Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

1

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

Ничков А.В., Ведерников М.А., Ничков А.Г. Расчётно-экспериментальная методика определения зависимости износа зубьев червячных фрез от размеров срезаемых слоёв при зубофрезеровании 3

Грудинин С.Н., Фроловский В.Д. Сжатие геометрической информации и реконструкция базовой модели в задаче параметрического моделирования виртуальных манекенов 8

Лелюхин В.Е., Колесникова О.В. Алгоритм планирования дискретного машиностроительного производства "Опадающие листья" 15

Николаев А.В. Автоматизация процесса воздухоподготовки на подземных горно-добывающих предприятиях . . . 19

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Пролетарский А.В., Чжо Зин Хтут. Система диагностики бортовых измерительных средств 25

Неусыпин К.А., Чан Нгок Хыонг. Исследование алгоритмического метода коррекции автономных навигационных систем 29

Вартанов В.М., Зинина И.Н. Методология обеспечения технологичности изделий машиностроения в процессе проектирования 33

Гулямов Ш.М., Юсупбеков А.Н., Атауллаев А.О., Абдуллаева К.Р. Синтез следящих систем с волновыми каналами 37

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ НАУЧНОЙ И ХОЗЯЙСТВЕННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Шумихин А.Г., Пегушин С.Л. Анализ резервированных АСУТП с восстановлением при реализации функции противоаварийной автоматической защиты объектов нефтепереработки 43

ОБЗОР ПЕРИОДИЧЕСКОЙ ПЕЧАТИ

По страницам журналов 48

CONTENTS

AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

Nichkov A.V., Vedernikov M.A., Nichkov A.G. Calculation-experimental methodology for the dependance definition of the hob teeth wear from the cutted off layers size at hobbing 3

Grudinin S.N., Frolovskiy V.D. Geometric information compression and the base model reconstruction in the problem of parametric modeling of virtual mannequins 8

Lelyukhin V.E., Kolesnikova O.V. The scheduling algorithm of the discrete machine-building production “Falling Leaves” 15

Nikolaev A.V. Automation of the air preparation process in underground mining enterprises 19

MODERN TECHNOLOGY

Proletarskiy A.V., Chzho Zin Khtut. Diagnostic system of theboard measuring devices 25

Neusypin K.A., Chan Ngok Khyong. Algorithmic correction method research of autonomous navigation systems 29

Vartanov V.M., Zinina I.N. Ensuring methodology of the macine-buildind products manufacturability in the designing process 33

Gulyamov Sh.M., Yusupbekov A.N., Ataullaev A.O., Abdulaeva K.R. The synthesis of servo systems with wave channels 37

ECONOMY AND ORGANIZATION OF SCIENTIFIC AND ECONOMIC ACTIVITIES

Shumikhin A.G., Pegushin S.L. Analysis of reserve automation systems (APCS) at implementation with the restoration of the anti-damage automatic protection function of the oil processing/refining objects 43

SURVEY OF PERIODICALS

Periodicals review 48

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 факсу (499) 269 4897, по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефоны для справок: (499) 269 5298

Сдано в набор 29.10.2015.	Отпечатано в ООО "Канцлер"
Подписано в печать 22.12.2015.	150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.	Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.	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 621.9.02

А.В. Ничков, канд. техн. наук, доц., **М.А. Ведерников, А.Г. Ничков,** д-р техн. наук, проф.
(Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург)

maw1000@yandex.ru

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАВИСИМОСТИ ИЗНОСА ЗУБЬЕВ ЧЕРВЯЧНЫХ ФРЕЗ ОТ РАЗМЕРОВ СРЕЗАЕМЫХ СЛОЁВ ПРИ ЗУБОФРЕЗЕРОВАНИИ

Представлена расчётно-экспериментальная методика ускоренного определения износа зубьев червячной модульной фрезы в зависимости от размеров срезаемых слоёв, которая в дальнейшем будет использована для определения эксплуатационных характеристик процесса зубофрезерования.

Ключевые слова: червячная модульная фреза; зубофрезерование; износ при зубофрезеровании.

Calculation-experimental methodology for the accelerated dependance definition of the modular hob teeth wear depending on the cutted off layers size is presented. This methodology subsequently will be used to determine the performance of the hobbing process.

