusypin K.A., Nguen Din Tkhay. Correction algorithm of the inertial navigation system in the of anomalous measurements conditions 21

Zotov M.G. About frequency stability criteria 25

MODERN TECHNOLOGY

Dyakin V.N. Designing of the module CAM system for innovative development aim and type definition of industrial enterprises 29

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Zheleznikova O.E., Barinova I.A. Medical bactericidal exciter 35

ECONOMY AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

Vakalyuk A.A., Basmanov S.N., Basmanova A.A. The conceptual structure development of the automatic control system for medical diagnostic enterprise 42

Eliseev V.A. Basics of the transportation calendar scheduling and informatization by means of CAM 45

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Роспечать" — 70537, по каталогу "Пресса России" — 27838, по каталогу российской прессы "Почта России — 60267) или непосредственно в издательстве по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785 6069

Сдано в набор 01.12.2015.
Подписано в печать 21.01.2016.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

Отпечатано в ООО "Канцлер"
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: www.aov.ru

Перепечатка материалов из журнала "Автоматизация. Современные технологии" возможна при обязательном письменном согласии редакции журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал "Автоматизация. Современные технологии" обязательна. За содержание рекламных материалов ответственность несёт рекламодатель

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Автоматизация. Современные технологии", 2016

УДК 519.713(075)

В.И. Чижиков, канд. техн. наук, доц., **Е.В. Курнасов,** канд. техн. наук, доц.
(Московский государственный технический университет
радиотехники, электроники и автоматики)

vichizhikov@gmail.com

СИНТЕЗ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ СТАБИЛИЗАЦИЕЙ УСИЛИЯ ЗАХВАТА ПРЕДМЕТА С НЕЧЁТКОЙ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Рассмотрена система управления исполнительным устройством схвата робота с расширенными функциональными возможностями для захвата предметов, имеющих нечёткую геометрическую характеристику, что актуально не только для промышленных робототехнических систем автоматической сборки, но и для создания протезов кисти руки. Предложено исполнительное устройство на основе оболочки разомкнутого типа и решена задача синтеза регулятора усилия захвата. Перемещение звеньев механизма схвата исследовано на участке развития усилия от наименьшего значения при тактильном обнаружении предмета до наибольшего допустимого, которое определяется возможностью захвата предмета без остаточной деформации на предмете. Стабильность реакции при контакте схвата с предметом обеспечивается таким подбором числовых значений свободных параметров закона управления, чтобы минимизировать амплитуду сигнала ошибки на установившемся режиме. Закон управления, который реализует регулятор, содержит ошибку воспроизведения управляющего сигнала, первую и вторую производные выходного сигнала. Объект регулирования представляет собой механизм, в котором управляющее воздействие в виде массового расхода газа подаётся на управляемые упругие кинематические соединения. Предлагаемая система управления может быть подвержена внешнему возмущению.

Ключевые слова: исполнительное устройство; регулятор; система управления; робот; схват; протез конечности; захват; нечёткая информация; монотонный процесс; переходный процесс; установившийся режим.

The control system of the robot gripper actuator with broaden functional facilities for objects capture with fuzzy geometric characteristics is considered. This is urgent not only for industrial robotic systems for automatic assembly, but also for artificial wrist. Actuator based on the open type shell is proposed and the synthesis problem of the grip force regulator is solved. Movement of the gripper mechanism links is studied in the area of force development from the smallest value at object tactile detecting to the largest allowable value, which is determined by the object capture ability without object residual deformation. Reaction stability at gripper contact with the object is provided by such selection of the control law free parameters numerical values in order that to minimize the error signal amplitude at steady mode. Control law, which regulator implements, contains an error of the control signal reproduction, the first and second derivatives of the output signal. The object of regulation represent a mechanism in which the manipulating influence in the form of the gas mass flow rate is supplied to the controlled elastic kinematic connection. The proposed control system may be exposed to an external perturbation.

Keywords: actuator; regulator; control system; robot; gripper; artificial limb; seizure; fuzzy information; monotonous process; transition process; steady mode.

Управление автоматической сборкой является одной из сложнейших технологических операций, к которой предъявляется ряд таких требований, как быстродействие, стабильность реакций на поверхности собираемых деталей от захватного устройства, точность позиционирования перед началом сборки, отсутствие перерегулирования в развитии усилий при сопряжении деталей. К конструкции исполнительных механизмов захватного устройства предъявляют требования многофункциональности и универсальности.

В состав предлагаемой системы управления схватом робота входит исполнительная система с упругими управляемыми кинематическими соединениями [1]. Конструкция испол-

нительного механизма [2] имеет пять кинематических цепей, каждая из которых состоит из трёх звеньев и имеет одну степень подвижности. Процесс захвата предмета предполагает одновременное подключение к процессу охвата детали не менее двух звеньев (пальцев) и последовательное вовлечение в этот процесс остальных звеньев, о чём сообщает соответствующая информационно-измерительная система. Функциональные возможности такого схвата приближены к действиям руки человека и при наличии информационно-измерительной системы [3—5, 8, 10] возможно манипулирование предметами с нечёткой геометрической характеристикой. При изменении формы предмета манипулирования механизм схвата соответствующей адаптивной подстройкой через сенсорную систему вовлекает в процесс захвата требуемое количество активных кинематических цепей. Кинематическая ошибка такого соединения оценивается только упругим гистерезисом, который в пределах закона Гука практически отсутствует. Управляемый упругий элемент может быть построен на оболочках разомкнутого типа (сильфоны, трубки Бурдона, пружины Нагаткина), наполняемыми газом, избыточное давление которого определяет необходимое усилие захвата.

Рассмотрим условия, при которых реакция на звеньях исполнительного механизма от усилия захвата уравновешивается на упругом кинематическом соединении. Упругая реакция на кинематическом соединении относительно положения равновесия определяется равенством:

$$R(\lambda,\ \Delta G) = (F_0 + \Delta F)(\Delta R), \qquad (1)$$

где λ, ΔG — соответственно перемещение подвижных звеньев схвата, соответствующее поступившей массе воздуха, и масса циркулирующего воздуха в полости элемента между объёмами в положении равновесия и в отклонённом от него состоянии; ΔP — разность давлений в полости между давлением воздуха в положении равновесия и текущим давлением; F_0 и ΔF — площадь и приращение площади поперечного сечения управляемого упругого элемента.

Общую абсолютную погрешность реакции находят из выражения:

$$\Delta R_{\Sigma}(\lambda, \Delta G) = \\ = \pm\sqrt{\left(\frac{\partial R(\lambda,\ \Delta G)}{\partial \lambda}\Delta\lambda\right)^2 + \left(\frac{\partial R(\lambda,\ \Delta G)}{\partial(\Delta G)}\Delta(\Delta G)\right)^2}. \qquad (2)$$

Предполагается, что все составляющие имеют нормальный закон распределения.

Рассмотрим определение массового расхода газового потока стандартным сужающим устройством. При этом будем считать, что случайная составляющая погрешности отсутствует, а поправка на сжимаемость потока равна единице. Тогда расход можно представить выражением:

$$\Delta G = \alpha f_{10}\varepsilon_{10}\sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} = \alpha f_{10}\varepsilon\sqrt{2\rho h}, \qquad (3)$$

где f_{10} — площадь сужающего устройства; ε_{10} — поправочный множитель на сжимаемость вещества, расход которого измеряется; ρ — плотность потока перед сужающим устройством; h — перепад статического давления на сужающем устройстве.

Кроме того, погрешность по расходу запишем в виде

$$\Delta(\Delta G) = \pm\sqrt{\left(\frac{\partial(\Delta G)}{\partial\rho}\Delta\rho\right)^2 + \left(\frac{\partial(\Delta G)}{\partial h}\Delta h\right)^2}, \qquad (4)$$

где $\frac{\partial(\Delta G)}{\partial\rho} = \alpha f_0\varepsilon_{10}\frac{h}{\sqrt{2\rho h}}$; $\frac{\partial(\Delta G)}{\partial h} = \alpha F_0\varepsilon_{10}\frac{\rho}{\sqrt{2\rho h}}$.

Учтём погрешности определения плотности потоков. В соответствии с уравнением состояния газа $\rho = \frac{p}{RT}$, где p и T — соответственно абсолютное давление и температура газа перед сужающим устройством. Абсолютная погрешность определения плотности потока без учёта погрешности газовой постоянной составит:

$$\Delta\rho = \pm\sqrt{\left(\frac{\partial\rho}{\partial p}\Delta p\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial T}\Delta T\right)^2}, \qquad (5)$$

где $\frac{\partial\rho}{\partial p} = \frac{1}{RT}$; $\frac{\partial\rho}{\partial T} = -\frac{p}{RT^2}$.

Таким образом, реакция на поверхности предмета манипулирования является интегральной оценкой параметров газа, которая связана с точностью создания требуемых усилий на поверхности предмета упругими кинематическими соединениями [2, 6, 7]. Ошибка воспроизведения управляющего сигнала $\Delta R(\lambda,\ \Delta G) = \varepsilon(t)$ в текущий момент времени оценивается как разность между входным и выходным воздействиями, которые вызывают реакцию на поверхности предмета. Очевидно, что следует использовать массовый расход воздуха (3) как входное воздействие $x(t)$, развиваемую реакцию (1) на подвижном элементе схвата как выходное воздействие $y(t)$, а изменение плотности газа (5) как возмущение $f(t)$.

Постановка задачи синтеза регулятора формулируется следующим образом.

1. Определить значения свободных параметров закона управления усилием захвата таким образом, чтобы минимизировать амплитуду сигнала ошибки $\varepsilon(t)$ на установившемся режиме, т.е. найти $\varepsilon = \min(\max\varepsilon_{уст}(t))$ при ограничении на сигнал управления $|U(t)| \leqslant U_0$.

2. При найденных свободных параметрах регулятора найти выражение для $y_{уст}(t)$ при $x(t) = 0$, $f = f_0\cos(\omega t)$ при проверке на ограничение амплитуды сигнала управления U_0.

3. Определить $\varepsilon_{уст}(t)$ при $f(t) = 0$ и $x(t) = C_1 t + C_0$.

Рассмотрим систему автоматического регулирования усилия захвата роботом, функциональная схема которой представлена на рис. 1.

Уравнение управляемого объекта, который может испытывать ускорения и пульсовые нагрузки:

$$a_3 y''' + a_2 y'' + y' = k_U U + k_f f, \qquad (6)$$

где $k_U \geqslant 0$, $k_f \geqslant 0$ — коэффициенты усиления объекта по отношению к сигналам управления и возмущения соответственно.

Объект управления содержит производные второго и третьего порядков, что предъявляет соответствующие требования к регулятору, который должен их парировать [9]. Вследствие этого закон управления, который должен реализовать регулятор, имеет вид:

$$U(t) = k_\varepsilon(\varepsilon(t) - b_1 y'(t) - b_2 y''(t)), \qquad (7)$$

где $\varepsilon(t) = x(t) - y(t)$ — ошибка воспроизведения входного сигнала в текущий момент времени.

Запишем выражение (7) в виде:

$$\begin{aligned} &U(t) = k_\varepsilon(x(t) - y_1(t)); \\ &M\left(y(t)\right) = y_1(t) = y(t) + b_1 y'(t) + b_2 y''(t), \end{aligned} \qquad (8)$$

где k_ε, b_1, b_2 — свободные параметры, выбираются разработчиком.

При разумном выборе свободных параметров структура закона управления (2) позволяет увеличить точность воспроизведения входного воздействия (основная задача).

Запишем уравнение управляемого объекта в операторной форме:

$$y(p)(a_3 p^3 + a_2 p^2 + p) = k_U U(p) + k_f f(p).$$

Операторная форма уравнений (8) имеет вид:

$$U(p) = k_\varepsilon(x(p) - y_1(p)),$$

$$y_1(p) = y(p)(1 + b_1 p + b_2 p^2) = y(p)M(p).$$

Используя предложенную форму записи, получим передаточные функции управляемого объекта и регулятора. Управляющие функция по управляющему, возмущающему воздействиям и обратной связи имеют вид:

$$W_{y,U}(p) = \frac{y(p)}{U(p)} = \frac{k_U}{p(a_3 p^3 + a_2 p^2 + 1)}; \qquad (9)$$

$$W_{y,f}(p) = \frac{y(p)}{f(p)} = \frac{k_U}{p(a_3 p^3 + a_2 p^2 + 1)}; \qquad (10)$$

$$W_{y_1 y}(p) = \frac{y_1(p)}{y(p)} = M(p) = 1 + b_1 p + b_2 p^2. \qquad (11)$$

Таким образом, управляемый объект обладает астатизмом первого порядка. Теперь функциональной схеме на рис. 1 соответствует структурная схема на рис. 2.

На сигнал управления, как упоминалось, накладываем ограничения в виде $|U(t)| \leqslant U_0$.

Определим передаточную функцию замкнутой системы (см. рис. 2) с учётом (10) и (11)

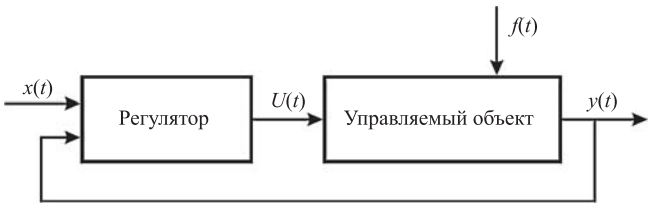


Рис. 1. Функциональная схема системы автоматического регулирования усилия захвата:
$x(t)$ — входной сигнал, подлежащий воспроизведению выходным сигналом $y(t)$; $f(t)$ — возмущение; $U(t)$ — сигнал управления, реализуемый регулятором

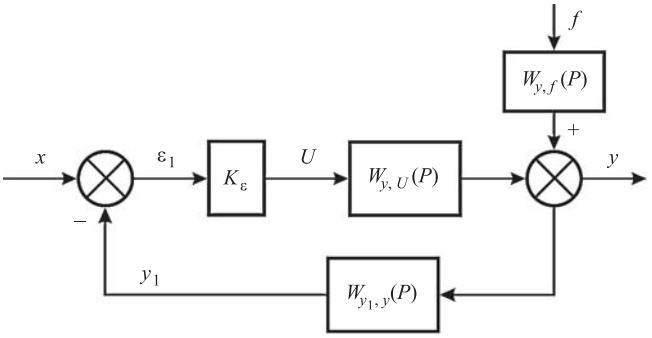


Рис. 2. Структурная схема системы автоматического управления усилием захвата

по сигналу управления. С учётом несложных преобразований имеем следующее выражение:

$$\Phi_{y,x}(p) = \frac{Y(P)}{X(P)} = \\ = \frac{1}{\frac{a_3}{k_\varepsilon k_U}p^3 + \left(\frac{a_2}{k_\varepsilon k_U} + b_2\right)p^2 + \left(\frac{1}{k_\varepsilon k_U} + b_1\right)p + 1}. \quad (12)$$

Передаточная функция замкнутой системы по возмущению:

$$\Phi_{y,f}(p) = \\ = \frac{\frac{k_f}{k_\varepsilon k_U}}{\frac{a_3 p^3}{k_\varepsilon k_U} + \left(\frac{a_2}{k_\varepsilon k_U} + b_2\right)p^2 + \left(\frac{1}{k_\varepsilon k_U} + b_1\right)p + 1}. \quad (13)$$

Передаточная функция замкнутой системы по ошибке:

$$\Phi_{\varepsilon,x}(p) = \frac{\mathrm{E}(p)}{X(p)} = \frac{X(p) - Y(p)}{X(p)} = 1 - \Phi_{y,x}(p). \quad (14)$$

Подставляя в (14) выражение (12), получим:

$$\Phi_{\varepsilon,x}(p) = \frac{\mathrm{E}(p)}{X(P)} = \\ = 1 - \frac{1}{\frac{a_3 p^3}{k_\varepsilon k_U} + \left(\frac{a_2}{k_\varepsilon k_U} + b_2\right)p^2 + \left(\frac{1}{k_\varepsilon k_U} + b_1\right)p + 1}. \quad (15)$$

Передаточную функцию по сигналу управления $\Phi_{U,x}(p) = \frac{U(p)}{X(p)}$ можно представить с учётом операторной формы записи для регулятора. Имеем следующую последовательность, через которую можно представить сигнал управления:

$$U(p) = k_\varepsilon \varepsilon_1 = k_\varepsilon\left(x(p) - y_1(p)\right) = \\ = k_\varepsilon\left(x(p) - y(p)M(p)\right) = \\ = k_\varepsilon\left(x(p) - M(p)W_{y,U}(p)U(p)\right).$$

Перепишем сигнал управления с учётом простых преобразований последнего равенства

$$U(p) = \frac{k_\varepsilon x(p)}{1 + k_\varepsilon M(p)W_{y,U}(p)}.$$

Тогда передаточная функция по сигналу управления будет иметь вид:

$$\Phi_{U,x}(p) = \frac{k_\varepsilon}{1 + k_\varepsilon M(p)W_{y,U}(p)} = \\ = \frac{k_\varepsilon\left(a_3 p^3 + a_2 p^2 + p\right)}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + p + k_\varepsilon k_U\left(b_2 p^2 + b_1 p + 1\right)}. \quad (16)$$

Преобразуем последнее равенство к следующему виду:

$$\Phi_{U,x}(p) = \\ = \frac{\frac{\left(a_3 p^3 + a_2 p^2 + p\right)}{k_U}}{\frac{a_3}{k_U k_\varepsilon}p^3 + \left(\frac{a_2}{k_U k_\varepsilon} + b_2\right)p^2 + \left(\frac{1}{k_U k_\varepsilon} + b_1\right)p + 1}, \quad (17)$$

удобному для дальнейшего анализа. Найдём передаточную функцию по возмущающему воздействию для регулятора $W_{U,f}(p) = \frac{U(p)}{f(p)}$ при входном воздействии $x(t) = 0$. В этом случае ошибка воспроизведения входного сигнала в текущий момент времени равна $\varepsilon_1(t) = -y_1(t)$. Тогда сигнал управления в операторной форме можно представить равенством, которое после несложных преобразований с учётом (8—10) имеет вид:

$$W_{U,f} = \frac{U(p)}{f(p)} = \frac{-k_\varepsilon M(p)W_{y,f}(p)}{1 + k_\varepsilon M(p)W_{y,U}(p)} = \\ = \frac{-k_\varepsilon k_f\left(b_2 p^2 + b_1 p + 1\right)}{a_3 p^3 + a_2 p^2 + p + k_\varepsilon k_U\left(b_2 p^2 + b_1 p + 1\right)}.$$

Запишем последнее выражение в виде

$$W_{U,f} = \frac{-k_\varepsilon M(p)W_{y,f}(p)}{1 + k_\varepsilon M(p)W_{y,U}(p)} = \\ = \frac{-\frac{k_f}{k_U}\left(b_2 p^2 + b_1 p + 1\right)}{\frac{a_3}{k_\varepsilon k_U}p^3 + \left(\frac{a_2}{k_\varepsilon k_U} + b_2\right)p^2 + \left(\frac{1}{k_\varepsilon k_U} + b_1\right)p + 1}. \quad (18)$$

Выразим в операторной форме выходной сигнал системы управления $y(p)$ при наличии входного воздействия $x(p)$ и возмущения $f(p)$:

$$y(p) = \Phi_{y,x}(p)x(p) + \Phi_{y,f}(p)f(p).$$

С учётом (10) и (12) выходной сигнал $y(p)$ запишем в виде

$$y(p) = \frac{x(p) + \dfrac{k_f}{k_\varepsilon k_U} f(p)}{\dfrac{a_3}{k_\varepsilon k_U} p^3 + \left(\dfrac{a_2}{k_\varepsilon k_U} + b_2\right) p^2 + \left(\dfrac{1}{k_\varepsilon k_U} + b_1\right) p + 1}. \quad (19)$$

Для определения свободных коэффициентов k_ε, b_1, b_2 воспользуемся методом приближённых передаточных функций. Монотонный переходный процесс может обеспечить передаточная функция $Q(p)$ третьего порядка для замкнутой системы, причём переходный процесс в ней зависит от степени устойчивости η, с ростом которой время процесса уменьшается. Ограничение на сигнал управления $|U(t)| \leqslant U_0$ не позволяет присваивать бесконечно большое значение η. Имеем следующее выражение передаточной функции $Q(p) = \left(\dfrac{1}{\eta} p + 1\right)^3$. Запишем последнее выражение в развёрнутом виде:

$$Q(p) = \frac{1}{\eta^3} p^3 + \frac{3}{\eta^2} p^2 + \frac{3}{\eta} p + 1. \quad (20)$$

Преобразуем передаточную функцию $\Phi_{y,x}(p)$ к виду:

$$\Phi_{y,x}(p) = \frac{1}{Q(p)} \text{ при } Q(0) = 1. \quad (21)$$

С учётом (12) и (20) в результате подстановки в равенство (21) и сравнения коэффициентов при одинаковых степенях p, получим выражение:

$$\frac{1}{\dfrac{a_3}{k_\varepsilon k_U} p^3 + \left(\dfrac{a_2}{k_\varepsilon k_U} + b_2\right) p^2 + \left(\dfrac{1}{k_\varepsilon k_U} + b_1\right) p + 1} = \frac{1}{\dfrac{1}{\eta^3} p^3 + \dfrac{3}{\eta^2} p^2 + \dfrac{3}{\eta} p + 1}, \quad (22)$$

из которого следует система трёх линейных уравнений, и на её основе находим параметры k_ε, b_1, b_2 при известных значениях k_U, a_3, a_2:

$$k_\varepsilon = \frac{a_3 \eta^3}{k_U},\ b_2 = \frac{3}{\eta^2} - \frac{a_2}{a_3 \eta^3},\ b_1 = \frac{3}{\eta} - \frac{1}{a_3 \eta^3} \text{ при } \eta > 0. \quad (23)$$

Найденные параметры являются функциями ещё неизвестной величины η. Такой подход обусловлен требованием к переходному процессу передаточной функции замкнутой системы $Q(p)$ и степени устойчивости η. Для достаточно широкого класса внешних воздействий с ростом η уменьшается ошибка воспроизведения входного сигнала и максимальное отклонение в режиме стабилизации.

Определим амплитудно-частотные характеристики $A_{\varepsilon,x}(\omega)$, $A_{U,x}(\omega)$. Поскольку в установившемся режиме при $x(t) = x_0\cos(\omega t)$, значения ошибки и управляющего сигнала:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{уст}}(t) &= A_{\varepsilon,x}(\omega) x_0 \cos\left(\omega t + \varphi_{\varepsilon,x}(\omega)\right); \\ U_{\text{уст}}(t) &= A_{U,x}(\omega) x_0 \cos\left(\omega t + \varphi_{U,x}(\omega)\right), \end{aligned} \quad (24)$$

то

$$\max \varepsilon_{\text{уст}} = A_{\varepsilon,x}(\omega) x_0,\ \max U_{\text{уст}} = A_{U,x}(\omega) x_0. \quad (25)$$

С учётом упомянутого выше, добавим в качестве аргумента в АЧХ степень устойчивости и далее будем обозначать АЧХ через $A_{\varepsilon,x}(\omega, \eta)$, $A_{U,x}(\omega, \eta)$.

Достаточно малое значение функции $A_{\varepsilon,x}(\omega, \eta)$ обеспечивает достаточно точное воспроизведение сигнала $x(t) = x_0\cos(\omega t)$ в установившемся режиме, а достаточно малое значение функции $A_{U,x}(\omega, \eta)$ — выполнение условия $|U(t)| \leqslant U^*$. Передаточную функцию замкнутой системы по ошибке (15) с учётом (22) можно записать в виде $\Phi_{\varepsilon,x}(p) = 1 - \dfrac{1}{\dfrac{1}{\eta^3} p^3 + \dfrac{3}{\eta^2} p^2 + \dfrac{3}{\eta} p + 1}$. Переходя к частотному спектру, получим следующие выражения для передаточной функции амплитудно-частотной характеристики $A_{\varepsilon,x}(\omega, \eta)$

$$\Phi_{\varepsilon,x}(\omega, \eta) = \frac{-\dfrac{3}{\eta^2}\omega^2 + j\left(\dfrac{3}{\eta}\omega - \dfrac{3}{\eta^3}\omega^3\right)}{\left(1 - \dfrac{3}{\eta^2}\omega^2\right) + j\left(\dfrac{3}{\eta}\omega - \dfrac{3}{\eta^3}\omega^3\right)}, \quad (26)$$

$$A_{\varepsilon,x}(\omega, \eta) = \left|\Phi_{\varepsilon,x}(\omega, \eta)\right| = \sqrt{\frac{\dfrac{9}{\eta^4}\omega^4 + \left(\dfrac{3}{\eta}\omega - \dfrac{3}{\eta^3}\omega^3\right)^2}{\left(1 - \dfrac{3}{\eta^2}\omega^2\right)^2 + j\left(\dfrac{3}{\eta}\omega - \dfrac{3}{\eta^3}\omega^3\right)^2}}. \quad (27)$$

Введём новую переменную $\vartheta = \left(\frac{\omega}{\eta}\right)^2$. Тогда, после очевидных преобразований и подстановки новой переменной ϑ, получим:

$$A_{\varepsilon,x}(\omega,\eta) = \sqrt{\frac{\vartheta^3 + 3\vartheta^2 + 9\vartheta}{\vartheta^3 + 3\vartheta^2 + 3\vartheta + 1}}. \qquad (28)$$

Аналогично для $\Phi_{U,x}(\omega, \eta)$ и $A_{U,x}(\omega, \eta)$ с учётом (17), не приводя промежуточных преобразований, получим:

$$\Phi_{U,x}(\omega,\eta) = \frac{-\frac{a_2}{k_U}\omega^2 + j\left(\frac{1}{k_U}\omega - \frac{a_3}{k_U}\omega^3\right)}{\left(1 + \frac{1}{\eta}(j\omega)\right)^3}, \qquad (29)$$

$$A_{U,x}(\omega,\eta) = \left|\Phi(\omega,\eta)\right| = \frac{\omega}{k_U}\frac{\sqrt{\left(1 - a_3\omega^2\right)^2 + a_2^2\omega^2}}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\eta}\right)^2}\right)^3}. \qquad (30)$$

Рассматривая АЧХ $A_{\varepsilon,x}(\vartheta)$, нетрудно показать, что функция имеет единственный максимум $\max_\vartheta A_{\varepsilon,x}(\vartheta) = A_{\varepsilon,x}(\vartheta^*) = 1{,}286$ в точке $\vartheta^* = \left(\frac{\omega^*}{\eta}\right)^2 = 0{,}75$, т.е. $\frac{\omega^*}{\eta} = \frac{\sqrt{3}}{2}$ и, что $\lim_\vartheta \to \infty$ $A_{\varepsilon,x}(\vartheta) = 1$, $A_{\varepsilon,x}(0) = 0$. Известно, что для широкого класса внешних воздействий максимальная ошибка воспроизведения входного сигнала и максимальное отклонение в режиме стабилизации уменьшаются с ростом η. В установившемся режиме при $x(t) = x_0\cos(\omega t)$ имеем $\varepsilon_{уст}(t) = A_{\varepsilon,x}(\omega, \eta)x_0\cos(\omega t + \varphi_{\varepsilon,x}(\omega))$ и, чтобы иметь минимальное значение максимальной ошибки на установившемся режиме, необходимо выбирать как можно меньшее значение $\vartheta = \left(\frac{\omega}{\eta}\right)^2$, т.е. большее значение η. Однако с ростом степени устойчивости η может возрасти величина $\max A_{U,x}(\omega, \eta)$. Вследствие этого может быть нарушено условие $|U(t)| \leqslant U_0$, так как при гармоническом входном сигнале $x(t) = x_0\cos(\omega t)$ установившийся режим для сигнала имеет вид $U(t) = A_{U,x}(\omega, \eta)x_0\cos(\omega t + \varphi_{U,x}(\varphi))$ и $A_{U,x}(\omega, \eta)x_0 \leqslant U_0$, где $A_{U,x}(\omega, \eta)$ определяется по (30).