Key words: modular hob; hobbing; wear at hobbing.

При нарезании цилиндрических зубчатых колёс червячными фрезами для решения возникающих при этом связанных с износом задач, таких как зависимость износа от параметров зубофрезерования, выбор технологической схемы, конструктивных и режимных параметров, назначение периодических и непрерывных осевых смещений червячных фрез и др., необходимо располагать графиками распределения износа по зубьям червячных фрез. Однако вследствие многочисленных факторов, влияющих на износ зубьев червячной фрезы (параметры нарезаемого зубчатого колеса, червячной фрезы, технологическая схема зубофрезерования), получение таких графиков экспериментально непосредственным зубофрезерованием весьма трудоёмко и дорого.

Указанными недостатками, хотя и в меньшей степени, обладает метод [1] определения износа зубьев червячных фрез в зависимости от размеров срезаемых ими слоёв. Метод осуществляется моделированием условий их работы одним зубом-резцом, подобным зубу червячной фрезы. При этом условия фрезерования и зубофрезерования значительно отличаются.

Для решения поставленной задачи предложена расчётно-экспериментальная методика, максимально сокращающая экспериментальную часть работы непосредственно червячной фрезой при некотором увеличении расчётной части.

Расчётно-экспериментальная методика исследования износа червячных фрез при нарезании цилиндрических зубчатых колес базируется на двух положениях:

во-первых, известно, что размеры и форма слоёв, срезаемых зубьями червячной фрезы при нарезании цилиндрических зубчатых колес, зависят от таких параметров зубофрезерования, как модуль m, число нарезаемых зубьев колеса z_1, наружный диаметр фрезы D_{ao}, угол наклона зубьев колеса β_1, величина и направление осевой подачи S_o, число стружечных канавок z_0 и число заходов z_{10} фрезы, положение фрезы относительно заготовки в каждый данный момент времени, сочетание направлений зубьев колеса, витков фрезы и осевой подачи и др.;

во-вторых, из теории резания металлов известно, что размеры и форма срезаемого слоя влияют на износ инструмента наряду с такими факторами, как обрабатываемый и инструментальный материалы, геометрия режущих кромок инструмента, скорость и время резания.

Решение поставленной задачи заключается в аналитическом определении размеров слоёв, срезаемых зубьями червячной фрезы, доведении червячной фрезы до допустимого износа, замере износа зубьев фрезы и занесении результатов расчёта срезаемых слоёв и замера соответствующих износов зубьев в таблицу для последующей математической обработки результатов опытов и установления

по методу Гаусса—Лапласа зависимости износа зубьев червячных фрез от размеров срезаемых ими слоёв.

Располагая формулой зависимости износа от размеров срезаемых слоёв и методикой определения размеров срезаемых слоёв, можно построить графики износа зубьев червячных фрез при любом сочетании параметров зубофрезерования и использовать их для решения задач, связанных с износом червячных фрез.

В основу методики определения размеров срезаемых слоёв положено понятие о зоне резания как пространстве, в пределах которого происходит контакт зубьев фрезы с нарезаемой заготовкой колеса. Размеры зоны резания и срезаемых слоёв зависят от параметров и технологической схемы зубофрезерования, под которой понимается сочетание направлений зубьев колеса и витков фрезы (одноимённое или разноимённое) с осевой подачей (встречная или попутная).

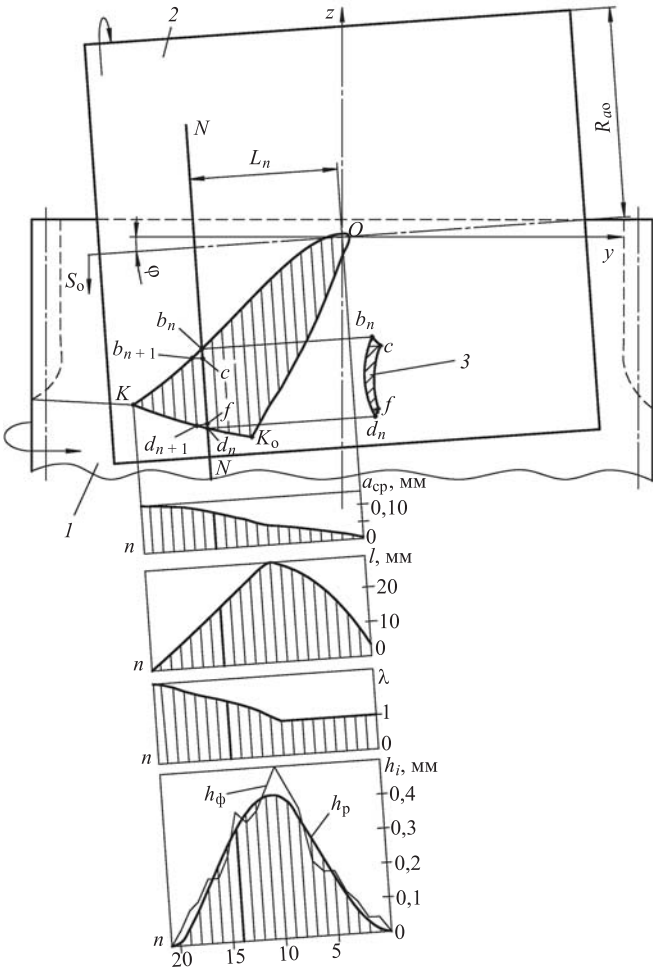


Рис. 1. Зона резания, графики размеров срезаемых слоёв и износа зубьев червячной фрезы:
1 — нарезаемое зубчатое колесо; *2* — червячная фреза; *3* — срезаемый слой

Экспериментальная часть исследования была выполнена на станке мод. 53А80К. Обрабатывали цилиндрические прямозубые колёса (m = 7 мм, z_1 = 93, материал — сталь 38ХГН НВ 241—286) червячной фрезой (m = 7 мм, z_{10} = 1, z_0 = 9, D_{ao} = 115 мм, материал Р6М5Ф3) со встречной осевой подачей S_o = 1,5 мм/об, глубиной резания t = 15,75 мм и частотой вращения фрезы n = 80 об/мин.

На рис. 1 дана схема к определению зоны резания и размеров срезаемых слоёв.

В процессе нарезания зубьев колеса, при согласованных относительных движениях фрезы *2* и заготовки *1*, контакт цилиндрической поверхности, на которой расположены вершинные кромки зубьев червячной фрезы, с заготовкой происходит на участке OKK_oO, ограниченном линиями OK, KK_o и OK_o. Линию OK получают при пересечении движущегося относительно оси заготовки наружного цилиндра фрезы с образованной им же на предыдущем обороте колеса огибающей поверхностью. Линия KK_o — результат пересечения наружных цилиндров фрезы и заготовки. Линию OK_o получают при пересечении цилиндрических поверхностей фрезы в двух её последовательных положениях относительно заготовки после поворота последней на угол α_z, за который два соседних по витку зуба фрезы последовательно проходят через одну и ту же, связанную с фрезой, горизонтальную плоскость.

Для аналитического определения указанных границ зоны резания запишем уравнения следующих поверхностей:

наружного цилиндра заготовки:

$$x^2 + y^2 = R^2, \qquad (1)$$

где R — наружный радиус заготовки;

наружного цилиндра фрезы через N целых оборотов заготовки:

$$x - A_0 + \sqrt{R_{ao}^2 - p^2} = 0, \qquad (2)$$

где A_0 — межосевое расстояние фрезы и заготовки; $p = y\sin\varphi + z\cos\varphi$; φ — угол разворота оси фрезы;

наружного цилиндра фрезы через $N + \dfrac{\alpha_z}{2\pi}$ оборота заготовки:

$$x - \frac{1}{\cos\alpha_z}\left[y\sin\alpha_z + A_0 - \sqrt{R_{ao}^2 - p_2^2}\right] = 0, \qquad (3)$$

где $p_2 = (x\sin\alpha_z + y\cos\alpha_z)\sin\varphi + \left[z + S_o\left(N - \frac{|\alpha_z|}{2\pi}\right)\right]\cos\varphi,$

$$\alpha_z = \frac{2\pi^2 m z_{10}}{z_0(\pi m z_1 \pm S_o \sin\beta_1)} \times \left[1 + \frac{m z_{10}\sin(\gamma_{m0} - \varphi)}{2R_{ao}\cos\varphi\cos(\gamma_{m0} + \lambda_{m0})}\right],$$

где α_z — угол поворота нарезаемого колеса за период между резами двух соседних по витку зубьев фрезы; φ — угол разворота оси фрезы; γ_{m0} — угол подъёма стружечной канавки фрезы; λ_{m0} — угол подъёма витка фрезы; β_1 — угол наклона зубьев колеса; N — количество оборотов колеса.