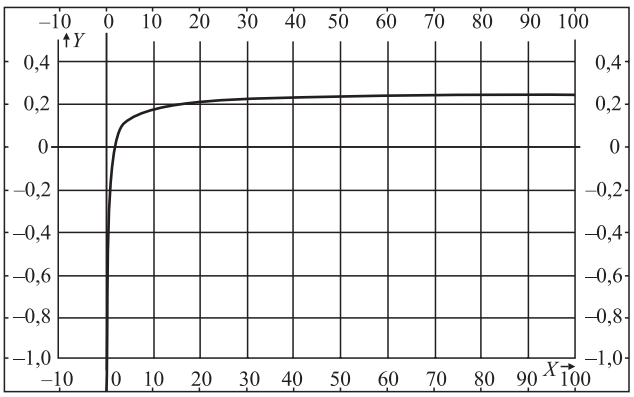


Рис. 3. Функция сигнала управления $\Psi(z)$ при определении допустимой степени устойчивости η

Убедимся, что неравенство $A_{U,x}(\omega,\eta)_0 \leqslant \frac{U_0}{x_0}$, вытекающее из ограничения на сигнал управления, эквивалентно неравенству:

$$\frac{1}{\eta^2} \geqslant \Psi(z) = \frac{1}{z}\left(\sqrt[3]{\frac{zx_0^2}{(u_0k_U)^2}((1 - a_3z)^2 + a_2^2z)} - 1\right). \qquad (31)$$

Для доказательства обозначим $z = \omega^2$ и выражение (30) перепишем в виде

$$A_{U,x}(\omega,z) = \frac{\sqrt{z}}{k_U}\frac{\sqrt{(1 - a_3z)^2 + a_2^2z}}{\left(\sqrt{1 + \left(\frac{z}{\eta^2}\right)}\right)^3}.$$

Возведём это выражение в квадрат и разделим на $\frac{U_0^2}{x_0^2}$, которое с учётом неравенства и преобразований принимает вид

$$\frac{1}{z}\left(\sqrt[3]{\frac{zx_0^2}{U_0^2k_U^2}(1 - a_3z)^2 + a_2^2z} - 1\right) \leqslant \frac{1}{\eta^2}.$$

Обозначив левую часть неравенства как $\Psi(z)$, получим неравенство (31), что требовалось доказать. Из (31) имеем следующее выражение для η:

$$\eta \leqslant \frac{1}{\sqrt{\Psi(z)}}. \qquad (32)$$

Рассмотрим характер поведения функции $\Psi(z)$ при следующих значениях параметров:

$k_U = 0{,}25$; $U_0 = 30$; $a_3 = 0{,}4$; $a_2 = 0{,}6$; $\omega_0 = 8{,}5$; $x_0 = 0{,}7$; $f_0 = 0{,}65$; $c_0 = 3$, $c_1 = 0{,}4$.

С учётом заданных параметров исследуемая функция принимает следующий вид (рис. 3):

$$\Psi(z) = \frac{1}{z}\left(\sqrt[3]{\frac{0{,}49z}{56{,}25}(1 - 0{,}4z)^2 + 0{,}36z} - 1\right).$$

Расчётные значения обратной функции коэффициента устойчивости

z	0,1	0,5	5	20	30	40	50	60	72
$\Psi(z)$	−7,9	−1,67	−0,08	0,2	0,211	0,22	0,225	0,23	0,25

График $\Psi(z)$ возрастает на интервале $z = (0; z_0]$, где $z_0 = \omega_0^2 = 8,5^2 = 72,25$.

Следовательно, точка z_0 является искомой точкой максимума $\Psi(z) = 0,25$ (см. таблицу). Из выражения (32) имеем допустимое значение степени устойчивости $\eta \leqslant \frac{1}{\sqrt{\Psi(z)}} = \frac{1}{\sqrt{0,25}} = 2$.

По найденному максимальному значению степени устойчивости находим числовые значения свободных параметров k_ε, b_1, b_2.

Используя исходные данные примера и трёх равенств (23), получим численные значения искомых параметров регулятора:

$$k_\varepsilon = \frac{0,4\eta^3}{0,25} = 12,8; b_1 = \frac{3}{\eta} - \frac{1}{0,4\eta^3} = 1,19;$$

$$b_2 = \frac{3}{\eta^2} - \frac{0,6}{0,4\eta^3} = 0,56,$$

а следовательно, уравнение управляемого объекта

$$0,125y''' + 0,75y'' + 1,5y' + 1 = x(t) + 0,18f(t). \quad (33)$$

Используя критерий Гурвица, нетрудно убедиться в том, что система устойчива.

Для выполнения пункта 2 поставленной задачи при найденных параметрах регулятора необходимо найти выражения $y_{уст}(t)$ при $x(t) = 0$, $f = f_0\cos(\omega t)$ при проверке на ограничение амплитуды сигнала управления U_0. Для этого используем передаточные функции $\Phi_{y,f}(p)$ и $\Phi_{U,f}(p)$, которые определены выше. Найдём $y_{уст}(t) = A_{y,f}(\omega)f_0\cos(\omega t + \varphi_{y,f}(\omega))$. Подставляя численные значения в передаточные функции, найдём их модули и соответствующие им фазовые углы при $\omega = \omega_1 = 0,2$.

$$A_{y,f}(\omega) = \left|\Phi_{y,f}(\omega)\right| = \left|\frac{\frac{0,6}{0,25k_\varepsilon}}{\left(\frac{1}{2}(j\omega)+1\right)^3}\right| = \frac{0,18}{\sqrt{0,7225+0,0894}} = 0,2;$$

$$A_{U,f}(\omega) = \left|\Phi_{U,f}(\omega)\right| = \left|\frac{-2,4\left(-0,56\omega^2+1,19j\omega+1\right)}{\left(\frac{1}{2}j\omega+1\right)^3}\right| = 2,48;$$

$$\omega = \omega_1 = 0,2;$$

$$\varphi_{y,f}(\omega) = -\mathrm{arctg}\frac{1,5\omega - 0,125\omega^3}{1-0,75\omega} = -19,2.$$

Установившееся значение выходного сигнала при наличии возмущения $y_{уст}(t) = 0,2\cdot 0,65\cos(0,2t - 19,2)$. Установившееся значение сигнала управления при наличии возмущения вычисляем без фазового угла $\varphi_{U,f}(\omega)$, так как находим максимальное значение $U_{уст}(t)$. Следовательно, $U_{уст}(t) = A_{U,f}(\omega, \eta)f_0 = 2,48\cdot 0,65 = 1,6 < U_0 = 30$. И, наконец, выполнение пункта 3 рассматриваемой задачи определяет значение установившейся ошибки $\varepsilon_{уст}(t)$ при $f(t) = 0$ и линейном входном сигнале $x(t) = c_1t + c_0$. В рассматриваемом примере имеем $k = k_Uk_\varepsilon = 0,25\cdot 12,8 = 3,2$. Тогда $\varepsilon_{уст} = \frac{c_1}{k} = \frac{0,4}{3,2} = 0,13$, что соответствует точности системы управления при полиноминальном воздействии. При постоянном воздействии ошибка в системе с астатизмом первого порядка равна нулю. Установившееся значение сигнала управления $U_{уст}(t) = \varepsilon_{уст}k_\varepsilon = 0,13\cdot 12,8 = 1,66$.

Выводы. Предложенное исполнительное устройство схвата робота на основе оболочки разомкнутого типа обеспечивает реализацию управления при выполнении операций с предметами, имеющими нечёткую геометрическую характеристику. Рассмотрены условия, при которых реакция на звеньях исполнительного механизма схвата робота от усилия захвата уравновешивается избыточным давлением газа на упругом управляемом кинематическом соединении. Объект регулирования представляет собой механизм, в котором управляющее воздействие в виде массового расхода газа подаётся на управляемые упругие кинематические соединения, выполненные на оболочках разомкнутого типа. Предполагается, что система может быть подвержена возмущению, которое оценивается изменением плотности газа.

Решена задача синтеза регулятора усилия захвата, который увеличивает точность воспроизведения входного сигнала. Полученные параметры закона управления позволяют ми-

нимизировать амплитуду сигнала ошибки при ограничении на сигнал управления и развитии упомянутого действия.

Получено выражение выходного сигнала в установившемся режиме (реакция на поверхности предмета) для найденных свободных параметров регулятора при наличии возмущения с проверкой на ограничение амплитуды сигнала управления.

Определено значение установившейся ошибки при отсутствии возмущающего воздействия и полиноминальном входном сигнале.

Библиографические ссылки

1. **Чижиков В.И.** Тормозное устройство на основе трубки Бурдона в следящем пневмоприводе // Промышленные АСУ и контроллеры. Математическое обеспечение АСУ. 2011. № 7. С. 30—38.

2. **Чижиков В.И.** Проектирование кисти протеза с очувствлением и динамически устойчивым механизмом захвата // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. 2014. № 55. С. 39—55.

3. **Курнасов Е.В.** Решение сложных задач управления движением приводов на основе программной среды // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 11. С. 30—35.

4. **Мелкова С.О., Курнасов Е.В.** Информационно-измерительные системы: Учеб.-метод. пособие. М.: МГУПИ, 2006. 63 с.

5. **Курнасов Е.В.** Практическая реализация объектной привязки технических устройств в SCADA системах // СТИН. 2012. № 8. С. 2—6.

6. **Мееров М.В.** Синтез структур систем автоматического управления высокой точности. М.: Наука, 1967. 424 с.

7. **Чижиков В.И.** Распределение газа по активным элементам протеза при захвате предмета произвольной формы // Вестник Московского государственного университета приборостроения и информатики. 2015. № 56. С. 6—15.

8. **Управление** динамическими системами в условиях неопределённости / под ред. С.Т. Кусимова, Б.Г. Ильясова, В.И. Васильев. М.: Наука, 1998. 452 с.

9. **Востриков А.С.** Старшая производная и большие коэффициенты в задаче управления нелинейными нестационарными объектами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 5. С.2—7.

10. **Бронников А.М.** Компенсация неизвестных возмущений нелинейной системы управления с помощью динамических обратных связей // Материалы 5-й науч.-технич. конф. "Мехатроника, автоматизация, управление". СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2008. С. 44—47.

УДК 621:664.8.037.5

В.Ю. Овсянников, канд. техн. наук, доц., **Н.И. Бостынец**, **А.Н. Денежная**
(Воронежский государственный университет инженерных технологий),
Я.И. Кондратьева
(ОАО "Экспериментальный машиностроительный завод имени В.М. Мясищева", г. Жуковский)
ows2003@mail.ru

УПРАВЛЕНИЕ ПРОЦЕССОМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОГО КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ ЖИДКИХ СРЕД ВЫМОРАЖИВАНИЕМ

Предложена схема управления циклическим процессом низкотемпературного концентрирования жидких сред вымораживанием в циклическом режиме. В ней предусмотрен контроль режима циркуляции жидкой среды в рабочем объёме аппарата и его регулирование путём изменения характера работы холодильного агрегата. Указанный способ управления технологическими параметрами процесса концентрирования вымораживанием на примере плодовых соков обеспечивает точность и надёжность поддержания требуемых режимных параметров процесса, а также его интенсификацию.

Ключевые слова: управление циклическим процессом; концентрирование вымораживанием; плодовые соки.

The cyclic process control scheme of the liquid media low-temperature concentration by freezing in a cyclic mode is proposed. It provides control of the liquid medium circulation mode in the device working volume and its regulation by changing the nature of the refrigeration unit work. The indicated control method for technological parameters of the concentration process by freezing as an example of fruit juice provides accuracy and reliability maintenance of the demanded process operating conditions and its intensification.

Keywords: cyclic process management; concentration by freezing; fruit juices.

В настоящее время перед пищевой промышленностью стоят задачи увеличения выпуска пищевых продуктов, расширения ассортимента, дальнейшего повышения качества, вкусовых свойств и биологической ценности пищевых продуктов в результате внедрения новых прогрессивных технологических процессов. К таким прогрессивным методам консервирования жидких пищевых сред относится концентрирование вымораживанием влаги (криоконцентрирование), обеспечивающее сохранность исходных качеств сырья при производстве концентратов [1, 2].

Концентрирование жидких пищевых и биологических сред методом вымораживания влаги обеспечивает наиболее полное сохранение химического состава и свойств веществ, входящих в концентрируемый продукт. При этом указанный процесс подразумевает выделение воды в виде льда при температурах ниже кристаллизации чистой воды, что особенно важно в случаях получения концентрированных жидкостей высокого качества, при энергетических затратах на проведение процесса, сопоставимых с традиционными способами концентрирования мембранными методами и вакуумным выпариванием [3].

Для управления сложным процессом циклического концентрирования, сопровождающимся физико-химическим преобразованием воды в лёд и непрерывным изменением реологических и теплофизических характеристик жидкой среды, был создан программно-логический алгоритм управления технологическими параметрами, обеспечивающий точность и надёжность поддержания требуемых режимных параметров процесса и его интенсификацию.

На рисунке представлена схема управления циклическим процессом низкотемпературного концентрирования жидких сред вымораживанием.

Процесс низкотемпературного концентрирования жидких сред происходит в вымораживающей установке, состоящей из рабочей ванны *1*, насоса *2*, осуществляющего циркуляцию жидкого продукта из накопительного бака *3* с перфорированной крышкой в ванну по магистрали *15*, из которой жидкость сливается обратно в бак *3* по магистрали *16*. Реверсивный двигатель *4* обеспечивает поворот рабочей ванны при выгрузке гранул вымороженного льда. В состав вымораживающей установки входит холодильная машина с компрессором *5*, конденсатором *6*, ресивером *7*, фильтром-осушителем *8* хладагента, регенеративным теплообменником *9*,

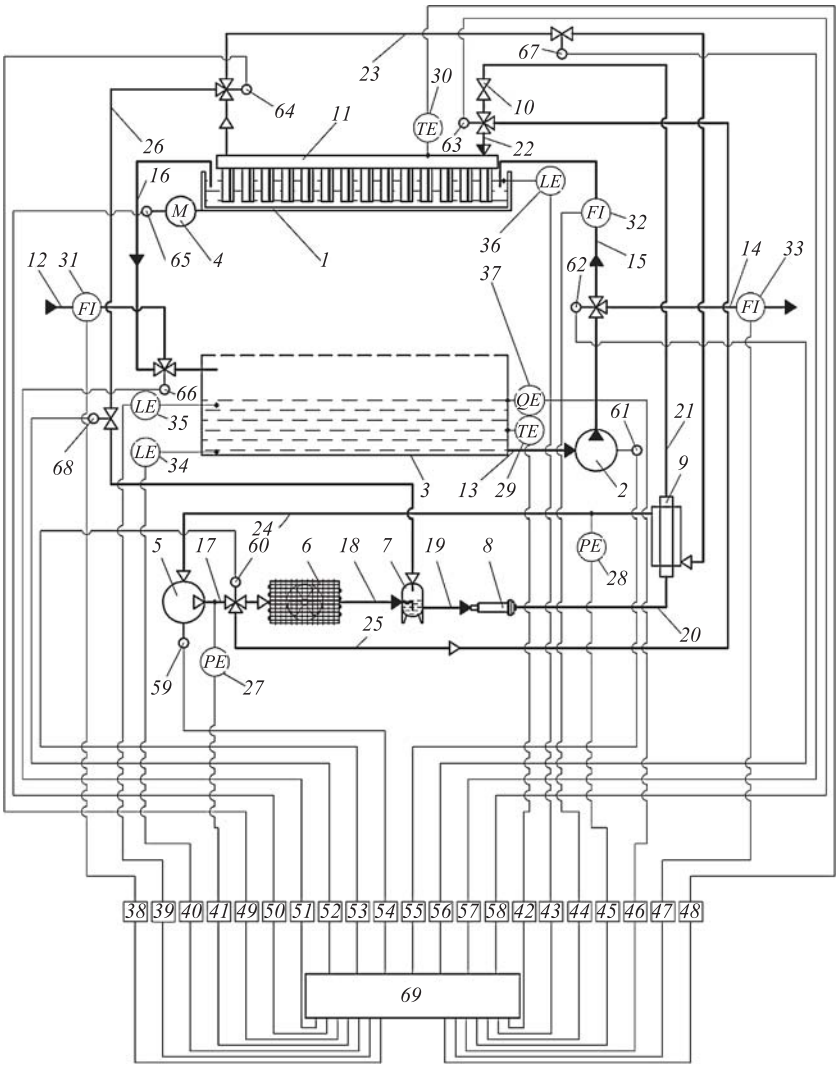


Схема управления циклическим процессом низкотемпературного концентрирования жидких сред вымораживанием:

1 — рабочая ванна; *2* — насос; *3* — накопительный бак с перфорированной крышкой; *4* — реверсивный двигатель; *5* — компрессор; *6* — конденсатор; *7* — ресивер; *8* — фильтр-осушитель; *9* — регенеративный теплообменник; *10* — терморегулирующий вентиль; *11* — испаритель; *12 — 16* — магистрали для продукта; *17—26* — магистрали для хладагента; *27, 28* — датчики давления хладагента; *29, 30* — датчики температуры продукта и хладагента соответственно; *31—33* — датчики расхода продукта; *34—37* — датчики измерения концентрации растворённых веществ; *38—48* — вторичные приборы; *49—58* — преобразователи; *59—68* — исполнительные механизмы; *69* — микропроцессор

терморегулирующим вентилем *10* и испарителем *11* с теплообменными элементами, погружёнными в жидкий продукт в рабочей ванне.

Управление циклическим процессом низкотемпературного концентрирования жидких сред вымораживанием по предлагаемой схеме (см. рисунок) осуществляется следующим образом.

В режиме концентрирования вымораживанием льда исходный жидкий продукт, расход которого контролируется датчиком расхода *31*, по магистрали *12* поступает в накопительный бак с перфорированной крышкой до тех пор, пока уровень продукта не достигнет установленного датчика *35* верхнего уровня продукта в накопительном баке. После этого сигнал с датчика поступает в микропроцессор *69*, который при помощи исполнительного механизма *66* перекрывает вентиль подачи исходного продукта и, одновременно воздействуя на исполнительный механизм *65* реверсивного двигателя *4*, приводит рабочую ванну в горизонтальное положение, воздействует на исполнительный механизм *61* включения насоса *2*, а также обеспечивает переключение исполнительного механизма *62*, установленного в магистрали *15*, что обеспечивает подачу продукта в рабочую ванну.

Как только жидкий продукт достигнет уровня размещения датчика *36*, контролирующего уровень продукта в рабочей ванне микропроцессор подаёт управляющий сигнал на исполнительный механизм *59* включения компрессора *5* холодильной машины, на исполнительный механизм *60*, открывающий подачу парообразного хладагента в конденсатор *6*, магистраль *18* подачи жидкого хладагента в ресивер *7*, магистраль *19* подачи хладагента в фильтр-осушитель *8*, магистраль *20* подачи хладагента в регенеративный теплообменник *9* для переохлаждения перед дросселированием, магистраль *21* подачи хладагента в регулирующий вентиль *10*. Микропроцессор также воздействует на исполнительный механизм *63*, открывая подачу потока хладагента из терморегулирующего вентиля *10* в магистраль *22* подачи хладагента в испаритель *11* и исполнительные механизмы *64* и *67* в магистрали *23* подачи парообразного хладагента в регенеративный теплообменник *9*, а из него по магистрали *24* на всасывание в компрессор.

При работе вымораживающей установки исходный продукт по магистралям *13* и *15* непрерывно подаётся в рабочую ванну. В ней размещены теплообменные элементы испарителя *11*, на которых образуется вымороженный лёд, и непрерывно отводится по магистрали *16* в рабочий бак с перфорированной крышкой, в котором размещены датчик температуры *29* и датчик измерения концентрации растворённых веществ в жидком продукте *37*.

По измеренным текущим значениям содержания растворённых веществ в жидком продукте датчиком *37*, и расхода продукта датчиком *32*, установленным в магистрали *15*, микропроцессор вычисляет фактическое содержание влаги, подаваемой с исходным продуктом в рабочую ванну, и исполнительным механизмом *60* корректирует подачу жидкого хладагента в ресивер *7*, а исполнительным механизмом *63* — подачу хладагента в испаритель *11* до достижения требуемой температуры кипения хладагента, измеряемой датчиком *30* в зависимости от давления нагнетания хладагента, измеряемого датчиком *27* и давления всасывания хладагента, измеряемого датчиком *28*.

При достижении текущего значения температуры кипения хладагента в испарителе *11*, измеренного датчиком температуры *30*, предельно минимального и текущего значений концентрации растворённых веществ в концентрируемом жидком продукте, измеренным датчиком *37*, отличным от первоначального содержания сухих веществ, испаритель переключается на регенерацию путём оттаивания, а микропроцессор при помощи исполнительного механизма *61* отключает привод насоса и, соответственно, подачу продукта в рабочую ванну, из которой остатки продукта отводятся в накопительный бак. После этого вымораживающая установка переключается в режим "оттаивание" и микропроцессор вырабатывает управляющий сигнал, при помощи которого срабатывает исполнительный механизм *65* реверсивного двигателя *4*, поворачивающий рабочую ванну в вертикальное положение.

После завершения поворота рабочей ванны исполнительный механизм отключает реверсивный двигатель, и микропроцессор посредством исполнительного механизма *60* кратковременно переключает нагнетание горячих паров хладагента в магистрали *25*, *22* и испаритель *11*, обеспечивая частичное подтаивание гранул вымороженного льда в местах контакта с теплообменной поверхностью испарителя. Одновременно исполнительным механизмом *68* открывается вентиль в магистрали *26* и жидкий хладагент, сконденсировавшийся в испарителе *11*, стекает в ресивер.

Подтаявшие гранулы под действием силы тяжести свободно соскальзывают с теплообменных элементов испарителя *11*, падают

вниз на перфорированную крышку накопительного бака и отводятся из установки.

Микропроцессор исполнительным механизмом *61* включает привод насоса и одновременно исполнительным механизмом *62* переключает вентиль в магистрали *15*, обеспечивая отвод сконцентрированного продукта в магистраль *14* с датчиком расхода *33* сконцентрированного продукта из установки.

При достижении уровня продукта в накопительном баке, равном уровню установленного в нём датчика нижнего уровня *34*, информация поступает в микропроцессор, обеспечивающий переключение работы вымораживающей установки в режим "вымораживание" по ранее описанной схеме.

Вследствие возможных технологических сбоев, связанных с резкими колебаниями температуры и содержания сухих веществ в исходном продукте, наличия нежелательных притоков теплоты из окружающей среды при изменении её температуры, не исключена вероятность изменений скорости намораживания твёрдой фазы, что повлияет на количество вымороженного льда и, соответственно, конечное содержание сухих веществ в сконцентрированном продукте, а также повлечёт за собой корректировку работы холодильной установки по описанной ранее схеме.

Реализация предложенного способа управления процессом низкотемпературного концентрирования вымораживанием в циклическом режиме вишневого и яблочного соков представлена в таблице.

Контролируемые и регулируемые параметры при концентрировании вымораживанием плодовых соков

Контролируемые параметры	Плодовый сок	
	вишневый	яблочный
Масса исходного сока, кг	5,24	5,37
Содержание сухих веществ в исходном соке, %	12,07	17,71
Расход перекачиваемого сока 10^{-5}, $м^3/с$	3,4	1,8
Уровень сока в ванне, м	0,03	0,03
Площадь поверхности теплообмена вымораживающих элементов, $м^2$	0,151	0,092
Температура кипения хладагента в испарителе, °С	−21,3	−19,1
Давление кипения хладагента в испарителе, МПа	0,13	0,14
Температура конденсации хладагента в конденсаторе, °С	33,6	36,2
Давление конденсации хладагента в конденсаторе, МПа	0,88	0,90
Продолжительность концентрирования вымораживанием, с	3600	3600
Количество вымороженного льда, кг	2,01	1,26
Содержание сухих веществ в сконцентрированном соке, %	19,40	23,14

Анализ результатов управления работой вымораживающей установки по предложенному способу показал его эффективность. Кроме того, выявлено, что производительность установки по вымороженному льду и эффективность процесса концентрирования в значительной степени зависят от точности регулирования величины текущей температуры кипения хладагента в испарителе вымораживающей установки и поддержания требуемого уровня жидкого продукта в рабочей ванне [4—6].

Таким образом, предлагаемый программно-логический алгоритм автоматического управления процессом концентрирования вымораживанием в циклическом режиме позволил повысить производительность вымораживающей установки благодаря точности и надёжности управления технологическими параметрами процесса, стабилизировать температурный режим вымораживания влаги в области заданных значений, оперативно реагировать на изменение технологических параметров концентрируемых сред и режимов их обработки, что, соответственно, увеличит выход и максимально сохранит пищевую и биологическую ценность продукта.

Библиографические ссылки

1. **Овсянников В.Ю.** Оптимальные режимы концентрирования плазмы крови вымораживанием // Мясная индустрия. 2012. № 1. С. 65—68.

2. **Овсянников В.Ю.** Определение режимов концентрирования яблочного сока вымораживанием // Хранение и переработка сельхозсырья. 2012. № 7. С. 16—18.

3. **Овсянников В.Ю., Кондратьева Я.И., Бостынец Н.И.** Концентрирование яблочного сока в барабанной вымораживающей установке // Хранение и переработка сельхозсырья. 2014. № 4. С. 41—44.

4. **Антипов С.Т., Овсянников В.Ю., Рязанов А.Н.** Установка для вымораживания и получения чешуйчатого льда // Патент России №2206839. 2003. Бюл. № 17.

5. **Антипов С.Т., Овсянников В.Ю., Рязанов А.Н.** Установка для получения чешуйчатого льда // Патент России №2220385. 2003. Бюл. № 36.

6. **Антипов С.Т., Овсянников В.Ю., Рязанов А.Н.** Кристаллизатор для непрерывного вымораживания и получения чешуйчатого льда // Патент России №2221202. 2004. Бюл. № 1.

УДК 629

Е.А. Микрин, д-р техн. наук, акад. РАН, **Н.Е. Зубов**, д-р техн. наук, проф., **М.В. Ли**
(ОАО "Ракетно-космическая корпорация "Энергия" им. С.П. Королёва, г. Королёв),
В.Н. Рябченко, д-р техн. наук, проф., **Е.К. Ли**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

nik.zubov@gmail.com

ТЕРМИНАЛЬНАЯ ПЕРЕОРИЕНТАЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА В ИНЕРЦИАЛЬНОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ

Получен алгоритм синтеза терминальной переориентации космического аппарата в инерциальной системе координат. Алгоритм основан на определении программных значений компонент вектора угловой скорости и решении задач стабилизации программных значений компонент вектора угловой скорости и требуемой конечной ориентации космического аппарата. Приведены результаты математического моделирования, показывающие успешную работу предлагаемого алгоритма и высокую точность терминального управления для широкого диапазона начальных условий выполнения маневра переориентации космического аппарата в инерциальной системе координат.

Ключевые слова: инерциальная ориентация; математическая модель космического аппарата; терминальное управление; синтез программных значений угловой скорости.

The synthesis algorithm of the spacecraft terminal reorientat in an inertial coordinate system is derived. The algorithm is based on the software values definition of the angular velocity vector component and software values stabilization tasks decision of the components of the angular velocity vector component and the spacecraft demanded final orientation. The mathematical modeling results, showing the successful work of the proposed algorithm and high accuracy of the terminal control for a wide range of the spacecraft reorientation maneuver initial conditions in an inertial coordinate system are adduced.

Keywords: inertial orientation; spacecraft mathematical mode; the terminal management; program values synthesis of angular velocity.

Введение. Под задачей терминальной переориентации будем понимать изменение углового положения космического аппарата (КА), переводящее его из произвольной начальной ориентации в требуемую конечную ориентацию за заданное количество времени. Начальное и конечное положения определяются относительно некоторого опорного базиса, в данном случае инерциального.

Задаче управления угловым движением КА и его переориентацией посвящено множество публикаций [1—5]. В работе [2] управления синтезировались на основе алгоритма с прогнозирующей моделью при минимизации функционала обобщённой работы. Однако аналитическое конструирование по критерию обобщённой работы имеет зависимость от начальных условий, и получение решения для широкого диапазона начальных условий переориентации затруднительно. При терминальной переориентации в инерциальной системе координат (ИСК) управление изменяется в зависимости от участка маневра: разгон, движение с постоянной скоростью, торможение. Используя кинематическую постановку задачи, можно достаточно легко получать в реальном масштабе времени программную траекторию углового движения для участков разгона и движения с постоянной скоростью и, соответственно, построить управление её стабилизации. Синтез управления на участке торможения рассматривается отдельно ввиду необходимости стабилизации требуемой конечной ориентации КА.

Таким образом, в соответствии с участком манёвра задача терминальной переориентации может быть сведена к синтезу программных значений вектора угловой скорости, обеспечивающих процесс переориентации за заданное время (в кинематической постановке), расчёту значений вектора управляющего момента и его стабилизации для участков разгона и движения с постоянной скоростью, и к синтезу тормозных управляющих моментов с последующей стабилизацией требуемой ориентации для участка торможения.

Решению данной задачи переориентации КА за заданное время в ИСК и посвящена данная статья.

Кинематические уравнения вращательного движения КА. Для описания процесса управления ориентацией КА введём следующие системы координат:

O*xyz* — система координат, связанная с КА. Центр O расположен в центре масс КА, оси O*x*, O*y*, O*z* — являются главными центральными осями инерции;

O*XYZ* — инерциальная система координат с началом в точке O. Положение системы координат O*xyz* относительно O*XYZ* зададим с помощью углов Эйлера ψ, ϑ, γ.

Будем использовать кинематические уравнения вращательного движения в параметрах Родрига—Гамильтона [1, 2]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\lambda}_0 \\ \dot{\lambda}_1 \\ \dot{\lambda}_2 \\ \dot{\lambda}_3 \end{bmatrix} = 0,5 \begin{bmatrix} -\lambda_1\omega_x - \lambda_2\omega_y - \lambda_3\omega_z \\ \lambda_0\omega_x + \lambda_2\omega_z - \lambda_3\omega_y \\ \lambda_0\omega_y + \lambda_3\omega_x - \lambda_1\omega_z \\ \lambda_0\omega_z + \lambda_1\omega_y - \lambda_2\omega_x \end{bmatrix}, \qquad (1)$$

где ω_x, ω_y, ω_z — компоненты угловой скорости КА относительно инерциального пространства; λ_0, λ_1, λ_2, λ_3 — компоненты кватерниона.

Аналитическое решение системы (1) при постоянных значениях ω_x, ω_y, ω_z имеет следующий "спиральный" вид [2]:

$$\begin{bmatrix} \lambda_0(t_k) \\ \lambda_1(t_k) \\ \lambda_2(t_k) \\ \lambda_3(t_k) \end{bmatrix} = \left(\cos\frac{\omega t}{2}\mathbf{I}_4 + \frac{1}{\omega}\sin\frac{\omega t}{2}\mathbf{A} \right) \begin{bmatrix} \lambda_0(t_0) \\ \lambda_1(t_0) \\ \lambda_2(t_0) \\ \lambda_3(t_0) \end{bmatrix}, \qquad (2)$$

где $\omega = \sqrt{\omega_x^2(t_0) + \omega_y^2(t_0) + \omega_z^2(t_0)}$; t_0, t_k — время начала и окончания переориентации; $t = (t_k - t_0)$ — временной интервал; $\mathbf{I}_4$ — единичная матрица порядка 4.

В свою очередь

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & \omega_z & -\omega_y \\ \omega_y & -\omega_z & 0 & \omega_x \\ \omega_z & \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix}.$$

Синтез программных значений вектора угловой скорости. Для аналитического решения задачи синтеза программных значений компонент вектора угловой скорости использовался подход, изложенный в работах [6, 7], и результаты, полученные в работе [8]. Запишем только конечные соотношения:

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega}_x \\ \hat{\omega}_y \\ \hat{\omega}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_{x0} \\ \hat{\omega}_{y0} \\ \hat{\omega}_{z0} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_{15} & k_{25} & k_{35} & k_{45} \\ k_{16} & k_{26} & k_{36} & k_{37} \\ k_{17} & k_{27} & k_{37} & k_{47} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \\ \tilde{x}_4 \end{bmatrix},$$

где k_{ij}, $i = 5...7$, $j = 1...4$ — коэффициенты регулятора.

В свою очередь

$$k_{15} = -l_{11}(f_{01} - 1)(f_{11} - 1);$$
$$k_{16} = -l_{12}(f_{01} - 1)(f_{12} - 1);$$
$$k_{17} = -l_{13}(f_{01} - 1)(f_{13} - 1);$$
$$k_{25} = -l_{21}(f_{02} - 1)(f_{11} - 1);$$
$$k_{26} = -l_{22}(f_{02} - 1)(f_{12} - 1);$$
$$k_{27} = -l_{23}(f_{02} - 1)(f_{13} - 1);$$
$$k_{35} = -l_{31}(f_{03} - 1)(f_{11} - 1);$$
$$k_{36} = -l_{32}(f_{03} - 1)(f_{12} - 1);$$
$$k_{37} = -l_{33}(f_{03} - 1)(f_{13} - 1);$$
$$k_{45} = -l_{41}(f_{04} - 1)(f_{11} - 1);$$
$$k_{46} = -l_{42}(f_{04} - 1)(f_{12} - 1);$$
$$k_{47} = -l_{43}(f_{04} - 1)(f_{13} - 1);$$
$$l_{11} = \frac{b_{22}b_{33} - b_{23}b_{32}}{c}; \quad l_{12} = -\frac{b_{21}b_{33} - b_{23}b_{31}}{c};$$
$$l_{13} = \frac{b_{21}b_{32} - b_{22}b_{31}}{c}; \quad l_{21} = -\frac{b_{12}b_{33} - b_{13}b_{32}}{c};$$
$$l_{22} = \frac{b_{11}b_{33} - b_{13}b_{31}}{c}; \quad l_{23} = -\frac{b_{11}b_{32} - b_{12}b_{31}}{c};$$
$$l_{31} = \frac{b_{12}b_{23} - b_{13}b_{22}}{c}; \quad l_{32} = -\frac{b_{11}b_{23} - b_{13}b_{21}}{c};$$
$$l_{33} = \frac{b_{11}b_{22} - b_{12}b_{21}}{c};$$
$$l_{41} = l_{42} = l_{43} = 0;$$
$$c = b_{11}b_{22}b_{33} - b_{11}b_{23}b_{32} - b_{12}b_{21}b_{33} + \\ + b_{12}b_{23}b_{31} + b_{13}b_{21}b_{32} - b_{13}b_{22}b_{31};$$
$$b_{11} = (\omega_x a_{11}p_1 - \lambda_{01}p_2 - \omega_x a_{11}p_3 - \lambda_{00}\omega_x p_4);$$
$$b_{21} = (-\omega_x a_{21}p_1 + \lambda_{00}p_2 + \omega_x a_{21}p_3 - \lambda_{01}\omega_x p_4);$$
$$b_{31} = (-\omega_x a_{31}p_1 + \lambda_{03}p_2 + \omega_x a_{31}p_3 - \lambda_{02}\omega_x p_4);$$
$$b_{41} = (-\omega_x a_{41}p_1 - \lambda_{02}p_2 + \omega_x a_{41}p_3 - \lambda_{03}\omega_x p_4);$$
$$b_{12} = (\omega_y a_{12}p_1 - \lambda_{02}p_2 - \omega_y a_{12}p_3 - \lambda_{00}\omega_y p_4);$$
$$b_{22} = (-\omega_y a_{22}p_1 - \lambda_{03}p_2 + \omega_y a_{22}p_3 - \lambda_{01}\omega_y p_4);$$
$$b_{32} = (-\omega_y a_{32}p_1 + \lambda_{00}p_2 + \omega_y a_{32}p_3 - \lambda_{02}\omega_y p_4);$$
$$b_{42} = (-\omega_y a_{42}p_1 + \lambda_{01}p_2 + \omega_y a_{42}p_3 - \lambda_{03}\omega_y p_4);$$
$$b_{13} = (\omega_z a_{31}p_1 - \lambda_{03}p_2 - \omega_z a_{31}p_3 - \lambda_{00}\omega_z p_4);$$
$$b_{23} = (-\omega_z a_{23}p_1 + \lambda_{02}p_2 + \omega_z a_{23}p_3 - \lambda_{01}\omega_z p_4);$$
$$b_{33} = (-\omega_z a_{33}p_1 - \lambda_{01}p_2 + \omega_z a_{33}p_3 - \lambda_{02}\omega_z p_4);$$
$$b_{43} = (-\omega_z a_{43}p_1 + \lambda_{00}p_2 + \omega_z a_{43}p_3 - \lambda_{03}\omega_z p_4);$$
$$p_1 = \frac{\sin\left(\frac{\omega t}{2}\right)}{\omega^3}; \quad p_2 = \frac{\sin\left(\frac{\omega t}{2}\right)}{\omega};$$

$$p_3 = \frac{t\cos\left(\frac{\omega t}{2}\right)}{2\omega^2}; \quad p_4 = \frac{t\sin\left(\frac{\omega t}{2}\right)}{2\omega};$$

$$a_{11} = a_{12} = a_{13} = \left(-\omega_x\lambda_{01} - \omega_y\lambda_{02} - \omega_z\lambda_{03}\right);$$

$$a_{21} = a_{22} = a_{23} = \left(\omega_x\lambda_{00} - \omega_y\lambda_{03} + \omega_z\lambda_{02}\right);$$

$$a_{31} = a_{32} = a_{33} = \left(\omega_x\lambda_{03} + \omega_y\lambda_{00} - \omega_z\lambda_{01}\right),$$

где f_{01}, f_{02}, f_{03}, f_{11}, f_{12}, f_{13}, f_{14} — значения полюсов; $\hat{\omega}_k$, $k = x, y, z$ — оценки вектора программной скорости [8]; индексом "0" обозначены значения на предыдущем такте вычислений; $\left[\tilde{x}_1 \quad \tilde{x}_2 \quad \tilde{x}_3 \quad \tilde{x}_4\right]^{\mathrm{T}}$ — вектор невязок по компонентам кватернионов [8].

Синтез значений вектора управляющего момента. Динамические уравнения вращательного движения КА запишем следующим образом:

$$\begin{aligned} J_x\dot{\omega}_x + \left(J_z - J_y\right)\omega_y\omega_z &= M_x; \\ J_y\dot{\omega}_y + \left(J_x - J_z\right)\omega_x\omega_z &= M_y; \\ J_z\dot{\omega}_z + \left(J_y - J_x\right)\omega_x\omega_y &= M_z, \end{aligned} \tag{3}$$

где J_x, J_y, J_z — моменты инерции КА относительно осей Ox, Oy, Oz; M_x, M_y, M_z — управляющие моменты по осям ССК, действующие на КА.

Для синтеза значений вектора управляющего момента на первых двух участках построения ориентации перепишем уравнения динамики вращательного движения (3) в следующем виде:

$$\dot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{A}_\omega\boldsymbol{\omega} + \mathbf{B}_\omega\mathbf{u}_\omega, \tag{4}$$

где $\dot{\boldsymbol{\omega}} = \left[\dot{\omega}_x \quad \dot{\omega}_y \quad \dot{\omega}_z\right]^{\mathrm{T}}$; $\boldsymbol{\omega} = \left[\omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z\right]^{\mathrm{T}}$;

$\mathbf{u}_\omega = \left[M_x \quad M_y \quad M_z\right]^{\mathrm{T}}$;

$$\mathbf{A}_\omega = \begin{bmatrix} 0 & \frac{J_y - J_z}{J_x}\omega_z & \frac{J_y - J_z}{J_x}\omega_y \\ \frac{J_z - J_x}{J_y}\omega_z & 0 & \frac{J_z - J_x}{J_y}\omega_x \\ \frac{J_x - J_y}{J_z}\omega_y & \frac{J_x - J_y}{J_z}\omega_x & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_\omega = \begin{bmatrix} J_x^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & J_y^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & J_z^{-1} \end{bmatrix}.$$

Соотношение (4) представляют собой нелинейную нестационарную систему уравнений. Для синтеза значений компонент вектора управляющего момента предлагается на каждом отдельном такте бортовой цифровой вычислительной машины (БЦВМ) использовать систему (4), линеаризованную в окрестности значения вектора состояния на начало каждого такта работы БЦВМ.

После проведения процедуры линеаризации система запишется в виде

$$\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}} = \mathbf{A}_\omega\Delta\boldsymbol{\omega} + \mathbf{B}_\omega\Delta\mathbf{u}_\omega,$$

где $\Delta\dot{\boldsymbol{\omega}} = \left[\Delta\dot{\omega}_x \quad \Delta\dot{\omega}_y \quad \Delta\dot{\omega}_z\right]^{\mathrm{T}}$;

$\boldsymbol{\omega} = \left[\Delta\omega_x \quad \Delta\omega_y \quad \Delta\omega_z\right]^{\mathrm{T}}$;

$\Delta\mathbf{u}_\omega = \left[\Delta M_x \quad \Delta M_y \quad \Delta M_z\right]^{\mathrm{T}}$.

Для нахождения закона управления $\Delta\mathbf{u}_\omega = -K_\omega\Delta\boldsymbol{\omega}$ также воспользуемся алгоритмом многоуровневой декомпозиции, описанным в работе [9].

Тогда матрица обратной связи будет иметь вид

$$\mathbf{K}_{\omega 0} = \boldsymbol{\Phi}_{\omega 0}\mathbf{B}_{\omega 0}^{-} - \mathbf{B}_{\omega 0}^{-}\mathbf{A}_{\omega 0} =$$

$$= \begin{bmatrix} J_x n_{01} & -\omega_z\left(J_y - J_z\right) & -\omega_y\left(J_y - J_z\right) \\ \omega_z\left(J_x - J_z\right) & J_y n_{02} & \omega_x\left(J_x - J_z\right) \\ -\omega_y\left(J_x - J_y\right) & -\omega_x\left(J_x - J_y\right) & J_z n_{03} \end{bmatrix},$$

где $\mathbf{B}_{\omega 0}^{-} = \mathbf{B}_{\omega 0}^{+} = \begin{bmatrix} J_x & 0 & 0 \\ 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & J_z \end{bmatrix}$,

$\boldsymbol{\Phi}_{\omega 0} = \mathrm{diag}\left(n_{01} \quad n_{02} \quad n_{03}\right)$.

Для синтеза значений вектора управляющего момента на последнем участке переориентации будем использовать следующую линеаризованную математическую модель вращательного движения КА:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -0,5x_5 & -0,5x_6 & -0,5x_7 & 0 & 0 & 0 \\ 0,5x_5 & 0 & 0 & 0 & 0,5 & -0,5x_4 & 0,5x_3 \\ 0,5x_6 & 0 & 0 & 0 & 0,5x_4 & 0,5 & -0,5x_2 \\ 0,5x_7 & 0 & 0 & 0 & -0,5x_3 & 0,5x_2 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & g_{56} & g_{57} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_{65} & 0 & g_{67} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & g_{75} & g_{76} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ J_x^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & J_y^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & J_z^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix}, \tag{5}$$

где $g_{56} = \frac{J_y - J_z}{J_x}\omega_z$; $g_{57} = \frac{J_y - J_z}{J_x}\omega_y$; $g_{65} = \frac{J_z - J_x}{J_y}\omega_z$;

$g_{67} = \frac{J_z - J_x}{J_y}\omega_x$; $g_{75} = \frac{J_x - J_y}{J_z}\omega_y$; $g_{76} = \frac{J_x - J_y}{J_z}\omega_x$;

J_x, J_y, J_z — главные центральные моменты инерции КА; $x_1 = \lambda_0$; $x_2 = \lambda_1$; $x_3 = \lambda_2$; $x_4 = \lambda_3$; $x_5 = \omega_x$; $x_6 = \omega_y$; $x_7 = \omega_z$; λ_i, $i = 0...3$ — компоненты кватерниона рассогласования; M_x, M_y, M_z — управляющие моменты.

Для системы (5) размерность пространства состояний $n = 7$, размерность вектора управления $m = 3$. В результате применяемая декомпозиция содержит три уровня.

Для нахождения первого уровня декомпозиции вычислим матрицу-аннулятор и псевдообратную матрицу [9]. Имеем

$$\mathbf{B}_{\tau 0}^{\perp} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \ \mathbf{B}_{\tau 0}^{\perp -} = \mathbf{B}_{\tau 0}^{\perp \mathrm{T}};$$

$$\mathbf{B}_{\tau 0}^{+} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & J_x & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & J_z \end{bmatrix}.$$

Далее вычислим матрицы первого уровня

$$\mathbf{A}_{\tau 1} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 0 & -\omega_x & -\omega_y & -\omega_z \\ \omega_x & 0 & 0 & 0 \\ \omega_y & 0 & 0 & 0 \\ \omega_z & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_{\tau 1} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ J_x^{-1} & -J_y^{-1}\lambda_3 & J_z^{-1}\lambda_2 \\ J_x^{-1}\lambda_3 & J_y^{-1} & -J_z^{-1}\lambda_1 \\ -J_x^{-1}\lambda_2 & J_y^{-1}\lambda_1 & J_z^{-1} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_{\tau 1}^{+} = b_{\tau 1}^{+}\begin{bmatrix} 0 & b_{\tau 1_12} & b_{\tau 1_13} & b_{\tau 1_14} \\ 0 & b_{\tau 1_22} & b_{\tau 1_23} & b_{\tau 1_24} \\ 0 & b_{\tau 1_32} & b_{\tau 1_33} & b_{\tau 1_34} \end{bmatrix};$$

$$b_{\tau 1}^{+} = \frac{1}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + 1};$$

$$b_{\tau 1_12} = 2J_x\left(\lambda_1^2 + 1\right); b_{\tau 1_13} = 2J_x\left(\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2\right);$$

$$b_{\tau 1_14} = -2J_x\left(\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3\right);$$

$$b_{\tau 1_22} = -2J_y\left(\lambda_3 + \lambda_1\lambda_2\right); b_{\tau 1_23} = 2J_y\left(\lambda_2^2 + 1\right);$$

$$b_{\tau 1_24} = 2J_y\left(\lambda_1 + \lambda_1\lambda_3\right);$$

$$b_{\tau 1_32} = 2J_z\left(\lambda_2 + \lambda_1\lambda_3\right); b_{\tau 1_33} = -2J_z\left(\lambda_1 + \lambda_2\lambda_3\right);$$

$$b_{\tau 1_34} = 2J_y\left(\lambda_3^2 + 1\right).$$

Матрицы второго уровня:

$$\mathbf{A}_{\tau 2} = 0, \quad \mathbf{B}_{\tau 2} = \frac{1}{4}\left[\beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3\right];$$

$$\beta_1 = J_x^{-1}\left(\lambda_2\omega_z - \omega_1 - \lambda_3\omega_y\right);$$

$$\beta_2 = J_y^{-1}\left(\lambda_3\omega_x - \omega_2 - \lambda_1\omega_z\right);$$

$$\beta_3 = J_z^{-1}\left(\lambda_1\omega_y - \omega_3 - \lambda_2\omega_x\right).$$

Так как число строк матрицы $\mathbf{B}_{\tau 2}$ превышает число столбцов, необходимо выполнить скелетное разложение матрицы $\mathbf{B}_{\tau 2}$ и "перезапустить алгоритм":

$$\mathbf{B}_{\tau 2} = \widehat{\mathbf{B}}_{\tau 2}\mathbf{T}_{\tau 2}; \ \widehat{\mathbf{B}}_{\tau 2} = 1; \quad \mathbf{T}_{\tau 2} = \mathbf{B}_{\tau 2}.$$

Матрицы второго дополнительного уровня:

$$\widehat{\mathbf{A}}_{\tau 2} = \mathbf{A}_{\tau 2} = 0; \ \widehat{\mathbf{B}}_{\tau 2} = 1; \quad \widehat{\mathbf{B}}_{\tau 2}^{+} = \widehat{\mathbf{B}}_{\tau 2}^{-1} = 1.$$

Зададим матрицы $\mathbf{\Phi}_{\tau 0}$, $\mathbf{\Phi}_{\tau 1}$, $\mathbf{\Phi}_{\tau 2}$ в следующем (диагональном) виде:

$$\mathbf{\Phi}_{\tau 2} = c_{21}; \ \mathbf{\Phi}_{\tau 1} = \mathrm{diag}(c_{11}\ c_{12}\ c_{13});$$
$$\mathbf{\Phi}_{\tau 0} = \mathrm{diag}(c_{01}\ c_{02}\ c_{03}),$$

где c_{ij} — некоторые вещественные числа.

Тогда для второго уровня:

$$\mathbf{K}_{\tau 2} = \frac{c_{21}}{\beta_{\tau 2}}\left[\beta_1 \quad \beta_2 \quad \beta_3\right]^{\mathrm{T}};$$

$$\beta_{\tau 2} = \beta_1^2 + \beta_2^2 + \beta_3^2.$$

Для первого уровня декомпозиции:

$$\mathbf{B}_{\tau 1}^{-} = b_{\tau 1}^{+}\begin{bmatrix} c_{21}\beta_1\beta_{\tau 2}^{-1} & b_{\tau 1_12} & b_{\tau 1_13} & b_{\tau 1_14} \\ c_{21}\beta_2\beta_{\tau 2}^{-1} & b_{\tau 1_22} & b_{\tau 1_23} & b_{\tau 1_24} \\ c_{21}\beta_3\beta_{\tau 2}^{-1} & b_{\tau 1_32} & b_{\tau 1_33} & b_{\tau 1_34} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_{\tau 1} = \begin{bmatrix} k_{\tau 1_11} & k_{\tau 1_12} & k_{\tau 1_13} & k_{\tau 1_14} \\ k_{\tau 1_21} & k_{\tau 1_22} & k_{\tau 1_23} & k_{\tau 1_24} \\ k_{\tau 1_31} & k_{\tau 1_32} & k_{\tau 1_33} & k_{\tau 1_34} \end{bmatrix};$$

$$k_{\tau 1_11} = \frac{b_{\tau 1}^{+}}{2}\left(\omega_x b_{\tau 1_12} + \omega_y b_{\tau 1_13} + \omega_z b_{\tau 1_14}\right) -$$
$$-\frac{1}{\beta_{\tau 2}}\left(c_{11}c_{21}\beta_1\right);$$

$$k_{\tau 1_12} = -b_{\tau 1}^{+}b_{\tau 1_12}c_{11} - \frac{1}{2\beta_{\tau 2}}\left(\omega_x c_{21}\beta_1\right);$$

$$k_{\tau 1_13} = -b_{\tau 1}^{+}b_{\tau 1_13}c_{11} - \frac{1}{2\beta_{\tau 2}}\left(\omega_y c_{21}\beta_1\right);$$

$$k_{\tau 1_14} = -b_{\tau 1}^{+}b_{\tau 1_14}c_{11} - \frac{1}{2\beta_{\tau 2}}\left(\omega_z c_{21}\beta_1\right);$$

$$k_{\tau 1_21} = \frac{b_{\tau 1}^{+}}{2}\left(\omega_x b_{\tau 1_22} + \omega_y b_{\tau 1_23} + \omega_z b_{\tau 1_24}\right) -$$
$$-\frac{1}{\beta_{\tau 2}}\left(c_{12}c_{21}\beta_2\right);$$

$$k_{\tau1_22} = -b_{\tau1}^{+} b_{\tau1_22} c_{12} - \frac{1}{2\beta_{\tau2}}\left(\omega_x c_{21}\beta_2\right);$$

$$k_{\tau1_23} = -b_{\tau1}^{+} b_{\tau1_23} c_{12} - \frac{1}{2\beta_{\tau2}}\left(\omega_y c_{21}\beta_2\right);$$

$$k_{\tau1_24} = -b_{\tau1}^{+} b_{\tau1_24} c_{12} - \frac{1}{2\beta_{\tau2}}\left(\omega_z c_{21}\beta_2\right);$$

$$k_{\tau1_31} = \frac{b_{\tau1}^{+}}{2}\left(\omega_x b_{\tau1_32} + \omega_y b_{\tau1_33} + \omega_z b_{\tau1_34}\right) - \\ - \frac{1}{\beta_{\tau2}}\left(c_{13} c_{21}\beta_3\right);$$

$$k_{\tau1_32} = -b_{\tau1}^{+} b_{\tau1_32} c_{13} - \frac{1}{2\beta_{\tau2}}\left(\omega_x c_{21}\beta_3\right);$$

$$k_{\tau1_33} = -b_{\tau1}^{+} b_{\tau1_33} c_{13} - \frac{1}{2\beta_{\tau2}}\left(\omega_y c_{21}\beta_3\right);$$

$$k_{\tau1_34} = -b_{\tau1}^{+} b_{\tau1_34} c_{13} - \frac{1}{2\beta_{\tau2}}\left(\omega_z c_{21}\beta_3\right).$$

Для нулевого уровня декомпозиции:

$$\mathbf{B}_{\tau1}^{-} = \begin{bmatrix} k_{\tau1_11} & k_{\tau1_12} & k_{\tau1_13} & k_{\tau1_14} & J_x & 0 & 0 \\ k_{\tau1_21} & k_{\tau1_22} & k_{\tau1_23} & k_{\tau1_24} & 0 & J_y & 0 \\ k_{\tau1_31} & k_{\tau1_32} & k_{\tau1_33} & k_{\tau1_34} & 0 & 0 & J_z \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{K}_{\tau0} = \\ = \begin{bmatrix} k_{\tau0_11} & k_{\tau0_12} & k_{\tau0_13} & k_{\tau0_14} & k_{\tau0_15} & k_{\tau0_16} & k_{\tau0_17} \\ k_{\tau0_21} & k_{\tau0_22} & k_{\tau0_23} & k_{\tau0_24} & k_{\tau0_25} & k_{\tau0_26} & k_{\tau0_27} \\ k_{\tau0_31} & k_{\tau0_32} & k_{\tau0_33} & k_{\tau0_34} & k_{\tau0_35} & k_{\tau0_36} & k_{\tau0_37} \end{bmatrix};$$

$$k_{\tau0_11} = \frac{1}{2}\left(\omega_x k_{\tau1_12} + \omega_y k_{\tau1_13} + \omega_z k_{\tau1_14}\right) - c_{01} k_{\tau1_11};$$

$$k_{\tau0_12} = -k_{\tau1_12} c_{01} - \frac{1}{2}\left(\omega_x k_{\tau1_11}\right);$$

$$k_{\tau0_13} = -k_{\tau1_13} c_{01} - \frac{1}{2}\left(\omega_y k_{\tau1_11}\right);$$

$$k_{\tau0_14} = -k_{\tau1_14} c_{01} - \frac{1}{2}\left(\omega_z k_{\tau1_11}\right);$$

$$k_{\tau0_15} = \frac{1}{2}\left(k_{\tau1_12} + \lambda_3 k_{\tau1_13} - \lambda_2 k_{\tau1_14}\right) - J_x c_{01};$$

$$k_{\tau0_16} = \frac{1}{2}\left(k_{\tau1_13} + \lambda_1 k_{\tau1_14} - \lambda_3 k_{\tau1_12}\right) + \omega_z\left(J_y - J_z\right);$$

$$k_{\tau0_17} = \frac{1}{2}\left(k_{\tau1_14} + \lambda_2 k_{\tau1_12} - \lambda_1 k_{\tau1_13}\right) + \omega_y\left(J_y - J_z\right);$$

$$k_{\tau0_21} = \frac{1}{2}\left(\omega_x k_{\tau1_22} + \omega_y k_{\tau1_23} + \omega_z k_{\tau1_24}\right) - c_{02} k_{\tau1_21};$$

$$k_{\tau0_22} = -k_{\tau1_22} c_{02} - \frac{1}{2}\left(\omega_x k_{\tau1_21}\right);$$

$$k_{\tau0_23} = -k_{\tau1_23} c_{02} - \frac{1}{2}\left(\omega_y k_{\tau1_21}\right);$$

$$k_{\tau0_24} = -k_{\tau1_24} c_{02} - \frac{1}{2}\left(\omega_z k_{\tau1_21}\right);$$

$$k_{\tau0_25} = \frac{1}{2}\left(k_{\tau1_22} + \lambda_3 k_{\tau1_23} - \lambda_2 k_{\tau1_24}\right) - \omega_z\left(J_x - J_z\right);$$

$$k_{\tau0_26} = \frac{1}{2}\left(k_{\tau1_23} + \lambda_1 k_{\tau1_24} - \lambda_3 k\tau_{\tau1_22}\right) - J_y c_{02};$$

$$k_{\tau0_27} = \frac{1}{2}\left(k_{\tau1_24} + \lambda_2 k_{\tau1_22} - \lambda_1 k_{\tau1_23}\right) - \omega_x\left(J_x - J_z\right);$$

$$k_{\tau0_31} = \frac{1}{2}\left(\omega_x k_{\tau1_32} + \omega_y k_{\tau1_33} + \omega_z k_{\tau1_34}\right) - c_{03} k_{\tau1_31};$$

$$k_{\tau0_32} = -k_{\tau1_32} c_{03} - \frac{1}{2}\left(\omega_x k_{\tau1_31}\right);$$

$$k_{\tau0_33} = -k_{\tau1_33} c_{03} - \frac{1}{2}\left(\omega_y k_{\tau1_31}\right);$$

$$k_{\tau0_34} = -k_{\tau1_34} c_{03} - \frac{1}{2}\left(\omega_z k_{\tau1_31}\right);$$

$$k_{\tau0_35} = \frac{1}{2}\left(k_{\tau1_32} + \lambda_3 k_{\tau1_33} - \lambda_2 k_{\tau1_34}\right) + \omega_y\left(J_x - J_y\right);$$

$$k_{\tau0_36} = \frac{1}{2}\left(k_{\tau1_33} + \lambda_1 k_{\tau1_34} - \lambda_3 k_{\tau1_32}\right) + \omega_x\left(J_x - J_y\right);$$

$$k_{\tau0_37} = \frac{1}{2}\left(k_{\tau1_34} + \lambda_2 k_{\tau1_32} - \lambda_1 k_{\tau1_33}\right) - J_z\, c_{03}.$$

Переключение алгоритмов. Момент перехода от участка разгона/движения с постоянной скоростью к участку торможения в первом приближении можно рассчитать следующим образом.