Уравнение огибающей поверхности, образованной на заготовке цилиндрической поверхностью фрезы в относительном движении:

$$\left.\begin{aligned} y + \frac{1}{\sin\alpha}\left[-x\cos\alpha + A_0 - \sqrt{R_{ao}^2 - p_1^2}\right] = 0; \\ y - \frac{1}{\cos\alpha}\left\{-x\sin\alpha - \frac{p_1\left[(x\cos\alpha - y\sin\alpha)\sin\varphi + \frac{S_o}{2\pi}\cos\varphi\right]}{\sqrt{R_{ao}^2 - p_1^2}}\right\} = 0, \end{aligned}\right\} \quad (4)$$

где α — угловой параметр; $p_1 = (x\sin\alpha + y\cos\alpha)\sin\varphi + \left[z + S_o\left(N - 1 + \frac{|\alpha|}{2\pi}\right)\right]\cos\varphi.$

Таким образом, уравнения линий, ограничивающих зону резания, определяют в результате совместного решения следующих уравнений: линия OK — из уравнений (2) и (4); линия KK_o — из уравнений (1) и (2); линия OK_o — из уравнений (2) и (3).

Расстояние L_n от межосевого перпендикуляра (МОП) до проекции на ось фрезы любой точки с координатами y и z зоны резания вычислим по формуле:

$$L_n = y\cos\varphi - (z + S_o N)\sin\varphi. \quad (5)$$

Для определения размеров слоя, срезаемого n-м зубом фрезы, проведём через него плоскость NN, перпендикулярную оси фрезы и отстоящую от МОП на расстоянии L_n. Эта плоскость пересекает граничные линии зоны резания, например, в точках b_n и d_n, координаты которых найдём из совместного решения уравнения плоскости NN (5) с уравнениями тех линий зоны резания, которые она пересекает, т. е. с уравнением линии OK, KK_o или OK_o. После этого длину срезаемого слоя l определим по формуле:

$$l = \left(\begin{aligned} &\arcsin\frac{y_{bn}\sin\varphi + z_{bn}\cos\varphi}{R_{ao}} - \\ &-\arcsin\frac{y_{dn}\sin\varphi + z_{dn}\cos\varphi}{R_{ao}} \end{aligned}\right) R_{ao}, \quad (6)$$

где y_{bn}, z_{bn} и y_{dn}, z_{dn} — соответственно координаты точек b_n и d_n.

Толщину срезаемого слоя a в любой точке (с координатами y и z) зоны резания определим по формуле:

$$\alpha = (x_2 - x_1)\cos\theta, \quad (7)$$

где $\theta = \arcsin\frac{y\sin\varphi + z\cos\varphi}{R_{ao}}$.

Значения x_2 и x_1 определяют соответственно из уравнений (3) и (2) после подстановки в первое из них $x = x_2$, а во второе — $x = x_1$.

Среднюю толщину $a_{ср}$ срезаемого слоя определяют по формуле:

$$a_{ср} = \frac{a_c + a_f}{2} - \frac{a_c l_1 + a_f l_2}{2l}, \quad (8)$$

где a_c и a_f — соответственно наибольшая толщина срезаемого слоя на входе зуба в зону резания и на выходе из неё; l_1 и l_2 — соответственно путь, пройденный зубом после входа в зону резания до достижения наибольшей толщины на выходе.

Для определения a_c и a_f необходимы координаты точек c и f n-го зуба, которые определяют по формулам:

$$y_c = y_{bn+1} \pm \Delta y;\ z_c = z_{bn+1};$$
$$y_f = y_{dn+1} \pm \Delta y;\ z_f = z_{dn+1},$$

где $\Delta y = \frac{\pi m z_{10}\cos\lambda_{m0}}{z_0\cos\varphi}$.

Зная координаты точек b_n, d_n, c и f и располагая формулами (2), (3), (7), по формуле (8) определяем $a_{ср}$.