Получаем первичное значение требуемой угловой скорости с параметром времени на переориентацию меньшим, чем у исходного на 30 % (не более 30 с), используя алгоритм синтеза компонент вектора программной угловой скорости. Рассчитываем время разгона:

$$t_r = \max\left(\omega_{\text{prog}_i}\frac{J_i}{M_{\max}}\right), i = (x, y, z),$$

где t_r — максимальное время, необходимое для набора программной скорости; ω_{prog_i} — угловая скорость; J_i — осевой момент инерции; $M_{\max}$ — максимальный развиваемый управляющий момент.

Затем рассчитываем новое время окончания маневра для алгоритма программной угловой скорости t_{k_1} и время переключения на алгоритм стабилизации t_p:

$$t_{k_1} = t_k - \frac{t_r}{2};\ t_p = t_k - t_r.$$

Моделирование режима построения ориентации КА. Рассмотрим случай терминальной переориентации КА в инерциальной системе координат со следующими значениями начального и конечного кватернионов ориентации Λ_0 и Λ_{end}:

$$\Lambda_0 = \begin{bmatrix} 0,4940 \\ 0,4546 \\ -0,0294 \\ -0,7405 \end{bmatrix};\quad \Lambda_{\text{end}} = \begin{bmatrix} 0,6820 \\ -0,0043 \\ -0,6144 \\ 0,3967 \end{bmatrix},$$

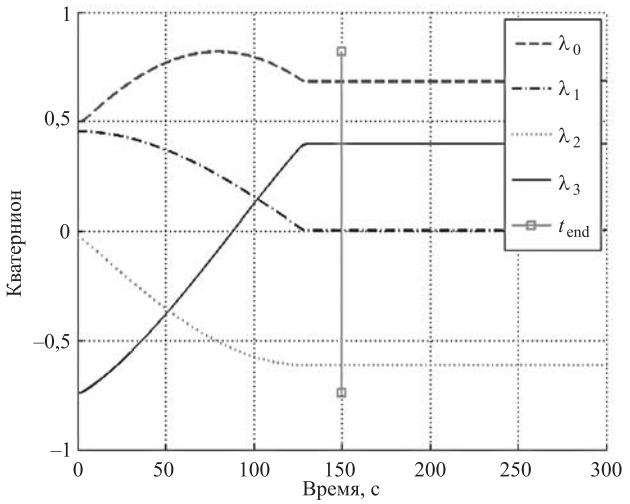


Рис. 1. График изменения параметров кватерниона ориентации КА

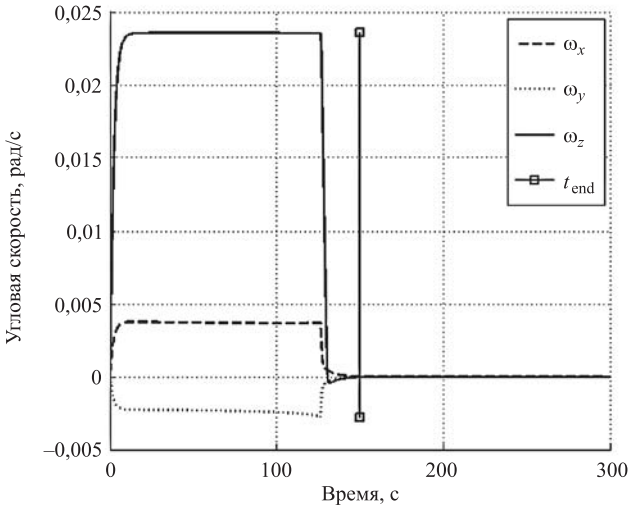


Рис. 2. График изменения значений вектора угловой скорости

что соответствует следующим углам последовательных поворотов φ, ψ, ϑ вокруг осей O*Z*, O*Y*, O*X*:

$$\begin{bmatrix}\varphi_0\\ \psi_0\\ \vartheta_0\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}-1,7\\ 0,7\\ 0,7\end{bmatrix}\text{ рад};\quad \begin{bmatrix}\varphi_{\text{end}}\\ \psi_{\text{end}}\\ \vartheta_{\text{end}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}1,7\\ -1,0\\ -1,1\end{bmatrix}\text{ рад}.$$

Время построения ориентации зададим 150 с. Считаем, что матрица моментов инерции КА:

$$J=\begin{bmatrix}600 & 0 & 0\\ 0 & 2500 & 0\\ 0 & 0 & 2300\end{bmatrix}.$$

Предположим, что управляющий момент реализуется двигателями с дросселируемой тягой. Максимальный управляющий момент ограничен величиной в 15 Н·м. Значения всех полюсов $f_{01}, f_{02}, f_{03}, f_{11}, f_{12}, f_{13}$ алгоритма оценки угловой скорости примем равными 0,1. Значения полюсов в алгоритме синтеза управляющего момента на участке разгона и движения с постоянной скоростью примем равными: $n_{01} = n_{02} = n_{03} = -0,5$. Значения полюсов на участке торможения: $c_{01} = c_{02} = c_{03} = c_{11} = c_{12} = c_{13} = -0,6$; $c_{21} = -1\cdot10^{-8}$.

Полученные результаты моделирования представлены на рис. 1 и 2.

Для проверки работоспособности алгоритма также была проведена серия испытаний с изменением времени манёвра и начальной ориентации КА, задаваемая для наглядности с помощью углов последовательных поворотов. Параметры изменялись в следующих преде-

Таблица 1

Математические ожидания значений угловых скоростей и углов рассогласования на момент окончания манёвра

t_{per}, с	$M[\omega_x]$, с$^{-1}$	$M[\omega_y]$, с$^{-1}$	$M[\omega_z]$, с$^{-1}$	$M[\vartheta]$, рад	$M[\psi]$, рад	$M[\varphi]$, рад
80	$5,7243\cdot10^{-8}$	$1,4694\cdot10^{-8}$	$6,1305\cdot10^{-8}$	$-1,0595\cdot10^{-6}$	$5,2720\cdot10^{-6}$	$-1,0327\cdot10^{-6}$
88	$2,4692\cdot10^{-7}$	$9,2604\cdot10^{-7}$	$8,1902\cdot10^{-8}$	$-1,6733\cdot10^{-7}$	$-5,3908\cdot10^{-6}$	$4,6920\cdot10^{-7}$
96	$5,7271\cdot10^{-8}$	$8,6657\cdot10^{-7}$	$-1,7893\cdot10^{-8}$	$-4,8372\cdot10^{-7}$	$-4,2264\cdot10^{-6}$	$7,7626\cdot10^{-7}$
104	$7,7103\cdot10^{-8}$	$4,5144\cdot10^{-7}$	$-8,8076\cdot10^{-8}$	$-5,5260\cdot10^{-7}$	$-2,3755\cdot10^{-6}$	$3,6362\cdot10^{-7}$
112	$8,4671\cdot10^{-8}$	$2,0381\cdot10^{-7}$	$-4,2881\cdot10^{-9}$	$-5,4778\cdot10^{-7}$	$-1,6485\cdot10^{-6}$	$-1,1437\cdot10^{-8}$
120	$3,7883\cdot10^{-8}$	$2,1080\cdot10^{-7}$	$-3,9640\cdot10^{-8}$	$-2,5006\cdot10^{-7}$	$-1,4328\cdot10^{-6}$	$2,0922\cdot10^{-7}$
128	$4,9431\cdot10^{-8}$	$1,0849\cdot10^{-7}$	$-1,1719\cdot10^{-8}$	$-2,8260\cdot10^{-7}$	$-7,9570\cdot10^{-7}$	$3,260\cdot10^{-7}$
136	$3,9897\cdot10^{-8}$	$1,0906\cdot10^{-7}$	$4,9013\cdot10^{-8}$	$-3,0849\cdot10^{-7}$	$-6,3891\cdot10^{-7}$	$-2,4274\cdot10^{-7}$
144	$7,2197\cdot10^{-8}$	$7,9824\cdot10^{-8}$	$-1,9032\cdot10^{-8}$	$-3,1296\cdot10^{-7}$	$-5,0776\cdot10^{-7}$	$1,2743\cdot10^{-7}$
152	$8,2077\cdot10^{-8}$	$8,6481\cdot10^{-8}$	$1,1457\cdot10^{-9}$	$-5,2823\cdot10^{-7}$	$-6,3537\cdot10^{-7}$	$-2,5796\cdot10^{-8}$
160	$8,0097\cdot10^{-8}$	$1,3033\cdot10^{-7}$	$1,2960\cdot10^{-8}$	$-5,0657\cdot10^{-7}$	$-6,8601\cdot10^{-7}$	$1,1231\cdot10^{-7}$

Таблица 2

Средние квадратические отклонения значений угловых скоростей и углов рассогласования на момент окончания манёвра

$t_{рег}$, с	σ_{ω_x}, с$^{-1}$	σ_{ω_y}, с$^{-1}$	σ_{ω_z}, с$^{-1}$	σ_ϑ, рад	σ_ψ, рад	σ_φ, рад
80	$2{,}5412\cdot10^{-5}$	$2{,}3077\cdot10^{-5}$	$2{,}3687\cdot10^{-5}$	$1{,}2922\cdot10^{-4}$	$1{,}2861\cdot10^{-4}$	$1{,}3411\cdot10^{-4}$
88	$2{,}2525\cdot10^{-5}$	$1{,}9901\cdot10^{-5}$	$1{,}9903\cdot10^{-5}$	$1{,}3968\cdot10^{-4}$	$1{,}2266\cdot10^{-4}$	$1{,}2550\cdot10^{-4}$
96	$1{,}7840\cdot10^{-5}$	$1{,}4662\cdot10^{-5}$	$1{,}4109\cdot10^{-5}$	$1{,}1421\cdot10^{-4}$	$8{,}7648\cdot10^{-5}$	$9{,}0794\cdot10^{-5}$
104	$1{,}2988\cdot10^{-5}$	$1{,}0416\cdot10^{-5}$	$9{,}1668\cdot10^{-6}$	$8{,}0559\cdot10^{-5}$	$6{,}0598\cdot10^{-5}$	$5{,}6550\cdot10^{-5}$
112	$1{,}0867\cdot10^{-5}$	$8{,}5718\cdot10^{-6}$	$7{,}1116\cdot10^{-6}$	$6{,}7605\cdot10^{-5}$	$4{,}9303\cdot10^{-5}$	$4{,}3462\cdot10^{-5}$
120	$9{,}4135\cdot10^{-6}$	$7{,}7453\cdot10^{-6}$	$5{,}7722\cdot10^{-6}$	$5{,}7815\cdot10^{-5}$	$4{,}5879\cdot10^{-5}$	$3{,}5630\cdot10^{-5}$
128	$8{,}1234\cdot10^{-6}$	$7{,}1036\cdot10^{-6}$	$5{,}0985\cdot10^{-6}$	$4{,}9920\cdot10^{-5}$	$4{,}1906\cdot10^{-5}$	$2{,}9781\cdot10^{-5}$
136	$7{,}0905\cdot10^{-6}$	$6{,}4802\cdot10^{-6}$	$4{,}2112\cdot10^{-6}$	$4{,}2477\cdot10^{-5}$	$3{,}7711\cdot10^{-5}$	$2{,}5710\cdot10^{-5}$
144	$6{,}5795\cdot10^{-6}$	$6{,}3392\cdot10^{-6}$	$4{,}0603\cdot10^{-6}$	$3{,}7836\cdot10^{-5}$	$3{,}4845\cdot10^{-5}$	$2{,}3203\cdot10^{-5}$
152	$5{,}7037\cdot10^{-6}$	$5{,}7978\cdot10^{-6}$	$3{,}5516\cdot10^{-6}$	$3{,}4144\cdot10^{-5}$	$3{,}4783\cdot10^{-5}$	$2{,}0443\cdot10^{-5}$
160	$5{,}1641\cdot10^{-6}$	$5{,}3051\cdot10^{-6}$	$3{,}4045\cdot10^{-6}$	$3{,}0151\cdot10^{-5}$	$3{,}1162\cdot10^{-5}$	$1{,}9802\cdot10^{-5}$

лах: $t_{рег}$ = 80...160 с с шагом 8 с; φ_0 = −3...3 рад с шагом 0,4 рад; ψ_0 = −1,5...1,5 рад с шагом 0,2 рад; ϑ_0 = −3...3 рад с шагом 0,4 рад. Конечное положение, моменты инерции, управляющие моменты и коэффициенты законов управления оставались неизменными. Величины математических ожиданий и средних квадратических отклонений для скоростей и углов рассогласований представлены в таблицах 1 и 2.

Результаты моделирования показали, что с использованием предложенных алгоритмов построение терминальной ориентации КА в инерциальной системе координат успешно завершается за заданный временной интервал, при этом обеспечивается точность управления.

Заключение. В работе предложен алгоритм синтеза терминального управления переориентацией КА в ИСК. Алгоритм основан на аналитических решениях задач определения программных значений компонент вектора угловой скорости КА в ИСК, синтеза управлений их стабилизации, и поддержания требуемых значений параметров углового движения КА на момент окончания процесса переориентации. Приведены результаты моделирования, демонстрирующие работоспособность предложенного подхода и высокую точность управления на момент окончания режима переориентации для широкого диапазона как начальных значений углового положения КА, так и времени выполнения переориентации. Результаты работы согласуются с полученным решением в работе [3] и не содержат ограничений, характерных для применения функционала обобщённой работы, которые отмечены во введении.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 14-11-00046).

Библиографические ссылки

1. **Голубев Ю.Ф**. Алгебра кватернионов в кинематике твердого тела // Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. 2013. № 39. 23 с. URL: http://library.keldysh.ru/preprint.asp?id = 2013-39 (дата обращения: 15.08.2015).

2. **Зубов Н.Е.** Оптимальное управление терминальной переориентацией КА на основе алгоритма с прогнозирующей моделью // Космические исследования 1991. Т. 29. № 3. С. 340—350.

3. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мирисханов М.Ш., Рябченко В.Н**. Синтез развязывающих законов стабилизации орбитальной ориентации космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2012. № 1. С. 92—108.

4. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Рябченко В.Н., Олейник А.С., Ефанов Д.Е.** Оценка угловой скорости космического аппарата в режиме орбитальной стабилизации по результатам измерений датчика местной вертикали // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Приборостроение", 2014. № 5. С. 3—17.

5. **Воробьева Е.А., Зубов Н.Е., Микрин Е.А. и др.** Синтез стабилизирующего управления космическим аппаратом на основе обобщённой формулы Аккермана // Изв. РАН. ТиСУ. 2011. № 1. С. 96—106.

6. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш., Олейник А.С., Рябченко В.Н.** Терминальное релейно-импульсное управление линейными стационарными динамическими системами // Изв. РАН. ТиСУ. 2014. № 3. С. 134—149.

7. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш. и др.** Применение алгоритма точного размещения полюсов при решении задач наблюдения и идентификации в процессе управления движением космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2013. № 1. С. 135—151.

8. **Зубов Н.Е., Ли Е.К., Ли М.В., Микрин Е.А., Поклад М.Н., Рябченко В.Н.** Алгоритм вычисления программных значений компонент вектора угловой скорости при терминальном пространственном развороте космического аппарата в инерциальной системе координат // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия "Приборостроение", 2015. № 6. С. 3—17.

9. **Зубов Н.Е., Микрин Е.А., Мисриханов М.Ш. и др.** Модификация метода точного размещения полюсов и его применение в задачах управления движением космического аппарата // Изв. РАН. ТиСУ. 2013 г. № 2. С. 118—132.

УДК 681.513

К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф.
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
Нгуен Динь Тхай
(Ханойский научно-исследовательский институт, СРВ)

neysipin@mail.ru

АЛГОРИТМ КОРРЕКЦИИ ИНЕРЦИАЛЬНОЙ НАВИГАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ АНОМАЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

Рассмотрена задача коррекции инерциальных навигационных систем с помощью алгоритмов оценивания. Исследованы особенности процесса алгоритмической коррекции инерциальной навигационной системы от спутниковых систем. При исчезновении сигналов от спутников использована коррекция с помощью линейного прогнозирующего тренда. При восстановлении сигнала от спутниковой системы влияние аномальных измерений предложено полностью исключать с помощью вычисления погрешностей навигационной системы с использованием сформированной оценки обновляемой последовательности.

Ключевые слова: инерциальная навигационная система; спутниковая система; аномальные измерения, коррекция; фильтр Калмана; адаптивный алгоритм оценивания; обновляемая последовательность.

The correction problem of inertial navigation systems by using estimation algorithms is considered. The algorithmic correction features of an inertial navigation system by satellite systems are researched. The correction by means of linear predicting trend is utilized at disappearance of the signals from the satellites. The anomalous measurements influences when restoring the signal from the satellite system is proposed to exclude completely by using navigation system errors calculation through the use of renovable sequence formed evaluation.

Keywords: inertial navigation system; satellite system; anomalous measurement, correction; Kalman filter; adaptive valuation algorithm; renovable sequence.

Введение. Алгоритмические методы повышения точности инерциальных навигационных систем (ИНС), как правило, включают алгоритмы оценивания, управления, прогноза и комплексирования [1].

При функционировании ИНС ЛА без коррекции от внешних измерительных систем наземных станций ближней и дальней навигации, спутниковых систем для компенсации погрешностей автономной ИНС используют способы формирования корректирующего сигнала на основе информации с датчиков углов прецессии гироскопов [2], формируют компенсационные сигналы с помощью алгоритмов оценивания.

Существенно повысить точность ИНС ЛА можно при использовании сигналов от внешнего по отношению к ИНС источника информации. В настоящее время наиболее точными являются навигационные системы с коррекцией от ГЛОНАСС/GPS. Рассматриваются различные схемы коррекции навигационных систем и алгоритмические методы повышения точности навигационной информации при функционировании систем в условиях активных и пассивных помех, а также при сложном движении несущего объекта.

Ниже представлены алгоритмы оценивания: фильтр Калмана, адаптивная модификация фильтра Калмана.

Алгоритмическая коррекция навигационных систем. Современные измерительные системы обычно корректируются алгоритмическим путём. В качестве алгоритмов коррекции часто используются различные алгоритмы оценивания для вычисления погрешностей измерительных систем [3—5]. Схема коррекции ИНС представлена на рисунке.

Компенсация ошибок ИНС предполагает формирование сигналов коррекции, пропорциональных ошибкам системы в определении скорости, углам отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника и дрейфам ГСП. Ошибки автономной ИНС, в отсутствие сигналов ГЛОНАСС, не поддаются непосредственному измерению. По-

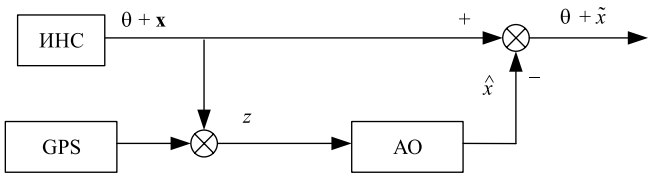


Схема коррекции ИНС с внешним источником информации GPS:
АО — алгоритм оценивания; θ — истинная навигационная информация; z — сигнал с датчика угла прецессии; **x** — вектор погрешностей ИНС; $\hat{x}$ — оценки погрешностей ИНС; $\tilde{x}$ — ошибки оценивания

этому в качестве измерений используют углы отклонения ГСП от плоскости горизонта и заданного направления в азимуте, сформированные на основе информации, снимаемой с датчиков углов прецессии гироскопов [2].

Наиболее точно современные ИНС корректируются алгоритмически с использованием информации от GPS. Часто в качестве алгоритмов коррекции используются различные алгоритмы оценивания для вычисления погрешностей измерительных систем [6].

Фильтр Калмана (Kalman filtering—KF), также известный как алгоритм линейного квадратичного оценивания (linear quadratic estimation—LQE) [1, 3, 4], обеспечивает рекурсивное решение для линейной задачи оптимального оценивания в стационарных и нестационарных условиях.

Рассмотрим линейную систему вида:

$$x_k = \mathbf{\Phi}_{k,k-1}x_{k-1} + w_{k-1}, \qquad (1)$$

где x_k — вектор состояния; $\Phi_{k,k-1}$ — матрица модели; w_{k-1} — вектор входного возмущения.

Входные возмущения предполагаются r-мерным дискретным аналогом гауссового белого шума с нулевым математическим ожиданием и известной ковариационной матрицей:

$$\mathrm{M}\left[w_k w_k^T\right] = \mathrm{Q}_k \delta_{j,k},$$

где Q_k — неотрицательно определённая матрица; $\delta_{j,k}$ — символ Кронекера;

$$\delta_{j,k} = \begin{cases} 1, \text{если } j = k, \\ 0, \text{если } j \neq k. \end{cases}$$

Часть вектора состояния измеряется:

$$z_{k+1} = \mathrm{H}_{k+1}z_{k+1} + V_{k+1}, \qquad (2)$$

где z_{k+1} — вектор измерений; V_{k+1} — вектор ошибок измерения; H_{k+1} — матрица измерений.

Ошибки измерений предполагаются дискретным аналогом гауссового белого шума, для которого $\mathrm{M}[V_{k+1}] = 0$:

$$\mathrm{M}\left[V_j V_{k+1}^T\right] = \mathrm{R}_{k+1}\delta_{j,k+1}, \qquad (3)$$

где R_{k+1} — неотрицательно определённая матрица.

Ошибки измерения и входные возмущения некоррелированы:

$$\mathrm{M}\left[V_j W_k^T\right] = 0 \text{ при любых } j \text{ и } k. \qquad (4)$$

Фильтр Калмана имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}_{k+1} &= \Phi_{k+1,k}\hat{x}_k + K_{k+1}\upsilon_{k+1}; \\ \mathrm{P}_{k+1/k} &= \Phi_{k+1,k}\mathrm{P}_k\Phi_{k+1,k}^T + \mathrm{Q}_k; \\ K_{k+1} &= \mathrm{P}_{k+1/k}\mathrm{H}_{k+1}^T\left[\mathrm{H}_{k+1}\mathrm{P}_{k+1/k}\mathrm{H}_{k+1}^T + \mathrm{R}_{k+1}\right]^{-1}; \\ \mathrm{P}_{k+1} &= \left(I - K_{k+1}\mathrm{H}_{k+1}\right)\mathrm{P}_{k+1/k}, \end{aligned} \qquad (5)$$

где $\mathrm{P}_{k+1/k}$ — априорная ковариационная матрица ошибок оценивания; P_{k+1} — апостериорная ковариационная матрица ошибок оценивания.

В практических приложениях априорная информация о статистических характеристиках входного и измерительного шумов достоверно неизвестна, что может приводить к расходящемуся процессу оценивания [3]. Поэтому для коррекции ИНС от GPS используют адаптивные алгоритмы оценивания [1, 3, 6, 7], являющиеся модификациями фильтра Калмана, которые работают аналогичным образом. Отличие от фильтра Калмана заключается в адаптивном определении ковариационных матриц входного и измерительного шумов.

Адаптивный алгоритм оценивания, способный функционировать в условиях отсутствия достоверной статистической информации о входном шуме, с жёсткой обратной связью по обновляемой последовательности имеет вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}_k &= \Phi_{k,k-1}\hat{x}_{k-1} + K_k\upsilon_k; \\ \upsilon_k &= z_k - \mathrm{H}\Phi_{k,k-1}\hat{x}_{k-1}; \\ \mathrm{P}_{k/k-1} &= \Phi_{k,k-1}\mathrm{P}_{k-1}\Phi_{k,k-1}^T + K_{k-1}\upsilon_k\upsilon_k^T K_{k-1}^T; \\ K_k &= \mathrm{P}_{k/k-1}\mathrm{H}^T\left[\mathrm{H}\mathrm{P}_{k/k-1}\mathrm{H}^T + R\right]^{-1}; \\ \mathrm{P}_k &= \left(I - K_k\mathrm{H}\right)\mathrm{P}_{k/k-1}, \end{aligned} \qquad (6)$$

где $\mathrm{P}_0 = \mathrm{M}\left[x_0 x_0^T\right]$; $R = M[VV^T]$.

Этот адаптивный алгоритм отличается от фильтра Калмана видом уравнения для определения априорной ковариационной матрицы ошибок оценивания.

Адаптивный алгоритм оценивания, способный функционировать в отсутствие априорной информации о статистических характеристиках входного и измерительного шумов, имеет следующий вид:

$$K_{k+1} = \begin{cases} \mathrm{P}_{k+1/k}\mathrm{H}_{k+1}^T\left[\mathrm{M}\left(\upsilon_{k+1}\upsilon_{k+1}^T\right)\right]^{-1} \text{ при} \\ \mathrm{diag}\left[\mathrm{M}\left(\upsilon_{k+1}\upsilon_{k+1}^T\right)\right] > \mathrm{diag}\mathrm{H}_{k+1}\mathrm{P}_{k+1/k}\mathrm{H}_{k+1}^T; \\ \mathrm{P}_{k+1/k}\mathrm{H}_{k+1}^T\left[\mathrm{H}_{k+1}\mathrm{P}_{k+1/k}\mathrm{H}_{k+1}^T\right]^{-1} \text{ при} \\ \mathrm{diag}\left[\mathrm{M}\left(\upsilon_{k+1}\upsilon_{k+1}^T\right)\right] \leqslant \mathrm{diag}\mathrm{H}_{k+1}\mathrm{P}_{k+1/k}\mathrm{H}_{k+1}^T. \end{cases} \quad (7)$$

Вычисление математического ожидания обновляемой последовательности в адаптивном алгоритме проводится в соответствии с формулой:

$$\mathrm{M}\left(\upsilon_k\upsilon_k^T\right) = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}\left(\upsilon_j\upsilon_j^T\right). \quad (8)$$

По результатам моделирования можно сделать вывод о том, что адаптивный фильтр Калмана с минимальной ошибкой проводит фильтрацию и эффективно работает при отсутствии достоверной априорной информации о входном шуме.

Коррекция ИНС при исчезновении сигналов GPS. В условиях смены рабочего созвездия или при возникновении сильных активных и пассивных помех использовать сигналы GPS для коррекции ИНС не представляется возможным. В этом случае прогнозируют исчезнувшие сигналы — для коррекции используют последние значения сигналов GPS, априорные модели погрешностей ИНС и др. [8]. Для получения более высокой точности коррекции ИНС целесообразно использовать прогнозирующие линейные тренды [9].

Линии тренда достаточно часто используются в задачах прогнозирования. С помощью регрессионного анализа можно продолжить линию тренда вперёд или назад, экстраполировать её за пределы, в которых данные уже известны, и показать тенденцию их изменения. Также можно построить линию скользящего среднего, которая сглаживает случайные флуктуации и прослеживает тенденцию изменения данных.

Линейные тренды, типа трендов Демарка, отличаются простотой реализации и позволяют определить тенденцию изменения исследуемого процесса за минимальный интервал времени. Такие тренды можно использовать для прогноза с использованием коротких измерительных выборок.

Классические тренды Демарка определяются двумя точками, которые выбираются приведёнными ниже способами.

Тренд, построенный по экстремальным точкам выборки, выражается в виде:

$$\hat{z}_{0i} = k_{0i}t_i + d_{0i}, \quad (9)$$

где $\hat{z}_0$ — прогнозируемая величина; k_0, d_0 — параметры тренда, являющиеся крутизной и константой тренда соответственно; t_i — момент времени, в который используется данная модель для получения прогнозируемой величины.

Параметры k_0, d_0 получают следующим образом. Измерительная выборка разделяется на две определённые группы в зависимости от её длительности, из каждой группы выбираются точки с максимальными и минимальными значениями. Для получения тренда прямой линией соединяются две точки, имеющие максимальное и минимальное значения, в следующей последовательности: при нисходящей тенденции выборки используется максимальное значение, а при восходящей — минимальное значение. Такие точки для укладки тренда в дальнейшем будем называть опорными точками.

Модель (9) имеет преимущество при изменении выборки с высокой динамикой.

Модифицированный тренд Демарка, построенный на основе осреднённых значений выборки с выбранными опорными точками a_1, b_1, выражается в виде:

$$\hat{z}_{1i}\left(a_1, b_1\right) = k_{1i}t_i + d_{1i}, \quad (10)$$

где $\hat{z}_{1i}$ — прогнозируемая величина; k_1, d_1 — параметры тренда, являющиеся крутизной и константой; a_1, b_1 — координаты опорных точек; i — обозначает момент времени, в который используется данная модель для получения прогнозируемой величины.

Параметры тренда и координаты опорных точек получают следующим образом.

Измерительная выборка делится на две части. Осредняются величины всех точек в каждой части и получаются два средних значения, которые использованы как координаты опорных точек в сочетании с выбранными a_1, b_1. Прямой линией соединяются две опорные точки и получается тренд.

Модель (10) отличается более точной аппроксимацией к ближайшей тенденции выборки.

Классические тренды Демарка имеют невысокую точность, особенно в условиях интенсивного маневрирования ЛА. Поэтому применять классические тренды Демарка в практических приложениях можно лишь только для краткосрочного прогнозирования погрешностей ИНС.

Модификация алгоритма оценивания в условиях аномальных измерений. При восстановлении работоспособности системы GPS появление сигналов часто сопровождается возникновением аномальных выбросов в измерениях. Поэтому при использовании схемы, показанной на рисунке [10], в алгоритме оценивания ошибки резко возрастают. Снижение точности оценивания обусловлено аномальными измерениями, которые существенно превышают по уровню измерения информационной выборки. Для выявления аномальных измерений в алгоритме оценивания обычно используют критерий вида [1]:

$$tr\left(\upsilon_k \upsilon_k^T\right) \leqslant \gamma tr\{\mathrm{H}\mathrm{P}_{k/k-1}\mathrm{H}^T + R\}, \qquad (11)$$

где γ — коэффициент уровня аномальных измерений; tr — обозначение следа матрицы.

Коэффициент уровня аномальных измерений выбирается исходя из соображений того, что случайная величина обновляемого процесса не должна превышать своего утроенного среднеквадратического значения. Обычно коэффициент выбирается из диапазона 7—9 ($\gamma = 9$). В практических приложениях уровнями измерений, которые считаются аномальными, можно варьировать с помощью коэффициента γ.

В работе предлагается при появлении аномального измерения обнулять матрицу усиления алгоритма оценивания, в результате чего предотвращается проникновение аномального измерения в оценку вектора состояния:

$$K_k = \begin{cases} \mathrm{P}_{k/k-1}\mathrm{H}^T\left[\mathrm{H}\mathrm{P}_{k/k-1}\mathrm{H}^T + R\right]^{-1} \text{при} \\ tr\left(\upsilon_k \upsilon_k^T\right) \leqslant \gamma tr\left[\mathrm{H}\mathrm{P}_{k/k-1}\mathrm{H}^T + R\right]; \\ \qquad 0 \qquad\qquad \text{при} \\ tr\left(\upsilon_k \upsilon_k^T\right) > \gamma tr\left[\mathrm{H}\mathrm{P}_{k/k-1}\mathrm{H}^T + R\right]. \end{cases} \qquad (12)$$

Такой релейный выбор матрицы усиления позволяет полностью исключить проникновение аномальных измерений в оценку вектора состояния. Однако при появлении целой последовательности аномальных измерений точность оценивания существенно снижается вследствие того, что при вычислении оценки используются лишь прогнозные значения. Прогноз рассчитывается на основе априорной модели:

$$\hat{x}_{k+1} = \Phi \hat{x}_k. \qquad (13)$$

Точность оценивания можно повысить не исключая аномальные измерения из процесса формирования оценки, а ограничивая аномальные измерения. Когда критерий сигнализирует о появлении аномального измерения, то предлагается использовать вместо обновляемой последовательности её ограниченное значение. Тогда уравнение оценки будет иметь следующий вид:

$$\hat{x}_{k+1} = \Phi \hat{x}_k + K_k\left[\gamma\left(\mathrm{H}\mathrm{P}_{k/k-1}\mathrm{H}^T + R\right)\right]^{1/2}. \qquad (14)$$

В этой формуле для коррекции прогноза на каждом шаге, в котором выявлено аномальное измерение, используется не обновляемая последовательность, а её теоретически предсказанное значение, увеличенное до критического уровня. В формуле (14) априорная ковариационная матрица ошибок оценивания вычисляется прогнозированием на основе последней короткой выборки, включающей значения этой матрицы в условиях устойчивой работы GPS. В таком виде уравнение для оценки вектора состояния предусматривает учёт изменившейся динамики оцениваемого процесса.

Работоспособность и эффективность разработанной модификации алгоритма оценивания погрешностей ИНС проверена с использованием данных лабораторного эксперимента реальных навигационных системам [11]. В этом случае точность оценивания повышается по сравнению с алгоритмом (6), (12), (13).

Выводы. Исследованы особенности коррекции ИНС от GPS в режиме исчезновения, а также восстановления сигналов от спутников. При отсутствии сигналов GPS для коррекции ИНС использованы линейные прогнозирующие тренды. Процесс восстановления сигналов от GPS сопровождается появлением аномальных выбросов в измерительном сигнале алгоритма оценивания. Для предотвращения проникновения аномальных измерений в оценку предложено использовать в алгоритме критерий выявления аномалий и формулу (14) для расчёта оценки погрешностей ИНС, включающую теоретически предсказанное значение обновляемой последовательности. Разработанная модификация алгоритма оценивания позволяет повысить точность навигационных определений ЛА в исследованных режимах функционирования ИНС и GPS.

Библиографические ссылки

1. **Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Цибизова Т.Ю.** Системы управления летательными аппаратами и алгоритмы обработки информации. М.: Изд-во МГОУ, 2006. 260 с.
2. **Буй Ван Кыонг, Неусыпин К.А.** Алгоритмический способ повышения точности навигационных систем // Автоматизация и современные технологии. 2005. № 7. С. 11—14.
3. **Кузовков Н.Т., Карабанов С.В., Салычев О.С.** Непрерывные и дискретные системы управления и методы идентификации. М.: Машиностроение, 1978. 325 с.
4. **Парусников Н.А., Морозов В.М., Борзов В.И.** Задача коррекции в инерциальной навигации: М.: МГУ, 1982. 287с.
5. **Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Власов С.В.** Алгоритмические способы повышения точности автономных навигационных систем // Труды ФГУП "НПЦАП". Системы и приборы управления. 2010. № 3. С. 68—74.
6. **Неусыпин К.А., Шелухина Н.А.** Коррекция навигационной информации посредством нелинейного фильтра Калмана // Автоматизация и современные технологии. 2000. № 4. С. 21—24.
7. **Афанасьев В.Н., Неусыпин К.А.** Навигационный комплекс // Патент России № 2016383. Бюл. № 13.
8. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Кузнецов И.А.** Исследование особенностей спутниковых навигационных систем. В сб. "Теоретические и практические исследования XXI века". Труды междун. науч.-практич. конф. М.: 2014. С. 579—583.
9. **Proletarsky A.V., Neusipin K.A.** Adaptive filtering for navigation systems of robot-aerocraft. Science&military. V. 5. 2010. P. 75—80.
10. **Кэ Фан, Ким Чжэсу, Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Методы коррекции навигационных систем беспилотных летательных аппаратов // Автоматизация и современные технологии. 2013. № 2. С. 30—34.
11. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А.** Оценка точности алгоритмов построения моделей по данным лабораторного эксперимента с навигационными системами // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 6. С. 40—44.

УДК 681.5

М.Г. Зотов, д-р техн. наук, проф.
(Московский институт электроники и математики
национального исследовательского университета "Высшая школа экономики")

zotova35@mail.ru

О ЧАСТОТНЫХ КРИТЕРИЯХ УСТОЙЧИВОСТИ

Рассмотрена задача модификации классических частотных критериев устойчивости и построение на их основе робастных критериев. Приведена сравнительная оценка сложности использования классических и модифицированных критериев.

Ключевые слова: частотные критерии; устойчивость; робастность.

The modification task of the stability classic frequency criteria and robust criteria construction on their basis are considered. The complexity comparative valuation of the classic and modified criteria utilization is adduced.

Keywords: frequency criteria; stability; robustness.

Введение. Рассмотрим использование классических частотных критериев устойчивости.

Критерий Михайлова. Обычно масштаб при построении годографа Михайлова выбирать затруднительно, поэтому один и тот же годограф приходится строить в разных масштабах. Решение об устойчивости принимается с использованием совокупности разномасштабных годографов Михайлова.

Критерий Найквиста. Одним из достоинств критерия Найквиста является то, что его можно использовать в тех практически важных случаях, когда математические модели отдельных звеньев, либо всей разомкнутой системы неизвестны, но их амплитудно-фазовая характеристика может быть получена экспериментально. Однако экспериментальное определение частотных характеристик звеньев с полюсами в правой полуплоскости и на мнимой оси представляет собой трудноразрешимую задачу. Из этого следует, что упомянутые выше возможности могут быть практически использованы только для анализа систем, устойчивых в разомкнутом состоянии. Отметим, что основные сложности в применении критерия Найквиста возникают именно в тех случаях, когда система в разомкнутом состоянии неустойчива или находится на грани устойчивости. Для облегчения подсчёта числа оборотов, которое годограф Найквиста совер-

шает вокруг точки с координатами −1, $j0$, было предложено "правило переходов" [1]. Однако это правило решает проблему лишь частично, не затрагивая случая, когда полюсы разомкнутой системы находятся на мнимой оси. В этом случае годограф Найквиста при некоторых частотах уходит в бесконечность, что существенно затрудняет его использование для решения вопроса об устойчивости замкнутой системы.

Постановка задачи. Необходимо модифицировать классические частотные критерии для устранения трудностей их практического использования и создать на базе модифицированных критериев их робастные аналоги.

Решение задачи. *Модифицированный критерий Михайлова.* Введём в рассмотрение функцию

$$\Pi_{\text{м}}(s) = T(s)/D(s), \qquad (1)$$

где $T(s)$ — характеристический полином замкнутой системы; $D(s)$ — полином той же степени, что и $T(s)$, с корнями, расположенными в левой полуплоскости комплексного переменного.

Используя принцип аргумента [2], сформулируем модифицированный критерий: *если годограф* $\Pi_{\text{м}}(j\omega)$, $(\omega = 0 - \infty)$ *в плоскости комплексного переменного не охватывает начала координат, то все корни полинома* $T(s)$ *лежат в левой полуплоскости.*

Чтобы придать годографу свойство большей компактности, полином $D(s)$ выберем в виде $(d_m^{1/m}s^m + d_0^{1/m})^m$, где d_m и d_0 соответственно старший и младший коэффициенты полинома $T(s)$. Годограф начинается и заканчивается в точке −1, $j0$.

Ниже на примерах демонстрируется преимущество модифицированного критерия по сравнению с классическим аналогом.

Модифицированный критерий Найквиста. Введём в рассмотрение функцию

$$\Pi_{\text{Н}}(s) = \frac{T(s) - D(s)}{D(s)}. \qquad (2)$$

Используя принцип аргумента [2], сформулируем модифицированный критерий: *если годограф* $\Pi_{\text{н}}(j\omega)$, $(\omega = 0 - \infty)$ *в плоскости комплексного переменного не охватывает точки с координатами* −1, $j0$, *то все корни полинома* $T(s)$ *находятся в левой полуплоскости.* Чтобы придать годографу свойство большей компактности, полином $D(s)$ выберем в виде $(d_m^{1/m}s^m + d_0^{1/m})^m$, где d_m и d_0 соответственно старший и младший коэффициенты полинома $T(s)$. Годограф начинается и заканчивается в начале координат плоскости комплексного переменного. Как видно из соотношений (1) и (2), модифицированные годографы Михайлова и Найквиста отличаются между собой сдвигом по действительной оси на единицу.

Ниже на примерах продемонстрировано преимущество модифицированных критериев по сравнению с их классическими аналогами. Кроме того, в работе [3] с использованием соотношения (2) построен алгоритм поиска параметров робастного регулятора для многорежимного объекта управления. В частности был рассмотрен пример объекта с четырьмя режимами. Отметим, что в работе [3] не рассматривался вопрос сравнительной оценки классических критериев с модифицированными аналогами. Этот вопрос рассмотрен ниже.

Робастный критерий устойчивости 1. Передаточная функция объекта при номинальном значении параметров $W_{0\text{н}}(s)$ имеет вид

$$W_{0\text{н}}(s) = Q_{0\text{н}}(s)/P_{0\text{н}}(s) = Q_{0\text{н}}(s)\big/P_{0\text{н}}^{+}(s)\,P_{0\text{н}}^{-}(s).$$

Корни полиномов $P_{0\text{н}}^{+}(s)$ и $P_{0\text{н}}^{-}(s)$ лежат в левой и правой полуплоскости соответственно. Передаточная функция реального объекта $W_0(s)$ задаётся тем же соотношением:

$$W_0(s) = Q_0(s)/P_0(s) = Q_0(s)\big/P_0^{+}(s)\,P_0^{-}(s).$$

Между передаточными функциями выполняются зависимости:

$$\deg P_0(s) = \deg P_{0\text{н}}(s),\ \deg P_0^{-}(s) = \deg P_{0\text{н}}^{-}(s). \qquad (3)$$

Если регулятор с передаточной функцией $W_1(s) = V_1(s)/G_1(s)$ стабилизирует объект с передаточной функцией $W_{0\text{н}}(s)$, тогда система с объектом $W_0(s)$, когда амплитудно-фазовая характеристика удовлетворяет соотношению

$$\operatorname{Re}(W_{0\text{н}}^{-1}(j\omega)W_0(j\omega) - 1)\tilde{H}_{\text{н}}(j\omega) > -1;$$
$$\tilde{H}_{\text{н}}(j\omega) = \frac{W_1(j\omega)W_{0\text{н}}(j\omega)}{1 + W_1(j\omega)W_{0\text{н}}(j\omega)}, \qquad (4)$$

или

$$\left|(W_{0\text{н}}^{-1}(j\omega)W_0(j\omega) - 1)\tilde{H}_{\text{н}}(j\omega)\right| < 1, \qquad (5)$$

и с тем же регулятором $W_1(s)$, также будет обладать свойством устойчивости. Соотношения (4) и (5) указаны в работе [4], но ниже приведён их достаточно простой вывод.

Из характеристических полиномов систем с объектами $W_0(s) = Q_0(s)/P_0(s)$ и $W_{0\text{н}}(s) = Q_{0\text{н}}(s)/P_{0\text{н}}(s)$ и регулятором $W_1(s) = V_1(s)/G_1(s)$ образуем дробно-рациональную функцию

$$\Pi(s) = \frac{T_0(s)}{T_{0\text{н}}(s)} = \frac{P_0(s)G_1(s) + Q_0(s)V_1(s)}{P_{0\text{н}}(s)G_1(s) + Q_{0\text{н}}(s)V_1(s)}.$$

Преобразуем функцию П(s)

$$\Phi(s) = \frac{T_0(s)}{T_{0н}(s)}\frac{P_{0н}(s)}{P_0(s)} - 1 =$$
$$= (W_{0н}^{-1}(s)W_0(s) - 1)\tilde{H}_н(s) = \qquad (6)$$
$$= (W_0(s) - W_{0н}(s))\frac{W_1(s)}{1 + W_1(s)W_{0н}(s)}.$$

Согласно принципу аргумента, если выполняется соотношение (3), то полиномы $T_{0н}(s)$ и $T_0(s)$ имеют корни только в левой полуплоскости, а годограф $\Phi(j\omega)$, ($\omega = 0 - \infty$) точку -1, $j0$ в плоскости комплексного переменного не охватывает. Из соотношений (6) видна важная особенность критерия, в который входит разность передаточных функций $W_0(s)$ и $W_{0н}(s)$. Эта особенность позволяет использовать критерий для конструирования систем управления многорежимным объектом. Пример конструирования для двухрежимного объекта приведён в работе [4].

Робастный критерий устойчивости 2. Из характеристических полиномов $T_{0н}(s)$ и $T_0(s)$ найдём полином отклонения $\delta(s) = T_0(s) - T_{0н}(s)$. Составим дробно-рациональную функцию

$$\Pi(s) = \frac{\delta(s)}{T_{0н}(s)}.$$

Примем, что П(s) — передаточная функция системы в разомкнутом состоянии. Замкнём её отрицательной обратной связью. Согласно критерию Найквиста замкнутая система устойчива, т. е. корни полинома $T_{0н}(s) + \delta(s)$ будут находиться только в левой полуплоскости, если годограф $\Pi(j\omega)$, ($\omega = 0 - \infty$) не охватывает в плоскости комплексного переменного точки с координатами -1, $j0$. Достаточным условием этого может быть выполнение одного из соотношений:

$$\mathrm{Re}(\delta(j\omega)/T_{0н}(j\omega)) > -1 \qquad (7)$$

или

$$|\delta(j\omega)/T_{0н}(j\omega)| < 1. \qquad (8)$$

Критерий робастной устойчивости может быть сформулирован так: если отклонение $\delta(j\omega)$ от номинального значения $T_{0н}(j\omega)$ укладывается в соотношения (7) или (8), то корни полиномов $T_{0н}(s) + \delta(s)$ лежат в левой полуплоскости.

Из $|T_{0н}(-j\omega)/T_{0н}(j\omega)| = 1$, где $\delta(j\omega) = T_{0н}(-j\omega)$ можно найти границы, в которых может лежать отклонение $\delta(j\omega)$. На границе, т. е. при выполнении соотношения $|\delta(j\omega)/T_{0н}(j\omega)| = 1$, все корни полиномов $T_{0н}(j\omega) - T_{0н}(-j\omega)$ и $T_{0н}(j\omega) + T_{0н}(-j\omega)$ должны быть мнимыми. Пример 3 поясняет сказанное.

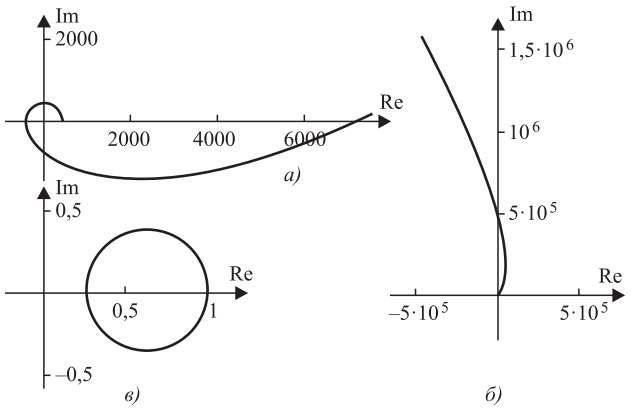


Рис. 1. Амплитудно-фазовые годографы:
а, *б* — разномасштабный годограф Михайлова; *в* — модифицированный годограф Михайлова

Пример 1. С использованием классического критерия Михайлова определим является ли полином

$$T(s) = s^6 + 14s^5 + 80{,}25s^4 + 251{,}25s^3 + \\ + 502{,}72s^2 + 667{,}25s + 433{,}5$$

устойчивым. На рис. 1, *а*, *б* в разных масштабах приведены годографы Михайлова, из которых следует, что все корни полинома из левой полуплоскости. Для решения этого вопроса требовалось (см. рис. 1, *а*) убедиться, что годограф начинается на положительной полуоси и проходит четыре квадранта, нигде не обращаясь в нуль, а по рис.1, *б* — что он проходит пятый квадрант и уходит в бесконечность в шестом квадранте. Заметим, что на одном рисунке годограф расположить невозможно.

Приведём решение задачи с использованием модифицированного критерия.

На рис. 1, *в* приведён годограф функции

$$\Pi_M(j\omega) = \\ = \frac{[(j\omega)^6 + 14(j\omega)^5 + 80{,}25(j\omega)^4 + 251{,}25(j\omega)^3 + \\ +502{,}72(j\omega)^2 + 667{,}25(j\omega) + 433{,}5]}{(j\omega + 433{,}5^{1/6})^6},$$

который отличается от годографа Михайлова компактностью. Начинается и заканчивается он в точке -1, $j0$ и начало координат не охватывает. Из этого следует, что корни полинома $T(s)$ из левой полуплоскости.

Пример 2. Объект управления задан передаточной функцией

$$W_0(s) = \frac{Q_0(s)}{P_0(s)} = \frac{s^2 + 4}{s(s^2 + 1)}.$$

Нули и полюсы расположены на мнимой оси. Используя классический критерий Найквиста, определим, обеспечивает ли включённое в обратную связь устройство стабилиза-

ции устойчивость системы с таким объектом. Передаточная функция стабилизатора

$$W_1(s) = \frac{V_1(s)}{G_1(s)} = \frac{1,6152(s^2 + 0,4849s + 0,6176)}{s^2 + 1,4344s + 4,8771}.$$

Полюсов, лежащих в правой полуплоскости, у разомкнутой системы нет, но есть лежащие на мнимой оси. Согласно классическому критерию Найквиста, замкнутая система устойчива, если годограф

$$\Phi(j\omega) = \frac{Q_0(j\omega)V_1(j\omega)}{P_0(j\omega)G_1(j\omega)}, \quad (\omega = 0 - \infty)$$

не охватывает в плоскости комплексного переменного точки с координатами -1, $j0$. На рис. 2, *а* такой годограф приведён, но принимать по нему решение о взаимодействии годографа с точкой -1, $j0$ задача не из простых.

Рассмотрим решение этой задачи с использованием модифицированного критерия. На рис.2, *б* при $D(s) = (s + 4^{1/5})^5$ приведён график функции

$$\Pi_{\text{Н}}(j\omega) = \frac{T(j\omega) - D(j\omega)}{D(j\omega)} =$$

$$= \frac{Q_0(j\omega)V_1(j\omega) + P_0(j\omega)G_1(j\omega) - D(j\omega)}{D(j\omega)},$$

$$(\omega = 0 - \infty).$$

Согласно модифицированному критерию, если годограф $\Pi_{\text{н}}(j\omega)$, $(\omega = 0 - \infty)$ точки -1, $j0$ не охватывает, то все корни полинома $T(s)$ из левой полуплоскости. Взаимодействие годографа с точкой -1, $j0$ очевидно: годограф точку не охватывает. Таким образом, система устойчива и действительно

$$T(s) = Q_0(s)V_1(s) + P_0(s)G_1(s) =$$
$$= (s^2 + 1,5265s + 1,7402) \times$$
$$\times (s^2 + 0,4393s + 2,1131)(s + 1,0878).$$

Пример 3. Характеристический полином системы при номинальных значениях параметров имеет вид

$$T_{0\text{н}}(s) = (s + 1)(s + 2)(s + 3)(s + 4)(s + 5)(s + 6) =$$
$$= s^6 + 21s^5 + 175s^4 + 735s^3 +$$
$$+ 1624s^2 + 1764s + 720.$$

Границы, в которых лежит отклонение $\delta(j\omega)$, определяются соотношениями:

$$T_{0\text{н}}(s) - T_{0\text{н}}(-s) = 45s^5 + 1470s^3 + 3528s =$$
$$= (s - 1,6099j)(s + 1,6099j) \times$$
$$\times (s - 5,6928j)(s + 5,6928j)s;$$

$$T_{0\text{н}}(s) + T_{0\text{н}}(-s) =$$
$$= 2s^6 + 350s^4 + 3248s^2 + 1440 =$$
$$= (s - 0,6832j)(s + 0,6832j)(s - 3,0557j) \times$$
$$\times (s + 3,0557j)(s - 12,8528j)(s + 12,8528j).$$

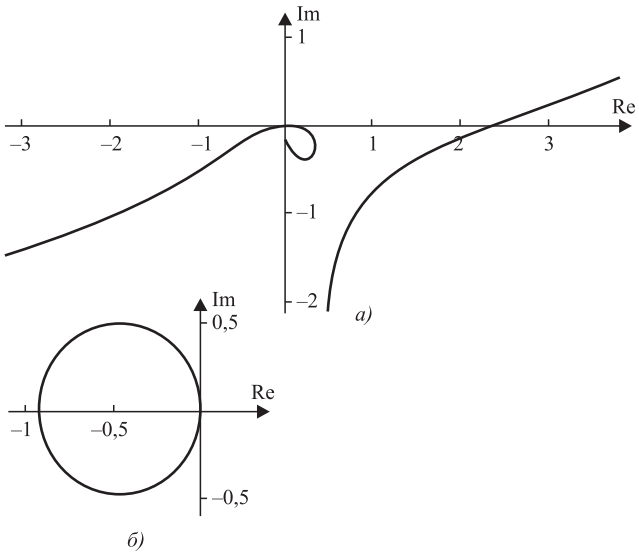


Рис. 2. Амплитудно-фазовые годографы:
а — годограф Найквиста; *б* — модифицированный годограф Найквиста

Заключение. Таким образом, приведена сравнительная оценка модифицированных критериев с их классическими аналогами. Показано, что

годограф модифицированного критерия от классического годографа Михайлова отличается большей наглядностью и компактностью;

классический критерий Найквиста имеет смысл использовать только для систем, устойчивых в разомкнутом состоянии. Только для таких систем практически можно снять экспериментальные характеристики;

для неустойчивых или находящихся на грани устойчивости в разомкнутом состоянии систем лучше использовать модифицированный критерий. Годограф модифицированного критерия отличается компактностью и простотой использования.

На базе модифицированных частотных критериев сформулированы простые робастные критерии, предназначенные для оценки свойств робастной устойчивости.