Форма срезаемого слоя характеризуется коэффициентом λ:

$$\lambda = 1 + \frac{a_f}{a_{ср}}. \quad (9)$$

Располагая формулами (1)—(9), вычислим для данных параметров зубчатого колеса, червячной фрезы и режимов резания размеры слоёв, срезаемых зубьями червячной фрезы. Результаты расчётов размеров срезаемых слоёв

и замеров износа зубьев червячной фрезы сведём в таблицу, где указаны: n — номер зуба фрезы; L_n — расстояние от межосевого перпендикуляра до зуба фрезы; $a_{ср}$ — средняя толщина срезаемого слоя; l — длина срезаемого слоя; λ — форма срезаемого слоя; $h_ф$ — фактический износ зубьев червячной фрезы за период установившегося резания (износ за период врезания исключается).

Для определения зависимости износа зуба червячной фрезы от размеров срезаемого им слоя воспользуемся формулой:

$$h_i = C_h a_{ср}^x l^y \lambda^z, \qquad (10)$$

где C_h — постоянный коэффициент; x, y, z — показатели степеней влияния параметров срезаемого слоя на износ.

Прологарифмировав уравнение (10), получим:

$$\lg C_h + x \lg a_{ср} + y \lg l + z \lg \lambda - \lg h_i = 0.$$

Подставив в это уравнение n-е количество результатов расчёта $a_{ср}$, l, λ и соответствующих им измеренных износов зубьев фрезы, получим избыточную систему n уравнений при значительно меньшем количестве неизвестных (в нашем случае число уравнений равно числу зубьев фрезы, выбранных для расчёта, а именно 14). Для их решения используем математический метод наименьших квадратов, согласно которому сумма квадратов отклонений фактических и расчётных данных должна быть наименьшей. В результате система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} \sum_1^n \lg C_h + x\sum_1^n \lg a_{ср} + y\sum_1^n \lg l + z\sum_1^n \lg \lambda - \sum_1^n \lg h_ф = 0; \\ \sum_1^n (\lg C_h \lg a_{ср}) + x\sum_1^n (\lg a_{ср})^2 + y\sum_1^n (\lg l \lg a_{ср}) + \\ + z\sum_1^n (\lg \lambda \lg a_{ср}) - \sum_1^n (\lg h_ф \lg a_{ср}) = 0; \\ \sum_1^n (\lg C_h \lg l) + x\sum_1^n (\lg a_{ср} \lg l) + y\sum_1^n (\lg l)^2 + \\ + z\sum_1^n (\lg \lambda \lg l) - \sum_1^n (\lg h_ф \lg l) = 0; \\ \sum_1^n (\lg C_h \lg \lambda) + x\sum_1^n (\lg a_{ср} \lg \lambda) + y\sum_1^n (\lg l \lg \lambda) + \\ + z\sum_1^n (\lg \lambda)^2 - \sum_1^n (\lg h_ф \lg \lambda) = 0. \end{cases}$$

После подстановки конкретных значений система уравнений примет вид:

$$\begin{cases} 14 \lg C_h - x16,1822 + y18,3128 + \\ + z1,6152 + 9,1906 = 0; \\ - \lg C_h 16,1822 + x19,1955 - \\ - y21,4283 - z1,5864 - 10,7565 = 0; \\ \lg C_h 18,3128 - x21,4283 + y24,2432 + \\ + z1,9248 + 11,8588 = 0; \\ \lg C_h 1,6152 - x1,5864 + y1,9248 + \\ + z0,3627 + 1,0458 = 0. \end{cases}$$

Решая эту систему уравнений, определим численные значения коэффициента C_h и показателей x, y, z в формуле (10), после чего формула примет вид:

$$h_i = 0,069\, a_{ср}^{1,17} l^{1,51} \lambda^{-0,17}. \qquad (11)$$

Подставив в формулу (11) табличные значения размеров срезаемых слоев, вычислим соответствующие им расчётные износы h_{ip}, которые занесем в таблицу.

На рис. 2 изображены для сравнения графики фактического износа зубьев фрезы и расчётного.