Библиографические ссылки

1. **Цыпкин Я.З.** Основы теории автоматических систем. М.: Наука, 1977. 559 с.

2. **Теория** автоматического управления Ч. 1 / Под ред. А.А. Воронова М.: Высш. шк., 1977. 303 с.

3. **Зотов М.Г.** О конструировании робастных по критерию качества систем управления // Изв. РАН. Теория и системы управления. 2012. № 4. С. 3—13.

4. **Зотов М.Г.** Об одном подходе к конструированию робастных систем // Автоматика и Телемеханика. 2010. № 11. С. 149—158.

УДК 65.011.56

В.Н. Дякин, канд. экон. наук
(Тамбовский государственный технический университет)
vadim_tmb@mail.ru

ПРОЕКТИРОВАНИЕ МОДУЛЯ АСУП ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЦЕЛЕЙ И ТИПА ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРЕДПРИЯТИЯ

Предложен проект модуля автоматизированной системы управления инновационным развитием промышленного предприятия, позволяющий установить цели и сформировать реализующий их план. В основе плана лежат оценки текущего состояния предприятия, а также требования и условия внешней среды. Также оценивается необходимый инновационный потенциал и общие сроки реализации плана развития. Само предприятие при этом представляется как динамическая система из взаимосвязанных производственных процессов, требующих регулярного обновления.

Ключевые слова: автоматизация предприятия; цели развития; инновационный потенциал.

A module draft of automatic control system for industrial enterprises innovative development, allowing to set aims and to create a plan that implements them is proposed. The plan is based on the enterprise current state valuation, as well as on the requirements and environmental conditions. Necessary innovative potential and general development time-frame are estimated too. The enterprise is represented as a dynamic system of interconnected manufacturing processes that require regular renovation.

Keywords: industrial automation; development aims; innovation potential.

Введение и описание комплекса задач. Современные условия глобализации, ускорения сроков появления и ввода в производство инноваций требуют от предприятий регулярного и максимально быстрого улучшения или смены существующих технологических процессов, создания новых производств для соответствия текущим и ожидаемым условиям рынков сбыта. Решить проблему управления инновационным развитием предприятия возможно лишь с применением специализированных модулей автоматизированных систем, что отмечается в [1]. АСУП, позволяющую управлять функционированием промышленного предприятия в условиях реализации планов инновационного развития, назовём автоматизированной системой управления инновационным развитием предприятия (АСУИРП). Внедрение системы должно позволить автоматизировать весь комплекс процессов, связанных с вводом в производство инноваций, включающий в себя:

оценку текущих и прогнозных требований внешней среды к продукции предприятия;

оценку условий пополнения производственных ресурсов;

прогнозирование результатов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ (НИОКР);

оценку текущего состояния производственных процессов и НИОКР самого предприятия;

определение целей развития, состава и типов инноваций [2], позволяющих достичь поставленных целей, формирование плана инновационного развития, включая сроки и необходимый инновационный потенциал;

оптимальное управление функционированием предприятия при реализации планов инновационного развития на основе моделей [3, 4];

учёт влияния неопределённости на планы инновационного развития и гарантирование их выполнения при действии возмущений в пределах установленных интервалов их изменения по модели [5];

актуализацию и перерасчёт планов развития по мере их выполнения.

В итоге с помощью АСУИРП обеспечивается бизнес-планирование и управление реализацией портфеля инновационных инвестиционных проектов предприятия. Необходимость интеграции инноваций, инвестиций и производственных процессов в единую систему отмечается, в частности, в [6]. В данной статье описывается проект модуля определения целей и типа инновационного развития АСУИРП. Модуль применяют после того, как определено

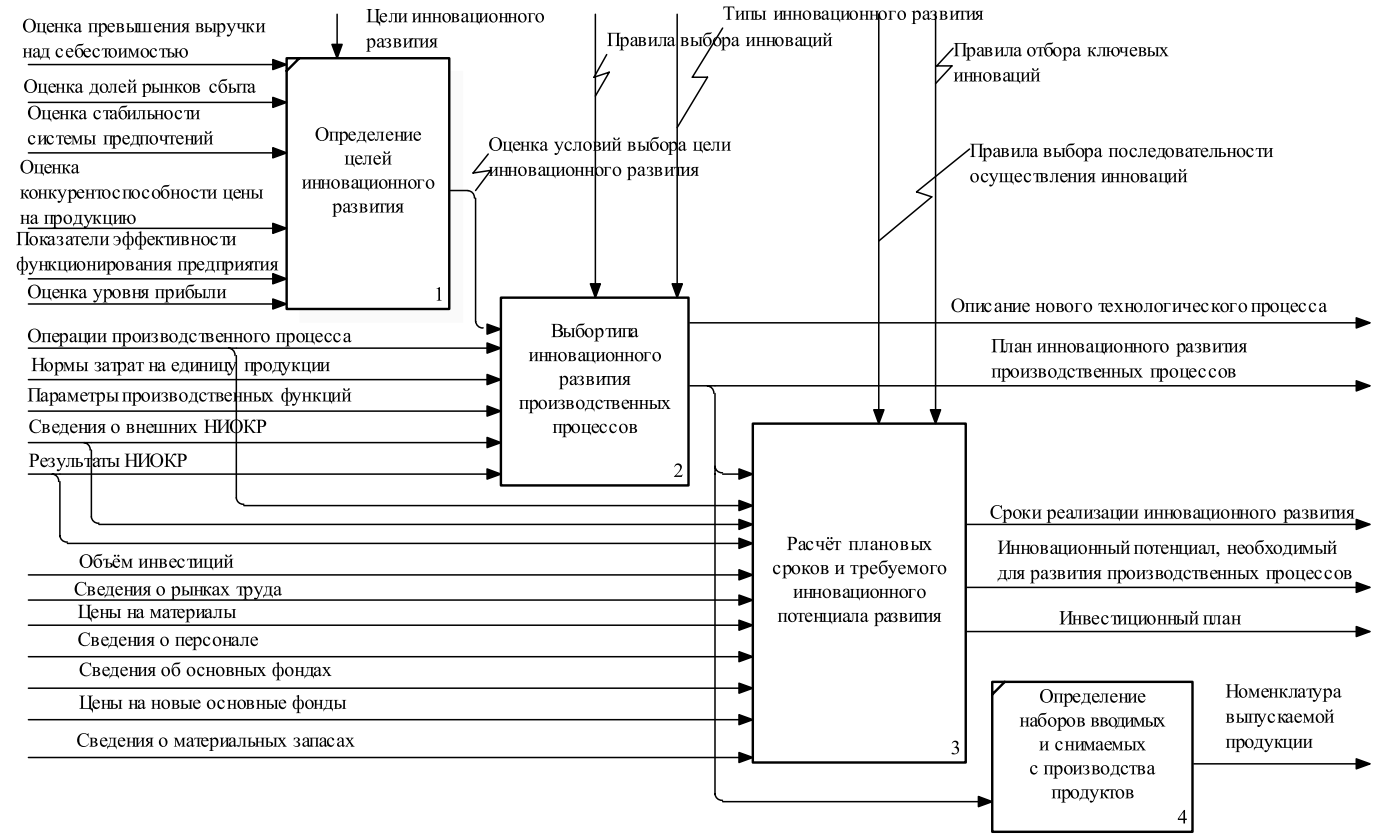


Рис. 1. Декомпозиция процесса определения целей и типа инновационного развития предприятия

состояние внешней и внутренней среды предприятия и осуществляется процесс управления его функционированием. В модуле происходит определение возможных в текущей ситуации целей развития предприятия, формируется план инновационного развития и определяется необходимый для его осуществления потенциал. Функциональная диаграмма данных процессов изображена на рис. 1. Выполнение процессов осуществляется в последовательности, соответствующей нумерации блоков.

По методике, предложенной в [2], определяют цели и выбирают тип инновационного развития на основании оценок параметров внешней и внутренней среды предприятия. Ключевым моментом является подпроцесс выбора типа инновационного развития производственных процессов. В зависимости от выполнения или невыполнения тех или иных условий по каждому продукту принимается решение относительно типа инновационного развития производственных процессов либо о прекращении его производства. Выбор типа инновационного развития осуществляется на основании процессов, представленных на рис. 2.

Результаты сопоставления условий выбора типа инновационного развития и текущего состояния научно-производственных показателей предприятия формируют план инновационного развития его производственных процессов.

Информационная модель и диаграммы потоков данных модуля. Описание основных таблиц модели данных модуля АСУИРП для определения целей и типа инновационного развития предприятия представлено на рис. 3. Следует отметить, что схема на рис. 3 показана в сокращённой форме без описания справочников условно-постоянной информации и соответствующих им связей с показанными сущностями. Это объясняется громоздкостью общей информационной модели сущность-связь для АСУИРП, состоящей из 72 таблиц. Подробное их описание выходит за рамки данной статьи. Сокращение "ИД" в ключевых полях таблиц (см. рис. 3) обозначает идентификатор, который может представлять собой обычный счётчик записей либо являться классификатором. Обозначение "FK" соответствует внешнему ключу таблицы (Foreign Key).

В процессе определения целей происходит сопоставление текущих и прогнозных оценок внешней и внутренней среды предприятия из сущностей "Данные по рынкам сбыта" и "Ре-

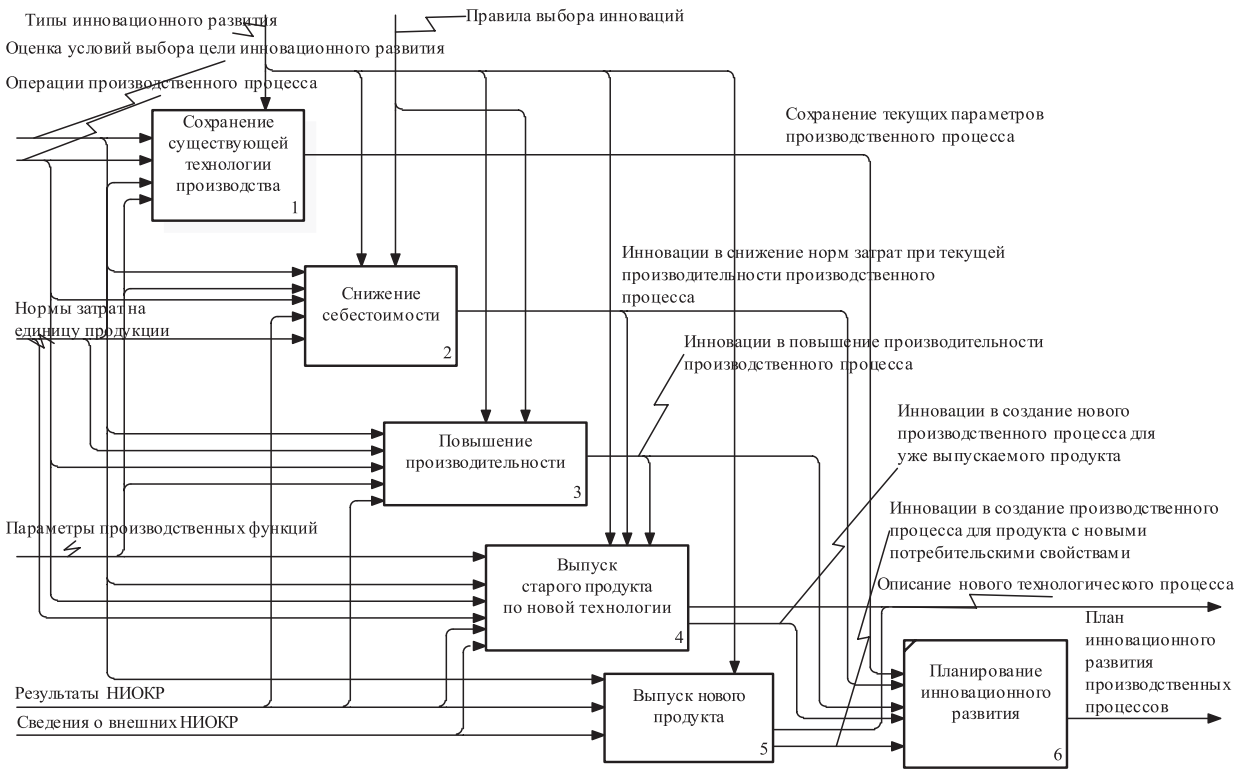


Рис. 2. Подпроцесс выбора типа инновационного развития производственных процессов

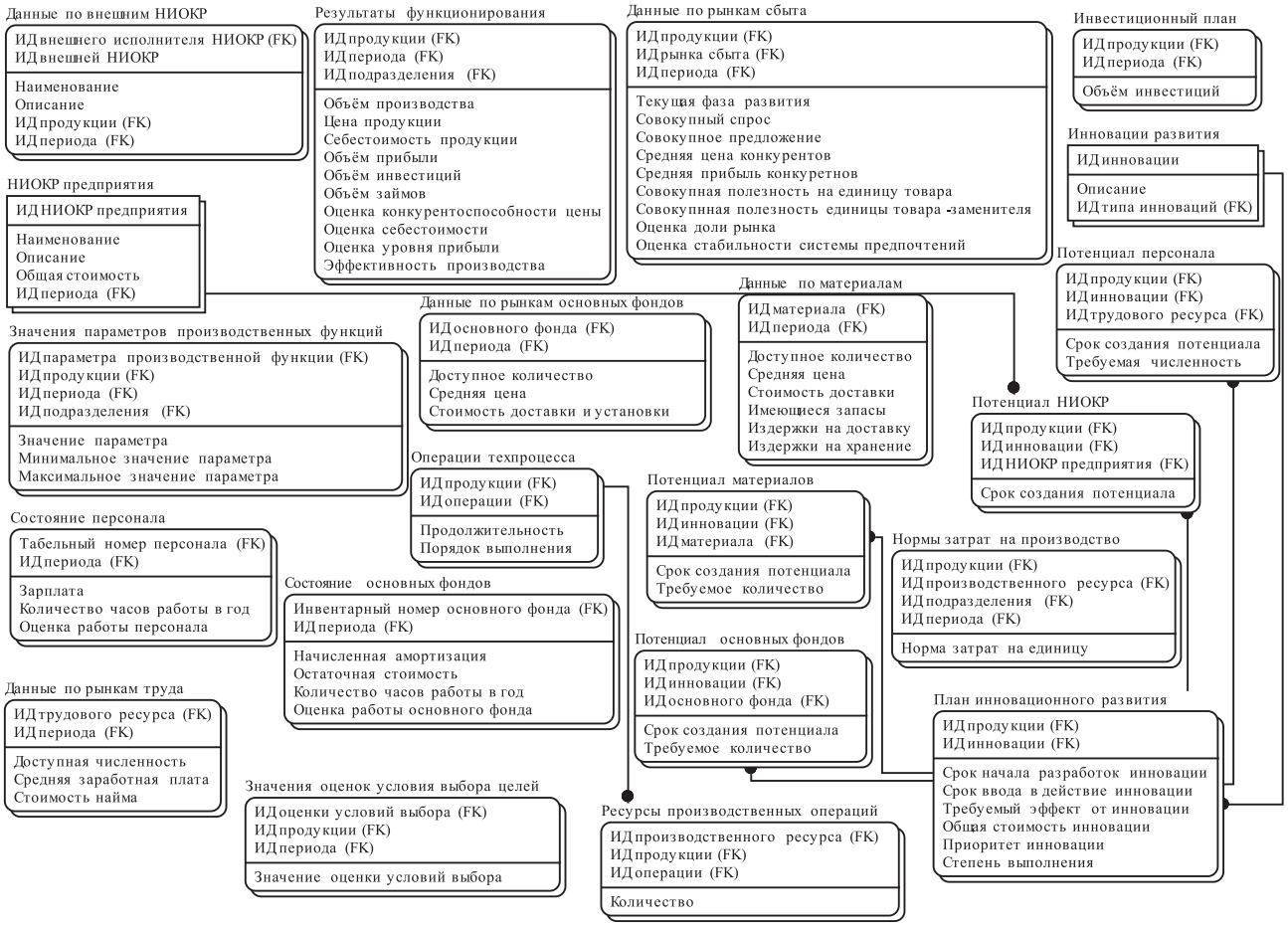


Рис. 3. Логическое представление информационной модели процесса определения целей и типа инновационного развития предприятия

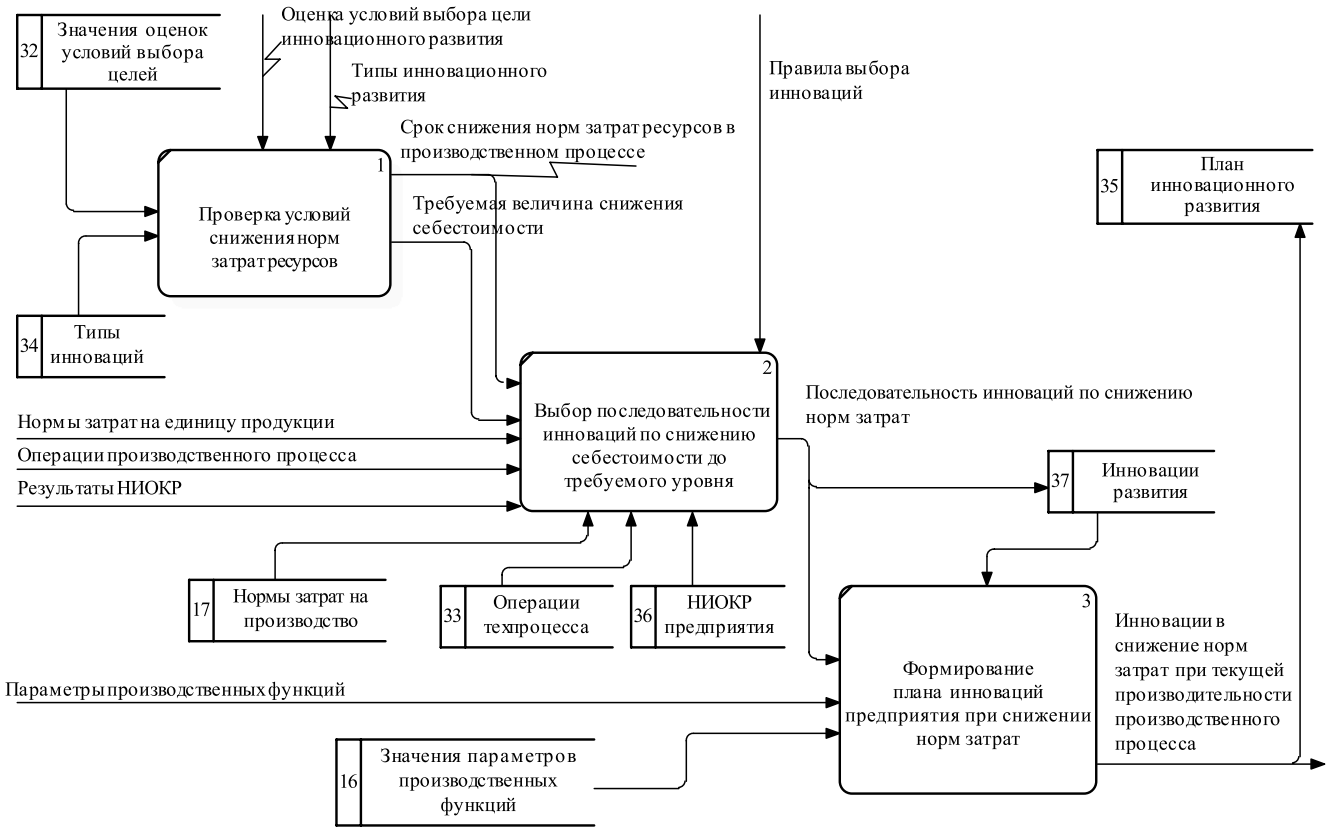


Рис. 4. Диаграмма потоков данных модуля инноваций по снижению себестоимости

зультаты функционирования" с возможными целями и типами инновационного развития. Результаты оценок сохраняются в сущности "Значения оценок условия выбора целей". В случае соответствия имеющегося набора оценок конкретному типу происходит переход к процессу выбора для формирования плана инновационного развития.

При выборе типа инновационного развития формируется последовательность инноваций, позволяющих при существующей оценке условий функционирования предприятия достичь целей его развития. При этом в сущностях "Типы инноваций" и "Инновации развития" хранится условно постоянная информация о возможных вариантах инновационного развития, а в сущности "План инновационного развития" отражается календарный план, стоимость и требуемый эффект от инноваций развития технологических процессов конкретного производства.

На рис. 4—5 изображены диаграммы потоков данных модулей, формирующих план инновационного развития в зависимости от подходящего для конкретного продукта типа развития. Нумерация блоков сущностей на данных рисунках соответствует общему перечню таблиц базы данных, а нумерация блоков подмодулей соответствует последовательности их работы.

Рисунок 4 показывает работу модулей системы при формировании плана инноваций для достижения требуемого снижения себестоимости выпускаемой продукции, например, электроэнергии. В том случае, если потребуется повысить выпуск продукции при тех же нормах затрат ресурсов, в схеме рис. 4 при выборе последовательности инноваций в блоке 2 будут оцениваться и улучшаться не нормы затрат, а параметры производственной функции (на рис. 4 они входят в блок 3).

При существенном изменении технологии производства продукции для придания ей новых свойств либо при выпуске новой продукции необходимо комплексное изменение состава и значений норм затрат на производство и параметров производственных функций, что показано на рис. 5.

В том случае, если инновационное развитие предполагает создание нового технологического процесса (для существующей или новой продукции), в сущности "Операции техпроцесса" и "Ресурсы производственных операций" происходит описание его операций.

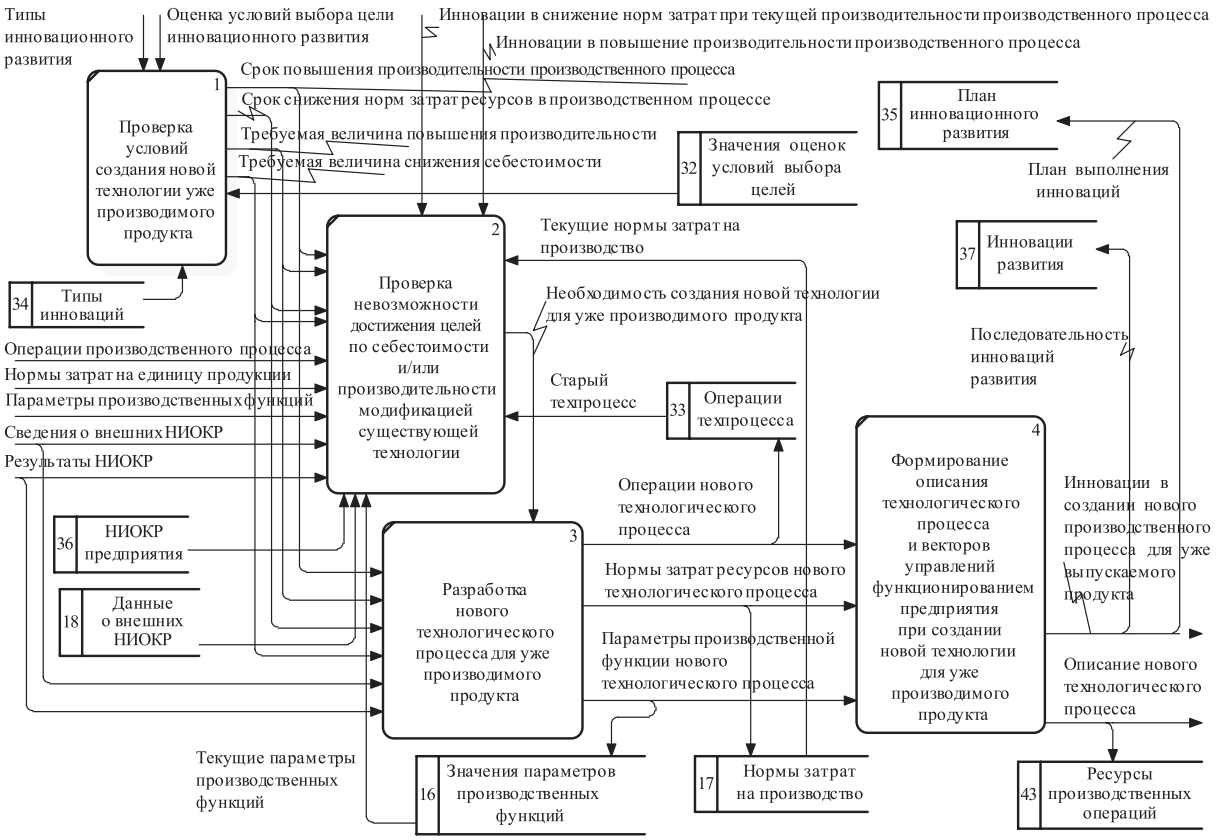


Рис. 5. Диаграмма потоков данных модуля инноваций в выпуск старого продукта по новой технологии

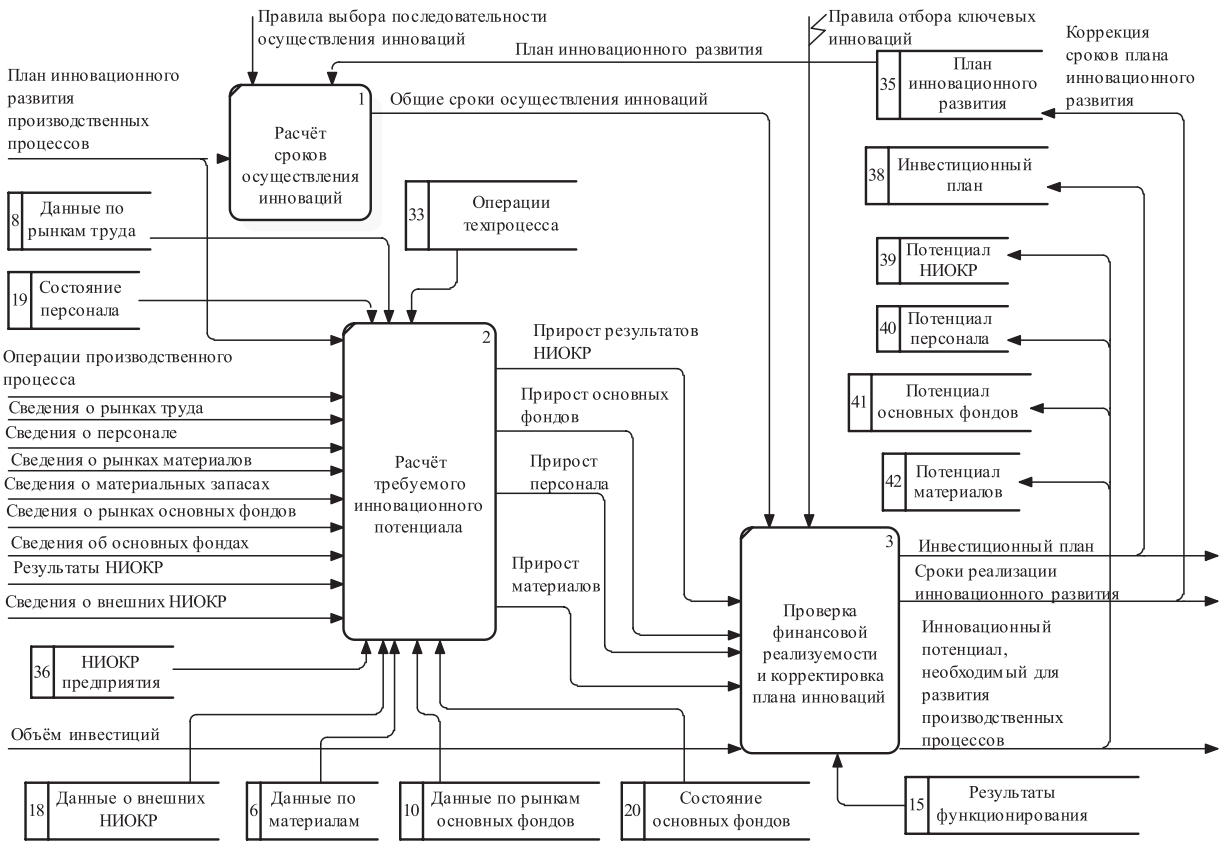


Рис. 6. Диаграмма потоков данных модуля расчёта плановых сроков и требуемого инновационного потенциала развития

Также происходят изменения или добавления данных в сущности "Параметры производственных функций" и "Нормы затрат на производство" в зависимости от типа и величины инноваций по соответствующей продукции.