Результаты расчёта размеров срезаемых слоёв, фактических и расчётных значений износа зубьев червячной модульной фрезы

Номер зуба фрезы, n	L_n, мм	$a_{ср}$, мм	l, мм	λ	$h_ф$, мм	$h_р$, мм
4	9,8	0,033	20,0	1	0,12	0,11
5	12,2	0,038	22,7	1	0,18	0,17
6	14,7	0,044	25,0	1	0,18	0,22
7	17,1	0,049	26,7	1	0,21	0,28
8	19,6	0,053	28,1	1	0,37	0,34
9	22,0	0,058	29,0	1	0,43	0,40
10	24,4	0,066	27,4	1,15	0,50	0,42
11	26,9	0,077	24,8	1,32	0,43	0,41
12	29,4	0,086	22,3	1,46	0,37	0,40
13	31,8	0,096	19,6	1,57	0,34	0,36
14	34,3	0,105	17,0	1,68	0,37	0,32
15	36,7	0,113	14,5	1,76	0,25	0,27
16	39,2	0,121	11,9	1,85	0,19	0,22
17	41,6	0,127	9,3	1,94	0,19	0,16

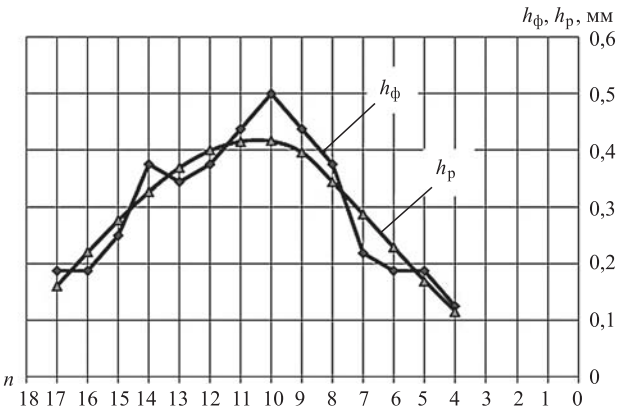


Рис. 2. Расчётный $h_р$ и фактический $h_ф$ графики износа зубьев фрезы

Проверку адекватности полученной математической модели проверим по критерию Фишера [2]:

$$F_р = \frac{S^2_{ад}}{S^2_h},$$

где $S^2_{ад} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{о.т}} \left(h_{iр} - h_{iф}\right)^2}{f}$ — дисперсия адекватности,

$S^2_h = \frac{\sum_{j=1}^{n_0} \left(h_j - \overline{h}\right)^2}{n_0 - 1}$ — дисперсия параметров оптимизации,

где $h_{iр}$ — величина расчётного износа; $h_{iф}$ — величина фактического износа; $f = N_{о.т} - k$ — число степеней свободы; $N_{о.т} = 14$ — число опытных точек; $k = 3$ — число параметров оптимизации; $n_0 = 3$ — количество проведённых опытов.

При обработке данных таблицы получено $S^2_{ад} = 0{,}00215$ мм^2.

Для определения S^2_h были проведены три одинаковых опыта ($n_0 = 3$) червячной фрезой и замерены её максимальные износы, которые оказались равными 0,42; 0,50 и 0,54 мм. Отсюда $S^2_h = 0{,}00375$ мм^2. В результате расчётный критерий $F_р = 0{,}573$.

Для данных условий проведения опытов и принятого уровня значимости $\alpha = 0{,}05$ табличное значение критерия $F_Т = 4$. Так как $F_р < F_Т$, то из этого следует, что принятая математическая модель (11) зависимости износа от размеров срезаемых слоёв адекватна и вполне допустимо её использование при определении эксплуатационных характеристик процесса зубофрезерования, связанных с износом инструмента.

После проведения дополнительных опытов по определению степени влияния скорости резания v на износ зубьев фрезы формула (11) приобрела следующий вид:

$$h_i = 15{,}37 \cdot 10^{-6} a_{ср}^{1{,}17} l^{1{,}51} \lambda^{-0{,}17} v^{2{,}5}. \qquad (12)$$

Для определения износа зуба фрезы за один рез h_1 необходимо правую часть уравнения (12) разделить на количество резов за период установившегося резания. В нашем случае при $z_1 = 93$, $S_о = 1{,}5$ мм/об заготовки, ширине обода заготовки за установившейся период резания $B = 420$ мм число резов равно 26 040. В результате формула зависимости износа зуба фрезы за один рез от размеров срезаемых слоёв примет следующий окончательный вид:

$$h_1 = 5{,}9 \cdot 10^{-10} a_{ср}^{1{,}17} l^{1{,}51} \lambda^{-0{,}17} v^{2{,}5}. \qquad (13)$$