В подпроцессе расчёта плановых сроков и требуемого инновационного потенциала развития происходит расчёт приростов в инновационном потенциале и необходимых для их осуществления сроков в зависимости от имеющихся результатов НИОКР, материальных, людских ресурсов и оборудования. Результаты расчётов потенциала сохраняются в сущностях "Потенциал НИОКР", "Потенциал материалов", "Потенциал персонала" и "Потенциал основных фондов". Денежное выражение требуемого прироста инновационного потенциала находит своё отражение в требуемых для развития инвестициях в сущности "Инвестиционный план".

Диаграмма потоков данных модуля расчёта плановых сроков и требуемого инновационного потенциала развития изображена на рис. 6.

Описание пользовательского интерфейса модуля. Меню "Управление развитием" реализует вызов форм выбора целей, планирования инновационного развития, определения инвестиционного и инновационного потенциала для его осуществления, а также расчёт модели поиска интервально-гарантированных оптимальных управлений инновационным развитием. Меню имеет следующую структуру:

1. Оценка выбора целей.
2. Планирование инновационного развития.
3. Инвестиционный план.
4. Инновационный потенциал материалов.
5. Инновационный потенциал персонала.
6. Инновационный потенциал основных фондов.
7. Инновационный потенциал НИОКР предприятия.
8. Управление рисками:
8.1. Входные величины.
8.2. Выходные величины.
8.3. Управления.
8.4. Возмущения.
8.5. Правые части ограничений.
8.6. Расчёт модели развития.

Диалоговая форма для расчёта оценок условий выбора целей инновационного развития показана на рис. 7.

Схема класса формы "ОценкаУсловийВыбораЦелейForm" изображена на рис. 8.

Как видно из рис. 8, методы класса являются ответной реакцией на нажатие соответствующих кнопок формы из рис. 7. Кроме того, обрабатываются события начальной загрузки формы (Load) и нажатия кнопки мыши на ячейке таблицы в элементе управления "DataGridView" (CellClick). Расчёт оценки условий можно выполнить по предложенному алгоритму, нажав одноименную кнопку, либо указать в соответствующем поле напрямую.

Рис. 7. Диалоговая форма класса "ОценкаУсловийВыбораЦелейForm"

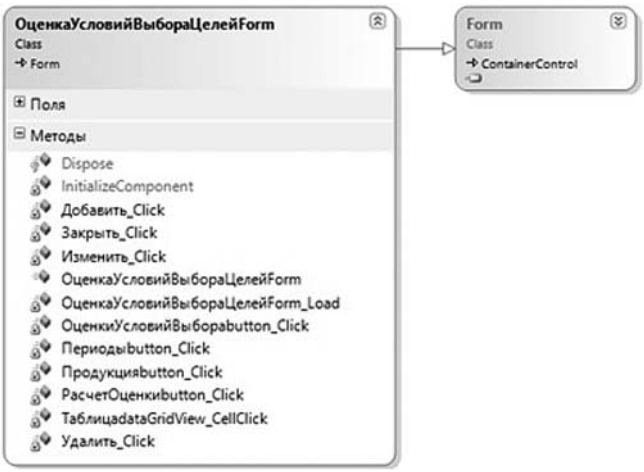


Рис. 8. Схема класса "ОценкаУсловийВыбораЦелейForm"

Схожую структуру имеют остальные классы-формы модуля:

Планирование инновационного развития.

Инвестиционный план.

Инновационный потенциал материалов.

Инновационный потенциал персонала.

Инновационный потенциал основных фондов.

Инновационный потенциал НИОКР.

В форме "Планирование инновационного развития" имеется кнопка "Определить инновацию", предназначенная для запуска алгоритмов автоматического определения набора инноваций, соответствующих оценкам внешней и внутренней среды предприятия в указанный горизонт планирования в соответствии с [2].

После работы этих алгоритмов имеется возможность коррекции плана инновационного развития по величине требуемого эффекта или срокам, а также указания приоритета выполнения каждой из них. По ходу реализации плана инновационного развития здесь же фиксируется степень выполнения инноваций.

Заключение. Представленный проект модуля АСУП позволяет автоматизировать процессы установки целей инновационного развития в соответствии с текущим состоянием предприятия и внешней среды, формированием плана развития, обеспечивающего достижение поставленных целей улучшением или сменой существующих производственных процессов и определения сроков и необходимого для этого потенциала производственных ресурсов и НИОКР.

Библиографические ссылки

1. **Дякин В.Н.** Современные проблемы управления устойчивым инновационным развитием промышленных предприятий // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. 2013. Т. 48. № 4. С. 59—63.

2. **Дякин В.Н.** Моделирование смены технологических процессов промышленного предприятия с целью инновационного развития в среднесрочном периоде // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 55. № 1.1. С. 141—146.

3. **Дякин В.Н.** Динамическая модель управления развитием промышленного предприятия // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2013. Т. 19. № 2. С. 304—308.

4. **Дякин В.Н.** Детерминированные постановки задач управления наукоемким промышленным предприятием в среднесрочном периоде // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2014. Т. 20. № 1. С. 59—65.

5. **Дякин В.Н.** Двухмодельная постановка задачи интервально-гарантированного оптимального управления промышленным предприятием // Системы управления и информационные технологии. 2015. Т. 59. № 1. С. 29—34.

6. **Матвейкин В.Г., Татаренко С.И., Дмитриевский Б.С., Панченко И.С.** Построение системы показателей для оценки эффективности наукоемкой производственной системы // Вестник Тамбовского государственного технического университета. 2009. Т. 15. № 2. С. 278—284.

УДК 621.744.37

С.А. Микаева, д-р техн. наук, проф., **А.С. Микаева,** канд. экон. наук, доц.
(Московский государственный университет приборостроения и информатики),
О.Е. Железникова, канд., техн. наук, доц., **И.А. Баринова,** канд., техн. наук
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, г. Саранск)

mikaeva@npo.lit.ru

ОБЛУЧАТЕЛИ МЕДИЦИНСКИЕ БАКТЕРИЦИДНЫЕ

Рассмотрены облучатели медицинские бактерицидные мобильные, настенные и стационарные Светолит-50, 100, 100Н, 300, 400, 600. Представлены их основные параметры, технические характеристики, общий вид и габаритные размеры. Дан расчёт дозы облучения или количество энергии, сообщаемое микроорганизмам, являющейся главной характеристикой установки УФ-обеззараживания.

Ключевые слова: облучатель; ультрафиолетовое излучение; доза; время; параметры; технические характеристики; вид; габаритные размеры.

Medical bactericidal mobile, wall and stationary irradiators Svetolit-50, 100, 100H, 300, 400, 600 are considered. Their main parameters, technical specifications, general appearance and overall dimensions, running time are represented. The calculation of the radiation dose or the amount of energy imparted to the microorganism which was the main characteristic of the facility UV — disinfection are given. It is the product of the average intensity of UV-radiation on the mean stay time under irradiation

Keywords: exciter; UV-radiation; dose; time; parameters; technical specifications; type; overall dimensions.

Облучатели медицинские бактерицидные мобильные, настенные и стационарные "Светолит" предназначены для обеззараживания воздуха и поверхностей помещений с повышенным риском распространения возбудителей инфекций: в общественных организаци-

Таблица 1

Основные параметры облучателей "Светолит"

Параметры	Светолит-50	Светолит-100	Светолит-100Н	Светолит-300	Светолит-400	Светолит-600
Габаритные размеры, мм, не более:						
высота	363	550	90	1325		
ширина	190	190	245	460		
длина	270	270	970	460		
Масса, кг, не более	3,3	4,5	4,7	24,5	26,0	28,0
Потребляемая мощность, Вт, не более	170	300	300	1000	1200	2000
Производительность, $м^3$/ч, не менее	400	700	700	2400	2800	4800
Бактерицидный поток, Вт	50	100	100	300	400	600
УФ-облучённость на расстоянии 1м от облучателя, Вт/$м^2$, не менее	4,0	7,0	7,0	18,0	21,3	35,5
Тип ламп	АНЦ 170/70-П3-3 VOSUV	АНЦ 300/144-П3-3 VOSUV	АНЦ 300/144-П2 2А VOSUV	АНЦ 500/144-П3-28 VOSUV	АНЦ 300/144-П3 VOSUV	АНЦ 500/144-П3-28 VOSUV
Число ламп	1	1	1	2	4	4

ях, лечебно-профилактических, дошкольных, школьных, производственных и других помещениях в целях снижения количества содержащихся в воздухе и на поверхностях микроорганизмов и профилактики инфекционных заболеваний в отсутствии людей в соответствии с требованиями Р 3.5.1904 МЗ РФ "Использование ультрафиолетового бактерицидного излучения для обеззараживания воздуха в помещениях". Температура воздуха при его эксплуатации должна составлять 10...35 °С, влажность — 80 % при 25 °С.

Основные параметры облучателей должны соответствовать значениям, указанным в табл. 1. В качестве источника ультрафиолетового (УФ) бактерицидного излучения должны применяться бактерицидные амальгамные лампы низкого давления.

Обеззараживание поверхностей и воздуха в помещении происходит при воздействии на микроорганизмы бактерицидного УФ-излучения с длиной волны 253,7 нм. Инактивация микроорганизмов начинается после сообщения им достаточной дозы УФ-излучения. Доза облучения *D*, или количество энергии, передаваемое микроорганизмам, является главной характеристикой установки УФ-обеззараживания. Она равна произведению средней интенсивности УФ-облучения *I* на среднее время нахождения под облучением *t*:

$$D = It,$$

где *D* — доза УФ-излучения; *I* — средняя интенсивность УФ-излучения; *t* — среднее время нахождения под облучением.

Основные параметры и технические характеристики мобильных (переносных) облучателей представлены в табл. 2.

Параметры и технические характеристики настенного облучателя представлены в табл. 3.

Основные параметры и технические характеристики стационарных облучателей представлены в табл. 4.

Общий вид переносных облучателей Светолит-50 и Светолит-100 показан на рис. 1. Облучатели, изготовленные из коррозионностойкой стали 12Х18Н10Т (AISI 304), состоят из корпуса *1* с ограждающим каркасом *3* с ручкой для переноски *4*, крышки *2* с держателем *5* УФ-лампы, УФ-лампы *8* и сетевого выключателя с подсветкой *9*.

На внешней стороне корпуса размещены панель управления *6* и трёхконтактный штырьевой разъём *7* типа С14.

Таблица 2

Технические характеристики мобильных (переносных) облучателей

Параметры	Свето-лит-50	Свето-лит-100
Напряжение питания, В	220 ± 10 %	220 ± 10 %
Частота питающего напряжения, Гц	50—60	50—60
Ток	Однофазный	Однофазный
Потребляемая мощность в режиме свечения УФ-лампы, Вт, не более	170	300
Потребляемая мощность в режиме ожидания, Вт, не более	3	3
Класс оборудования по способу защиты от поражения электрическим током	I	I
Степень защиты по ГОСТ 14254—96	IP20	IP20
Тип УФ-лампы*	АНЦ 170/70-П3-3 VOSUV	АНЦ 300/144-П3-3 VOSUV
Число ламп, шт.	1	1
Бактерицидный поток, Вт	50	100
УФ-облучённость** на расстоянии 1 м, Вт/м^2, не менее	4	7
Производительность***, м^3/ч, не менее	400	700
Тип ЭПРА	Л-220-1 × (95-145)-2202-184	Л-220-1 × (95-145)-2202-184
Срок службы УФ-лампы, ч, не менее	12 000	12 000
Число включений/выключений УФ-ламп в течение срока службы, раз, не менее	25 000	25 000
Масса облучателя, кг, не более	3,3	4,5
Габаритные размеры, $l \times s \times b$, мм	270 × 190 × × 363	270 × 190 × × 550

Примечание. * Лампы АНЦ содержат ртуть в связанном состоянии (в составе амальгамы). При разбитии такой лампы демеркуризация помещения не требуется; лампы АНЦ не генерируют озон, поскольку не имеют в спектре излучения озонообразующих линий.
** Перпендикулярно оси лампы по центру облучателя.
*** При эффективности обеззараживания 99,9 по Staphylococcus Aureus.

Таблица 3

Технические характеристики настенного облучателя 100Н

Параметры	Значение
Напряжение питания, В	220 ± 22
Частота питающего напряжения, Гц	50...60
Ток	Однофазный
Потребляемая мощность, Вт, не более	300
Класс оборудования по способу защиты от поражения электрическим током	I
Степень защиты по ГОСТ 14254—96	IP20
Тип УФ-лампы*	АНЦ 300/144-П2 2А VOSUV
Число ламп, шт.	1
Бактерицидный поток, Вт	100
УФ-облучённость** на расстоянии 1 м, не менее, Вт/м^2	7
Производительность***, м^3/ч, не менее	700
Тип ЭПРА	ЭПРА Л~220-1 × × (95-145)-2202-184
Срок службы УФ-лампы, не менее, ч	12 000
Число включений/выключений УФ-ламп в течение срока службы, раз, не менее	25 000
Время выхода УФ-лампы на режим, мин	2
Габаритные размеры, мм, $l \times s \times b$	970 × 245 × 90
Масса облучателя, кг, не более	4,7

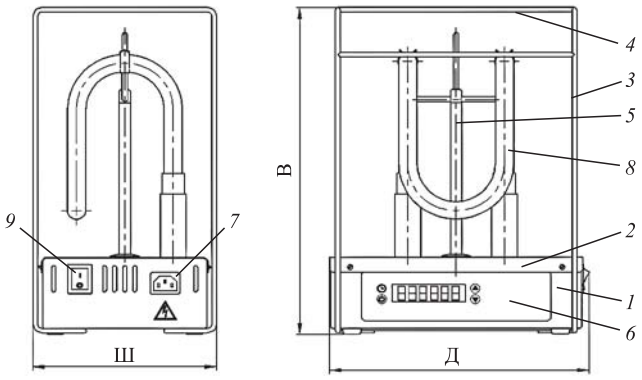


Рис. 1. Общий вид переносного облучателя

Таблица 4

Технические характеристики стационарных облучателей

Параметры	Свето-лит-300	Свето-лит-400	Свето-лит-600
Напряжение питания, В	220 ± 10 %		
Частота питающего напряжения, Гц	50...60		
Ток	Однофазный		
Потребляемая мощность, Вт, не более	1000	1200	2000
Класс оборудования по способу защиты от поражения электрическим током	I	I	I
Степень защиты по ГОСТ 14254—96	IP20	IP20	IP20
Тип УФ-ламп*	АНЦ 500/144-П3-28 VOSUV	АНЦ 300/144-П3 VOSUV	АНЦ 500/144-П3-28 VOSUV
Число ламп	2	4	4
Бактерицидный поток, Вт	300	400	600
УФ-облучённость** на расстоянии 1 м от облучателя, Вт/м^2, не менее	18,0	21,3	35,5
Тип ЭПРА	ЭПРА Л~220-1 × ×600-2222-161	ЭПРА Л~220-1 × × (95-145)-2202-184	ЭПРА Л~220-1 × ×600-2222-161
Срок службы УФ-лампы, ч, не менее	12 000		
Число включений/выключений УФ-ламп в течение срока службы, раз, не менее	25 000		
Габаритные размеры, *l* × *s* × *b* мм	460 × 460 × 1325		
Масса, кг, не более	24,5	26,0	28,0

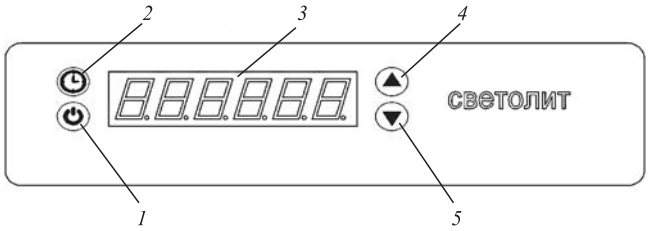


Рис. 2. Панель управления переносного облучателя:
1 — включения УФ-лампы; *2* — время наработки; *3* — шестизначное цифровое табло; *4* — увеличение времени облучения; *5* — уменьшение времени облучения

Панель управления (рис. 2) состоит из шестизначного цифрового табло и четырёх кнопок: включение УФ-лампы; время наработки; увеличение времени облучения; уменьшение времени облучения. Табло предназначено для отображения режимов работы облучателя: время наработки, код неисправности, время свечения УФ-лампы, время обратного отсчёта до включения УФ-лампы и завершение сеанса облучения.

В комплект поставки (рис. 3) входит пластина из коррозионно-стойкой стали, предназначенная для настенного размещения, в том числе для хранения облучателя. Пластина крепится к стене помещения в удобном для потребителя месте, а облучатель зацепляется ограждающим каркасом за ушки пластины. Размеры пластины: 255 × 290 мм для Светолит-50 и 255 × 480 мм для Светолит-100. Для защиты УФ-лампы от пыли (в нерабочем состоянии на месте хранения) устанавливается чехол защитный из прозрачной пластмассы. Перед включением УФ-лампы защитный чехол должен быть снят. Размеры чехла: 154 × 240 × 235 мм для Свето-

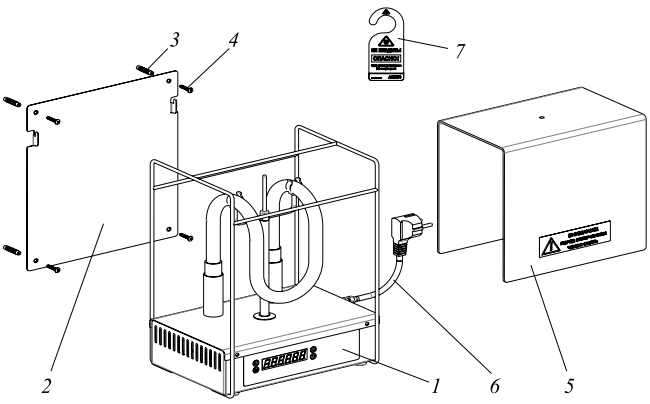


Рис. 3. Состав облучателя:
1 — облучатель; *2* — пластина для настенного размещения облучателя; *3* — дюбель; *4* — саморез; *5* — чехол защитный; *6* — кабель питания; *7* — табличка "Не входить! Опасно! Идёт обеззараживание УФ-излучением"

лит-50 и 154 × 240 × 420 мм для Светолит-100. Облучатель комплектуется кабелем питания сечением 3 × 0,75 мм с евровилкой. Длина кабеля 3 м. По согласованию с потребителем кабель питания может быть оснащён устройством защитного отключения (УЗО). В комплект облучателя входит картонная табличка "Не входить! Опасно! Идёт обеззараживание УФ-излучением" для вывешивания на дверь обрабатываемого помещения. Размеры таблички 95 × 235 мм.

Общий вид настенного облучателя показан на рис. 4. Облучатель изготовлен из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т (AISI 304) и состоит из основания *1*, крышки *2* и защитной решетки *3*. Решётка крепится к основанию посредством усиков на решётке, которые входят в отверстия в основании. Чтобы снять решётку, необходимо слегка оттянуть край решётки так, чтобы усики вышли из отверстий. На основании, на стойках установлена УФ-лампа *4*, электронный пускорегулирующий аппарат (ЭПРА) *5*. В боковой стенке крышки *2*, закрывающей ЭПРА, расположен кабельный ввод *6*. Подключение УФ-лампы к ЭПРА осуществляется ламповыми разъёмами *7*. В основании имеются четыре отверстия для закрепления облучателя на стене или на потолке.

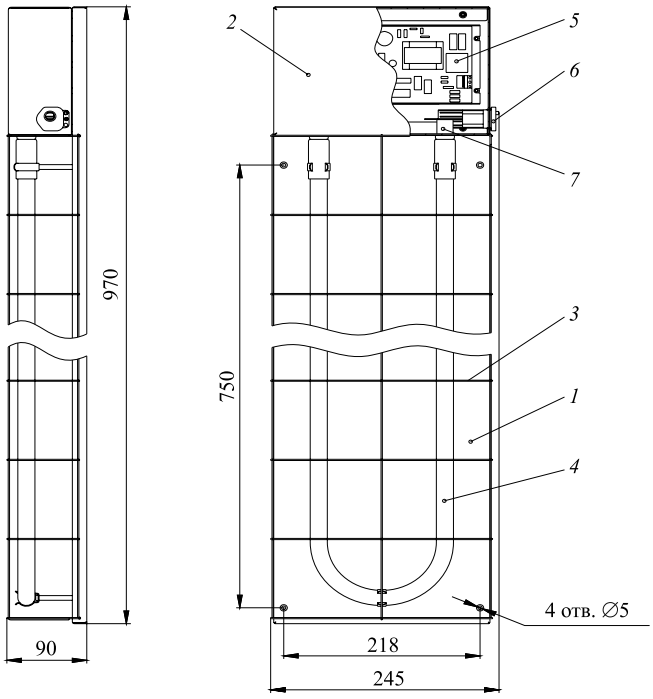


Рис. 4. Общий вид, габаритные и присоединительные размеры настенного облучателя

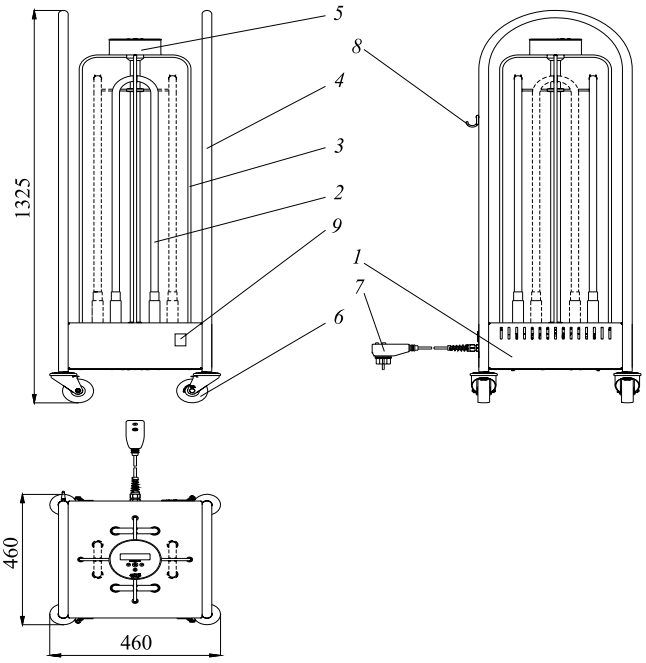


Рис. 5. Общий вид стационарного облучателя:
1 — корпус; *2* — УФ-лампа; *3* — элементы ограждения УФ-лампы; *4* — поручни для передвижения; *5* — пульт управления; *6* — колёса; *7* — вилка с УЗО; *8* — устройство для сматывания сетевого кабеля; *9* — сетевой выключатель

Общий вид стационарных облучателей Светолит-400, 300 и 600 показан на рис. 5. Облучатель изготовлен из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т (AISI 304) и состоит из корпуса *1*, на котором установлены УФ-лампы *2* и элементы ограждения ламп *3*, предохраняющие их от механических повреждений. Поручни *4* предназначены для передвижения установки. Время работы облучателя устанавливают при помощи пульта управления *5*. Внутри корпуса размещены ЭПРА. Для удобства перемещения облучатель имеет колёса *6*. Для подключения облучателя к сети служит кабель *7*, оснащённый УЗО. Длина кабеля 6 м.

Панель управления стационарного облучателя (рис. 6) состоит из шестизначного цифрового табло и четырёх кнопок: включение УФ-лампы; время наработки; увеличение времени облучения; уменьшение времени облучения. Табло предназначено для отображения режимов работы облучателя.

Для достижения наиболее эффективного обеззараживания воздуха и поверхностей в помещении облучатель должен размещаться в помещении так, чтобы на пути распространения УФ-излучения было как можно меньше препятствий.

Рис. 6. Панель управления стационарного облучателя: *1* — включения УФ-лампы; *2* — время наработки; *3* — шестизначное цифровое табло; *4* — увеличение времени облучения; *5* — уменьшение времени облучения

Уровень бактерицидной эффективности облучения выбирают в зависимости от типа помещения:

помещения категории I: операционные, предоперационные, родильные, помещения централизованных стерилизационных отделений, детские палаты роддомов, палаты для недоношенных и травмированных детей — 99,9 %;

помещения категории II: перевязочные, комнаты стерилизации и пастеризации грудного молока, палаты и отделения для иммуноослабленных больных, палаты реанимационных отделений, бактериологические и вирусологические лаборатории, станции переливания крови, фармацевтические цеха — 99 %;

помещения категории III: палаты, кабинеты и другие помещения медицинских учреждений, не относящиеся к категориям I и II, — 95 %;

помещения категории IV: детские игровые комнаты, школьные классы, бытовые помещения промышленных и общественных зданий с большим скоплением людей при длительном пребывании — 90 %;

помещения категории V: курительные комнаты, общественные туалеты, лестничные площадки — 85 %.

Рекомендованное время работы облучателя в зависимости от площади помещения и требуемой бактерицидной эффективности приведено в табл. 5—8.

Эффективность обеззараживания указана для санитарно-показательного микроорганизма Staphylococcus Aureus.

Таблица 5

Время работы (мин) облучателя Светолит-50 для достижения бактерицидной эффективности по SA

Площадь помещения, м^2 (при высоте потолков 3 м)	Уровень бактерицидной эффективности, %				
	85	90	95	99	99,9
20	5	6	7	9	12
35	7	8	10	14	20
50	9	11	13	19	28
75	13	15	19	28	41
100	16	20	25	37	54

Таблица 6

Время работы (мин) облучателя Светолит-100 для достижения бактерицидной эффективности по SA

Площадь помещения, м^2 (при высоте потолков 3 м)	Уровень бактерицидной эффективности, %				
	85	90	95	99	99,9
20	5	5	5	6	8
35	5	6	7	9	13
50	6	7	9	12	17
75	8	10	12	17	24
100	10	12	15	22	31

Таблица 7

Время обработки помещений при проведении профилактических мероприятий

Расстояние от облучателя до облучаемой поверхности, м	Время обработки помещений, мин		
	Светолит-300	Светолит-400	Светолит-600
2	5	4	4
3	9	7	5
4	15	10	7
5	20	15	10

Таблица 8

Время обработки помещений при проведении мероприятий по дезинфекции

Расстояние от облучателя до облучаемой поверхности, м	Время обработки помещений, мин		
	Свето-лит-300	Свето-лит-400	Свето-лит-600
2	11	9	7
3	20	16	11
4	40	30	20
5	60	45	30

Порядок работы облучателей осуществляется в следующей последовательности:

1. Доставить облучатель от места хранения до обрабатываемого помещения.

2. Установить облучатель на горизонтальной поверхности (пол, тумбочка и т.д.) в центре помещения либо подвесить на пластину, закреплённую на стене. Защитный чехол должен быть снят. При обработке большого помещения несколькими облучателями распределить облучатели равномерно по помещению.

3. Осмотреть УФ-лампу облучателя. В случае загрязнения поверхности колбы УФ-лампы перед включением её следует протереть чистой хлопчатобумажной тканью. Работу по установке, протирке и т.п. УФ-лампы проводить в хлопчатобумажных перчатках.

4. Убедиться, что сетевой выключатель находится в положении "выключено".

5. Подключить кабель питания в штырьевой разъём на корпусе облучателя, вставить вилку кабеля в розетку.

6. Если используется кабель с УЗО — нажать кнопку "RESET" на корпусе УЗО.

7. Включить сетевой выключатель, при этом должна засветиться его подсветка. На табло облучателя отобразится последнее установленное время работы.