Таким образом, располагая формулами (1—9) для расчёта размеров слоёв, срезаемых зубьями фрезы, и полученной для стали 38ХГН на основе результатов эксперимента формулой (13) влияния срезов на износ, можно для колёс из стали 38ХГН расчётным путём определять графики износа зубьев червячных фрез для любого сочетания параметров зубофрезерования и, при необходимости, обработать их математически с целью определения степени влияния этих параметров на износ фрезы, исследовать периодические и непрерывные осевые смещения, сравнить технологические схемы нарезания зубьев колеса и другие характеристики процесса зубофрезерования, связанные с износом. Аналогичным образом необходимо действовать при обработке зубчатых колес из других конструкционных материалов, а также применении твёрдосплавных червячных фрез, что значительно сократит время и затраты на получение необходимых в каждом конкретном случае эксплуатационных характеристик, связанных с износом и стойкостью червячных фрез.

Библиографические ссылки

1. **Ничков А.Г.** Основы комплексного исследования процесса зубофрезерования и оптимизации его конструктивных и технологических параметров в простых и комбинированных схемах нарезания зубчатых колёс червячными фрезами. Дисс. ... д-ра техн. наук. Тула, 1991.

2. **Зедгенидзе И.Г.** Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М.: Наука, 1976. 390 с.

УДК 681.3

С.Н. Грудинин, В.Д. Фроловский, д-р техн. наук, проф.
(Новосибирский государственный технический университет)

sn_grudinin@mail.ru

СЖАТИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ И РЕКОНСТРУКЦИЯ БАЗОВОЙ МОДЕЛИ В ЗАДАЧЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ МАНЕКЕНОВ

Рассмотрен метод построения трёхмерной модели манекена из полигональной модели для целей параметрического моделирования. Описываемый подход включает в себя следующие этапы: представление исходной модели множеством горизонтальных сечений, построение на основе сечений каркаса, аппроксимация линий каркаса, покрытие каркаса линейными поверхностями Кунса. Предложенные алгоритмы могут быть использованы в процессе параметрического моделирования виртуальных манекенов.

Ключевые слова: компьютерный манекен; базовая модель; параметрическое моделирование; поверхность Кунса.

A three-dimensional constructing method of the mannequin model from polygonal model for the purpose of parametric modeling is considered. The described approach includes the following steps: presentation of the initial model as multitude of the horizontal sections, building of the framework on the basis of sections, the approximation the framework lines, covering of the framework with linear Koons surfaces. The proposed algorithms can be used in the parametric modeling process of virtual mannequin.

Key words: computer mannequin; basic model; parametric modeling; Koons surface.

Введение. В настоящее время существует большое количество графических систем, решающих задачу проектирования геометрических объектов. Параметризованные твёрдотельные объекты широко представлены в различных CAD-системах (например, AutoCAD, MicroStation, SolidWorks и др.). Хорошо развиты методы параметрического проектирования, где геометрические модели представлены в виде теоретико-множественных композиций примитивов, активно развивается характеристическое моделирование примитивов. Однако объекты, имеющие сложную геометрическую форму и представляемые в общем виде сеточными моделями, требуют для параметризации специализированных технологий, учитывающих информацию о форме и принятые в предметной области метрические характеристики. К ним относятся объекты естественного происхождения, в том числе и тело человека.

Выделяют три основные группы методов поверхностного моделирования трёхмерных форм человеческого тела: создание, реконструкция и интерполяция. К первой группе относятся набравшее популярность в последнее время 3D-сканирование, а также 3D-скульптинг — моделирование человеческого тела как трёхмерной скульптуры в специально созданном для этих целей программном обеспечении. Ко второй группе относятся методы, позволяющие воссоздать модель по набору неструктурированных (или частично структурированных) данных. В результате она должна соответствовать исходным данным с меньшим количеством ошибок и шума, а также позволять отслеживать характеристики и измерения, если это необходимо. В третьей группе объединены методы, создающие модель деформацией некоторой заданной базовой модели, в соответствии с установленными ограничениями. К этой группе методов относится и параметрическое моделирование [1].