8. Перед включением УФ-лампы необходимо выбрать время облучения и установить его на табло облучателя кнопками ▲ ▼. Каждое краткое нажатие кнопки ▲ и ▼ приводит к увеличению или уменьшению на 1 мин время облучения. Для ускоренного изменения времени облучения необходимо нажать и удерживать кнопки ▲ или ▼. Минимальное время, которое можно установить, составляет 1 мин.

9. Включение УФ-лампы производится нажатием кнопки ⏻. После включения начинается обратный отсчёт интервала времени 24...30 с, сопровождаемый звуковым сигналом, в течение этого времени необходимо покинуть помещение. За несколько секунд до окончания отсчёта времени тон звука повышается, оповещая о скором включении УФ-лампы. После окончания звукового сигнала произойдёт включение УФ-ламп облучателя. К моменту окончания звукового сигнала в помещении не должно быть людей и животных, входная дверь закрыта и приняты меры к недопущению людей в помещение в течение сеанса облучения.

10. По окончании установленного времени работы УФ-лампа выключится и прозвучат пять коротких звуковых сигналов; на цифровом табло отобразятся символы окончания облучения □□□□□. Данное состояние сбрасывается нажатием любой из кнопок ⏻, ▲ или ▼ без изменения параметров и без включения УФ-ламп, при этом на экране отображается последнее записанное в память прибора время облучения, если же будет нажата кнопка ◷, то на табло высветится значение времени наработки УФ-лампы.

11. По окончании сеанса облучения выключить сетевой выключатель, при этом должна погаснуть его подсветка, затем вынуть вилку из розетки.

12. Перенести облучатель в следующее помещение либо на место хранения.

Облучатели медицинские бактерицидные обеспечивают высокую инактивацию по широкому спектру микроорганизмов, соответствуют нормативным требованиям по санитарной чистоте, увеличивают срок хранения продукции.

Библиографические ссылки

1. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Системы обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 7. С. 25—28.

2. **Железникова О.Е., Амелькина С.А., Микаева С.А., Микаева А.С.** Установки обеззараживания воздуха в системах вентиляции серии "МЕГАЛИТ" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 10. С. 11—14.

3. **Микаева С.А., Микаева А.С., Амелькина С.А., Железникова О.Е.** Облучатели бактерицидные // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 11. С. 3—6.

4. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Обеззараживание воды ультрафиолетовым излучением // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 11. С. 8—11.

УДК 65.011.56, 004.9

А.А. Вакалюк, канд. техн. наук, **С.Н. Басманов, А.А. Басманова**
(Уральский государственный университет путей сообщения, г. Екатеринбург)
avakalyuk@yandex.ru

РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МЕДИЦИНСКИМ ДИАГНОСТИЧЕСКИМ ПРЕДПРИЯТИЕМ

Разработана концептуальная структура автоматизированной системы управления медицинским диагностическим предприятием. Система предназначена для автоматизации основных производственных фондов и оптимизации типовых процессов предприятия. В ходе исследования была разработана база данных. Система способствует повышению производительности, снижению затрат на проведение медицинских исследований. Работа выполнена по специальности 05.13.01 — Системный анализ, управление и обработка информации (по отраслям).

Ключевые слова: автоматизированная система управления; медицинская информационная система; единое информационное пространство; Data Modeler; CASE-средство; оптимизация типовых процессов; основные производственные фонды; экономико-правовой подход.

The conceptual structure of the automatic control system for medical diagnostic enterprise is developed. The system is intended for basic production assets automation and for the optimization of enterprise typical processes. In the research process the data base was developed. The system promotes productivity growth, lowering the medical research cost. This work is fulfiled in accordance with the specialty 05.13.01 — System analysis, management and information processing (on branches).

Keywords: automatic control system; medical information system; a single information space; Data Modeler; CASE-means; standard operations optimization; basic production assets; economic and legal approach.

Введение. На сегодняшний день существуют медицинские предприятия, работающие по устаревшим технологиям, что в первую очередь сказывается на уровне и качестве обслуживания пациентов. В связи с этим появилась необходимость в разработке концептуальной структуры автоматизированной системы управления медицинским диагностическим предприятием.

Поставлены следующие задачи перед системой и сформулированы требования к ней:

необходимо создать ядро системы, объединяющее все подразделения предприятия;

система должна быстро реагировать на изменяющуюся экономическую обстановку и спрос на услуги, должна быть "гибкой" в настройке и перенастройке;

система должна оптимизировать основные процессы предприятия;

система и заложенные в неё принципы должны способствовать сокращению временных и трудовых затрат;

для разработки структуры базы данных (БД) необходимо использовать CASE-средство Data Modeler.

Реализация требований к разрабатываемой концептуальной автоматизированной системе управления медицинским диагностическим предприятием позволит переработать большой объём информации, эффективно использовать лабораторное и диагностическое оборудование, оперативно получать справочную информацию, корректно оформлять документацию.

Актуальность исследований обусловлена необходимостью автоматизации и информатизации медицинского предприятия в целях повышения качества обслуживания.

Цель исследования — разработка концептуальной структуры автоматизированной системы управления медицинским диагностическим предприятием с использованием современных CASE-средств проектирования.

Основная часть. Базовым этапом развития автоматизированных систем управления в сфере медицины является комплексная автоматизация и информатизация, проводимая внутри каждого предприятия, целью которой является уменьшение трудозатрат персонала на выполнение типовых производственных и

вспомогательных операций путём внедрения автоматизированных рабочих мест [1]. Спецификой медицинского диагностического предприятия является работа большого количества автоматизированного и автоматического диагностического оборудования в сочетании с использованием ручных методик исследования, поэтому разрабатываемая концептуальная система должна быть "гибкой" в настройке и перестройке своего технологического уровня. Гибкость подключения имеющегося и приобретаемого в будущем основного производственного оборудования позволит:

быстро реагировать на изменение состава основного технологического оборудования;

согласовывать между собой отдельные стадии технологических процессов;

увеличить надёжность системы [2].

В данном исследовании предложен комплексный подход к автоматизации деятельности медицинского диагностического учреждения на основе автоматизации и информатизации управления как основными, так и вспомогательными производственными фондами (ОПФ и ВПФ соответственно).

Основные производственные фонды включают в себя подразделения медицинского предприятия, специализированное оборудование, автоматические рабочие места (АРМ) и другие структуры, непосредственно участвующие в процессе оказания медицинских диагностических услуг. Операции, осуществляемые ОПФ, предполагают выполнение лабораторно-диагностических исследований, качество оказания которых непосредственно влияет на экономические показатели работы предприятия. ВПФ выполняют экономические, правовые, организационные, кадровые и хозяйственные виды деятельности предприятия [3].

Начальным этапом автоматизации производственных процессов предприятия является автоматизация ОПФ, что позволит более рационально использовать технологическое оборудование, а также сократить время и трудоёмкость выполнения типовых производственных процессов. Это даст возможность более грамотно решить задачу оптимизации типовых процессов предприятия.

Таким образом, первостепенным этапом развития автоматизированной системы управления медицинским диагностическим предприятием является автоматизация и информатизация ОПФ.

Первоначальным этапом автоматизации и информатизации ОПФ является организация единого информационного пространства (ЕИП). ЕИП представляет собой совокупность баз и банков данных, технологий их ведения и использования, информационно-телекоммуникационных систем и сетей, функционирующих на основе единых принципов и по общим правилам, обеспечивающим информационное взаимодействие организаций и граждан, а также удовлетворение их информационных потребностей [4].

ЕИП включает следующие основные компоненты:

информационные ресурсы, содержащие данные, сведения и знания, зафиксированные на соответствующих носителях информации;

организационные структуры, обеспечивающие функционирование и развитие ЕИП, в частности, сбор, обработку, хранение, распространение, поиск и передачу информации;

средства информационного взаимодействия граждан и организаций, обеспечивающие доступ к информационным ресурсам на основе соответствующих информационных технологий, включающих программно-технические средства и организационно-нормативные документы [5].

Создание ЕИП позволит устранить дублирование информации благодаря автоматической синхронизации баз данных различных информационных систем (ИС), что приведёт к сокращению временных и трудовых затрат по сравнению с традиционным документооборотом.

Перед внедрением ЕИП в деятельность предприятия необходимо провести следующие мероприятия:

обеспечить полное наследование данных, накопленных предприятием за годы функционирования;

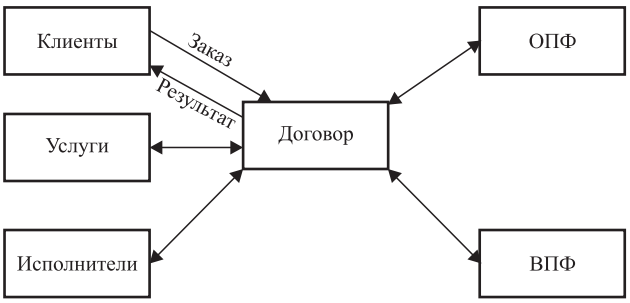
включить в ЕИП сторонние программы, выполняющие вспомогательные производственные функции;

включить в ЕИП диагностические приборы и оборудование;

обеспечить правильную работу базы данных, представленную сервером;

обучить пользователей работе в системе.

Предложен экономико-правовой подход к выполнению работ по автоматизации деятельности медицинского диагностического учреждения, основанный на внедрении комплексного ядра информационной системы, что отличается от традиционного поэтапного подхода к решению подобных задач. Основной идеей комплексного ядра информационной системы является объединение ОПФ и ВСФ на начальном этапе проектирования системы.



Структура БД медицинского диагностического документа

Структура ядра БД, построенная на основе экономико-правового подхода представлена на рисунке. Она включает в себя модули, представленные заказчиком, исполнителями и услугами. Данный принцип построения позволяет оптимизировать систему, сделать её сбалансированной, гибкой и масштабируемой без изменения основополагающих принципов автоматизации на конкретном предприятии.

За надлежащее исполнение экономико-правового подхода отвечают юридический и экономический подразделения медицинского предприятия. В их обязанности входит ведение договоров, проведение конкурсов для обеспечения основными средствами и материалами, составление планов.

Деятельность медицинского предприятия начинается с момента формирования заказа клиента. На его основе составляется договор, в котором указывают перечень услуг, оказываемых клиенту, наличие необходимых материалов, реагентов и оборудования. На основании договора формируется список работ из условия наличия исполнителей и услуг, которые входят в возможности предприятия. Далее заказ поступает в лабораторию для исполнения.

Выдача результатов исследований может проводиться несколькими способами:

физическая выдача заверенных результатов — традиционный способ;

выдача результатов в электронном виде — альтернативный способ, который обеспечивает большее удобство для клиентов, что повышает их уровень лояльности;

передача результатов исследований при помощи внешнего информационного обмена, обеспечивающего высокий уровень его автоматизации [6].

Таким образом, представленная организация структуры ядра БД медицинского предприятия позволит организовать чёткое выполнение функций между ОПФ и ВПФ, а также оптимизировать штат с возможностью закрепления обязанностей за каждым сотрудником.

Дальнейшая автоматизация информационной деятельности предприятия приведёт к масштабированию системы на уровне ОПФ. Для этого в структуре ОПФ необходимо разработать определяющий интерфейс. Введение интерфейса позволит установить необходимую связь между пользователем и системой, достигнуть поставленных целей, успешно находить решение поставленной задачи.

При разработке интерфейса необходимо добиться максимальной эффективности отображения информации для восприятия. Для этого структура должна быть выстроена таким образом, чтобы привлечь внимание к наиболее важным единицам информации. Также он должен минимизировать общую информацию на экране, представляя только самое необходимое для пользователя.

Разрабатываемый интерфейс должен иметь матричную структуру, которая позволит коммутировать потоки информации, что приведёт к созданию модульной системы.

Матричная структура подразумевает наличие нескольких интерфейсных модулей, соединённых между собой по принципу "каждый с каждым". Каждый интерфейсный модуль является самостоятельной программой, при этом вся система формируется как единое целое, и управляется как одно устройство. Все модули имеют одинаковый функционал.

На данном этапе также необходимо разработать определённые драйверы с возможностью предоставления информации одних производственных фондов другим. Также необходимо учесть автоматический и ручной ввод информации.

Разработка интерфейса с матричной структурой позволит сделать систему модульной и обеспечить информационный обмен между производственными фондами.

В качестве ядра ЕИП выступает реляционная база данных. Структура формируется с помощью AllFusion Erwin DataModeler — CASE-средства для проектирования баз данных, которое позволяет создавать, документировать и сопровождать БД [7].

Внедрение данного CASE-средства позволит:

сводить данные из нескольких платформ в единую модель с их графическим представлением;

создать каталог массивов данных, который может храниться в центральном репозитории, что приведёт к заданию стандартов и снижению избыточности данных;

обеспечить интеграцию с другими приложениями в целях автоматизации задач, таких как создание и настройка отчётов, импорт и экспорт моделей из других программ.

Таким образом, организация структуры БД с помощью средства Data Modeler позволит автоматизировать большое количество трудоёмких задач, уменьшить сроки создания высококачественных и высокопроизводительных транзакционных баз данных и хранилищ данных. Внедрение указанного средства улучшит коммуникацию организации, обеспечит представление комплексных активов данных в удобном для восприятия и обслуживания формате.

Заключение. Ядро системы на основе экономико-правового подхода обеспечит последовательность и комплексность процессов автоматизации предприятия на разных уровнях. Предложенная структура системы позволит быстро реагировать на изменяющуюся экономическую обстановку и спрос на услуги, приведёт к оптимизации работы медицинского диагностического предприятия с чётким закреплением обязанностей между персоналом, сократит временные и трудовые затраты, повысит эффективность труда оптимизацией информационных потоков.

При разработке структуры БД использовано CASE-средство Data Modeler.

Библиографические ссылки

1. **Готлиб Б.М, Вакалюк А.А., Басманов С.Н., Устюгова А.А.** Разработка концептуальной автоматизированной медицинской информационной системы методом функционально-структурного анализа // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 6. С. 5—11.

2. **Выжигин А.Ю.** Гибкие производственные системы: учеб. для вузов. М.: Машиностроение, 2009. 288 с.

3. **Басманов С.Н., Басманова А.А.** Концепция формирования единого информационного пространства для основных и вспомогательных производственных фондов в рамках медицинского диагностического учреждения // Экономика и социум. 2015. № 1. С. 85—87.

4. **Гринберг А.С., Король И.А.** Информационный менеджмент: учеб. пособие для вузов. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 415 с.

5. **Тайлаков У.Н.** Единое информационно-образовательное пространство школы как фактор повышения качества образовательных процессов // Молодой учёный. 2013. №5. С. 768—772.

6. **Готлиб Б.М., Вакалюк А.А., Басманов С.Н., Устюгова А.А.** Функциональный анализ комплекса информационных потоков в диагностическом медицинском учреждении // Applied and Fundamental Studies. 2013. № 4.

7. **Горбаченко В.И., Убиенных Г.Ф., Бобрышева Г.В.** Проектирование информационных систем с CA ERwin Modeling Suite 7.3: учеб. пособие. Пенза.: Изд-во ПГУ, 2012. 154 с.

УДК 519.816:681.51

В.А. Елисеев, д-р техн. наук, проф.
(ЗАО "Институт инновационно-технологического менеджмента")
dr.ye@mail.ru

ОСНОВЫ КАЛЕНДАРНОГО ПЛАНИРОВАНИЯ И ИНФОРМАТИЗАЦИИ ПЕРЕВОЗОК СРЕДСТВАМИ АСУ

Рассмотрен функционал АСУ "Экспресс-3", в котором можно особо выделить связанные с календарным планированием и информатизацией перевозок аспекты математического моделирования, алгоритмизации решений и программно-аппаратного обеспечения. Реализованные в АСУ модель перевозок, алгоритмы решений и программно-аппаратное обеспечение отвечают текущим требованиям пользователей. Дальнейшее совершенствование АСУ продолжается по всем перспективным направлениям функционально-отраслевого развития календарного планирования и информатизации перевозок.

Ключевые слова: информатизация; АСУ; железнодорожные пассажирские перевозки; календарное планирование.

The functional CAM "Express-3", in which can special mark out aspects of the mathematical modeling, solutions algorithmization and software-hardware ensuring, related with the transportation calendar scheduling and informatization, is considered. Implemented in the CAM model of transportation, decisions algorithms and software-hardware ensuring, meet the users.current objectivess. Further improvement of the CAM continues in all perspective areas of the functional and sectoral development of the transportation calendar scheduling and informatization.

Keywords: informatization; CAM; rail passenger transportation; calendar scheduling.

Введение. Возможности календарного планирования и информатизации перевозок средствами АСУ на отечественном железнодорожном транспорте во многом определяются наращиванием и развитием функциональных возможностей АСУ "Экспресс", с помощью которой решается комплекс пассажирских проблем, связанных с организацией продажи билетов на поезда внутреннего и международного сообщений, ведение статистической и финансовой отчётности, учёта парка подвижного состава, справочно-информационного обслуживания пассажиров, регистрации багажных отправок.

После этапного перехода железных дорог с АСУ "Экспресс-2" на АСУ "Экспресс-3" технические средства АСУ "Экспресс" продолжают совершенствоваться.

Создание в рамках АСУ аналитической базы данных (АБД) и объединение Региональных вычислительных центров "Экспресс" в единое информационное пространство позволили на качественно новом уровне разрабатывать информационные технологии в сфере управления пассажирскими перевозками. Для своевременной обработки возрастающих объёмов и улучшения качества услуг в обслуживании пассажиров, полноты и оперативности информации АСУ "Экспресс-3" базируется на современных зарубежных и отечественных технологических, телекоммуникационных, информационно-вычислительных средствах и средствах обеспечения технической и информационной безопасности.

В основе функционала АСУ "Экспресс-3" следует особо выделить связанные с календарным планированием и информатизацией перевозок аспекты математического моделирования, алгоритмизации решений и программно-аппаратного обеспечения. Рассмотрение перечисленных аспектов — цель настоящей статьи.

Моделирование перевозок и алгоритмизация решений. Под моделью перевозок понимается транспортная задача линейного программирования в управлении железнодорожными транспортными системами (с учётом соответствующих ограничений), т.е. дискретный вариант задачи в отличие от её непрерывной классической постановки. В отмеченной задаче (математически формулируемой в виде известной системы четырёх выражений [1]) требуется составить план перевозок, в соответствии с которым все пассажиры будут доставлены в пункты назначения при минимальных суммарных затратах на перевозку. Транспортная задача может быть решена одним из стандартных методов или разработанными специальными методами, учитывающими специфику ограничений этой задачи (а также не требующими применения АСУ упрощёнными методами, такими как построение начального опорного решения — метод вычёркивания, северо-западного угла и метод минимальной стоимости). Специальные методы исследования операций учитывают многие факторы, возникающие на практике, например [2]:

неоднородность пассажиропотоков (как правило, из различных пунктов необходимо доставить разное количество пассажиров, часто заранее определяемое пунктом назначения);

ограничения на пропускную способность путей (т.е. возможности перемещения транспорта);

ограничения возможностей транспортных средств (учитывают как количество транспортных единиц, имеющихся в наличии, так и ограничения на их эксплуатационные свойства — пассажироёмкость, скорость движения и т. д.);

транспортные расходы, которые могут включать в себя расходы на электроэнергию, горючее, ремонтные, эксплуатационные работы, привлечение обслуживающего персонала;

учёт времени (часто необходимо минимизировать не только издержки, но и время выполнения заказов, учесть директивные сроки).

В связи с перечисленными ограничениями необходимым оказывается не только определить, из какого пункта в какой будут доставляться пассажиры, но разработать маршруты и расписание движения поездов (последнее ограничение совершенно определённо указывает на связь транспортных задач с теорией расписаний). Задачи транспортного планирования между собой могут существенно различаться в зависимости от вида транспортных систем. Если это задачи с жёсткими ограничениями по пропускной способности путей и транспортных средств, то типичным представителем таких систем является именно железнодорожный транспорт, а решение задачи управления транспортными системами на примере железных дорог имеет общий вид.

По уровню и горизонту планирования различают задачи стратегические, тактические и оперативные. Но в любом случае календарное планирование связано с разработкой расписаний и его оптимизацией в рамках исследования операций:

разработки расписания движения поездов по выбранным маршрутам (собственно календарное планирование);

формирования составов и разработки расписаний движения для этих составов (объёмно-календарное планирование);

формирования составов, разработки расписания и маршрутов движения для этих составов (объёмно-календарное планирование и маршрутизация);

оптимизация (необходимы ответы на многие конкретные вопросы, например: какой подвижной состав и в каком количестве приобретать, где и какие транспортные магистрали прокладывать, где и какую инфраструктуру разворачивать, какой персонал и в каком количестве нанимать, по каким маршрутам и какому расписанию будет двигаться подвижной состав).

В то же время необходимо учитывать характер управляемых ресурсов, а именно: возможности подвижного состава, специфику управления участком пути, управление людскими ресурсами (менеджмент персонала).

Таким образом, способы и методы моделирования задач железнодорожного планирования напрямую зависят от различного рода ограничений, вплоть до уровня и горизонта планирования, которые нужно предусмотреть и учесть. В общем виде — это модели задач (в том числе с целочисленной постановкой и с использованием пространственно-временных графов) железнодорожного планирования, формирования составов и разработки расписания движения поездов, формирования пассажирских потоков, оперативного управления движением составов и др.

Для практического применения проведённого математического моделирования разрабатывают алгоритмы решения частных случаев указанных задач, а также используют специальные подходы (в том числе эвристический алгоритм) к приближённому решению задач железнодорожного планирования. К этим алгоритмам относятся, например, алгоритмы решения задачи минимизации среднего времени выполнения заказов для двух станций с одним локомотивом, решения задачи разработки расписания движения поездов между двумя станциями, решения задачи минимизации максимального взвешенного временного смещения выполнения заказа для двух станций, полиномиальные алгоритмы задач на основе сведения к задачам теории расписаний для одного технического средства, алгоритмы приближённых методов решения задач железнодорожного планирования [2].

Программно-аппаратное обеспечение. Реализуемые средствами вычислительной техники алгоритмы являются основой программных продуктов, таких как Microsoft Project, Primavera, Spyder Project, 1С (Управление строительной организацией), а также пакеты прикладных программ отечественной АСУ "Экспресс-3".

Объектами автоматизации АСУ "Экспресс-3" являются пассажирские и финансовые хозяйства железных дорог по их основным информационно-технологическим направлениям. АСУ используют для определения тенденций и закономерностей формирования пассажиропотоков с помощью подсистемы планирования и регулирования пассажирских перевозок, для разработки и внедрения маркетинговых методов в сферу управления пассажирскими перевозками.

Используемые в России, СНГ и странах Балтии АСУ "Экспресс-3" взаимодействуют между собой через сеть передачи данных (СПД) и "Инфосеть-21" в едином информационном пространстве обслуживания пассажиров и управления пассажирскими перевозками. Структурно все эти АСУ объединены в единую вычислительную сеть, работающую в реальном масштабе времени и в общем технологическом процессе обслуживания пассажиров и персонала железных дорог. АСУ состоит из двух основных комплексов: комплекса обработки заказов реального времени (КОЗРВ) и сетевой аналитической базы данных (АБД).

КОЗРВ обслуживает билетно-кассовые терминалы железных дорог, а АБД обеспечивает сбор информации (обо всех перевозках пассажиров и багажа, в которых участвуют отечественные железные дороги), хранение, обработку и анализ этой информации. Доступ к информации АБД реализован с помощью специализированных АРМ по WEB-технологии со всех российских железных дорог через СПД. Абонентами-пользователями АСУ являются кассиры билетных и багажных касс, персонал различных служб дорог и банков, автоматы по продаже билетов, информационные табло и сами пассажиры, обращающиеся в АСУ через справочные установки и Интернет.

Управление основными технологическими процессами, связанными с перевозкой пассажиров, АСУ осуществляет, используя исходные данные об образующихся пассажиропотоках, о наличии парка пассажирских вагонов, его состоянии и дислокации на сети дорог. Для

реализации своих функций АСУ "Экспресс-3" имеет программные подсистемы. Одна из них, "Автоматизированная подсистема по управлению парком пассажирских вагонов" (АСУ ПВ), реализует функции управления эксплуатацией и ремонта вагонов, включая подготовку вагонов и составов в рейс, дислокацию парка на сети дорог, инвентарный учёт парка (в том числе учёт пробегов вагонов), ремонт вагонов и материально-техническое снабжение вагонных участков и депо, составление "Графика работы проводников" и контроль его выполнения.

АСУ ПВ функционирует на всех трёх уровнях: на уровнях линейных предприятий и железных дорог, а также на верхнем уровне — в ОАО "РЖД". Информационной основой подсистемы является база данных (БД) парка пассажирских вагонов, которая доступна всем заинтересованным пользователям на каждом уровне управления. Программное обеспечение АСУ построено на системно-технической платформе фирмы IBM с использованием операционной системы OS390, СУБД DB2, системных компонент TCP/IP и MQS.

Комплекс АБД АСУ собирает и хранит уникальную и пополняющуюся информацию о пассажирских перевозках. БД содержит более 200 видов объектов и занимает около 300 Гбайт памяти. Работа с такой БД требует высокой квалификации специалистов и опыта работы с продуктами фирмы IBM. Большое количество задач управления и пользователей этих задач создаёт высокую нагрузку на АСУ, эксплуатация БД переведена на мощную ЭВМ IBM Z990, развитие технической базы предусматривается и в дальнейшем.

Высокие требования по надёжности и безопасности данных, использование этих данных не только для анализа, но и непосредственно для обслуживания пассажиров, высокая загрузка АСУ, значительная изменчивость состава и содержания объектов БД в связи с внедрением новых задач и технологий исключают возможность предоставления непосредственного доступа к БД внешним пользователям. Доступ к БД выполняется только с помощью специально разработанного и протестированного на соответствие всем требованиям АСУ программного обеспечения — комплекса, содержащего несколько тысяч программных модулей [3].

Головными разработчиками АСУ "Экспресс" изначально являются "законодатели отечественных железнодорожных мод в сфере информатизации и календарного планирования" отраслевые институты: ОАО "ВНИИЖТ" (Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта, бывший Всесоюзный) — в части технологии работы АСУ и ОАО "НИИАС" (Научно-исследовательский и проектно-конструкторский институт информатизации, автоматизации и связи на железнодорожном транспорте) — в части программного обеспечения. Кроме того, в разработке АСУ активно участвовали Информационно-вычислительные центры Октябрьской и Московской железных дорог, ЗАО "Институт проблем транспорта и логистики".

Головные разработчики ОАО "ВНИИЖТ" и ОАО "НИИАС" продолжают непрерывно совершенствовать АСУ "Экспресс" по всем направлениям — это касается технологии управления перевозками и транспортного обслуживания, систем и устройств автоматики и телемеханики, автоматизации управления перевозками, информационных систем железнодорожного транспорта, геоинформационных систем и спутниковых технологий, систем управления пассажирскими перевозками, транспортной безопасности, управления инфраструктурой и имущественным комплексом ОАО "РЖД", систем оптимизации энергопотребления и управления топливно-энергетическими ресурсами, разработки программного обеспечения (в том числе на основе уточнения моделей перевозок и повышения производительности алгоритмов решения).

Заключение. Реализованные в АСУ "Экспресс-3" модель перевозок, алгоритмы решений и программно-аппаратное обеспечение отвечают текущим требованиям пользователей. Дальнейшее совершенствование АСУ продолжается по всем перспективным направлениям функционально-отраслевого развития календарного планирования и информатизации перевозок.

Библиографические ссылки

1. **Теория** расписаний и вычислительные машины. [Под ред. Э.Г. Коффмана]. М.: Наука, 1984. 334 с.

2. **Лазарев А.А., Мусатова Е.Г., Кварацхелия А.Г., Гафаров Е.Р.** Теория расписаний. Задачи управления транспортными системами. [Под ред. С.Н. Васильева]. М.: МГУ имени М.В. Ломоносова, 2012. 159 с.

3. **Интернет**-ресурсы.