В отличие от других методов параметрическое моделирование является менее дорогостоящим средством и позволяет интерактивно создавать новые модели, изменяя заданные параметры. Формально такой подход можно описать следующим образом: создание производной модели Ω деформацией некоторой среднестатистической базовой модели Ψ согласно набору заданных параметров ρ; таким образом, новая производная модель Ω после деформации будет удовлетворять набору параметров ρ [1].

Дополнительные возможности параметрическое моделирование приобретает с развитием средств трёхмерного сканирования и распространением баз данных сканов реальных объектов. Модели, полученные сканированием,

содержат обильные эмпирические данные, которые могут использоваться как для выявления закономерностей изменения форм объектов определённого класса (используя базы данных сканов), так и для создания базовой модели. Подобные решения требуют методов и средств извлечения семантической информации. В связи с этим актуальным является решение задач параметризации сложных объектов и генерации новых моделей на основе семантической информации.

Цель настоящей работы — разработка метода реконструкции и параметризации базовой модели манекена на основе данных о форме объекта. При этом базовая модель должна обладать следующими свойствами: наилучшим образом соответствовать форме объекта-оригинала; быть деформируемой при изменении параметров для проектирования производных моделей; иметь разумное количество геометрических параметров.

Метод моделирования. Разработано множество методов представления поверхности человеческого тела, в которых выделяют три основных направления: представление в виде слоёв, сеток и патчей — трёхмерной ограниченной поверхностью. Вне зависимости от направления поверхность может быть сегментирована на составные части, которые проще описать и деформировать в отдельности, а также обеспечить некоторой функциональной самостоятельностью, что даёт дополнительное удобство при анимировании моделей, моделировании взаимодействия с окружающей средой.

Послойное представление [2] весьма распространено ввиду принятых в предметных областях (например, швейной промышленности) таких метрических характеристик, как высоты и обхваты, которые легко определяются при таком представлении. Выбор высоты слоёв обусловливается расположением характерных для предметной области параметров и точек. Целиком поверхность восстанавливают благодаря построению поверхностей натяжения между соседними слоями.

Сеточное представление [3] можно назвать классическим и в меньшей степени отражающим особенности формы с точки зрения семантического расположения элементов сетки на поверхности человеческого тела. Зачастую сеточное представление строится по набору кривых линий, интерполирующих некоторую входную модель. В дальнейшем эти кривые подвергают различным видам локальной или глобальной деформации для создания производных моделей. При представлении патчами поверхность манекена описывается некоторой сеточной структурой, каждая ячейка которой аппроксимируется патчем [4]. Представление патчами несет в себе больше возможностей для передачи базовой модели особенностей формы исходного объекта, чем точки и кривые. При проектировании представления и параметризации базовой модели в описанных выше подходах исследователи опираются на метрические характеристики, принятые в предметной области, либо на объективные знания об объекте, такие как симметричность.

Представление модели, в основе которой лежат предметные параметры [5], позволяет достигать при моделировании достаточной интерактивности и точности, однако теряет свою гибкость — изменение набора параметров приводит к изменению представления целиком. Идея метода, излагаемого в работе [5], состоит в разделении предметного и геометрического уровней параметризации и построении базовой модели на основании двух геометрических характеристик: точек и уровней, которые содержат в себе информацию о форме объекта. По этим характеристикам строится каркас — четырёхугольная сетчатая структура, рёбра которой аппроксимируются полиномами третьей степени, а каждая ячейка представляется патчем, определяемым линейной поверхностью Кунса. Геометрическими параметрами в таком представлении выступают координаты характерных точек и значения коэффициентов полиномов.

Деформация модели осуществляется изменением положения характерных точек, в результате чего происходит перерасчёт кривых каркаса и патчей. Обеспечение схожести формы модели с оригинальным объектом достигается вследствие использования при моделировании производных моделей значений коэффициентов полиномов базовой модели. Поверхность Кунса является одной из разновидностей поверхности натяжения и не требует для своего построения параметров, кроме ограничивающих её кривых.

Входную модель необходимой точности детализации можно получить любым способом, применяемым для создания геометрических объектов. В общем случае она может быть произвольной формы (принадлежащей объекту моделируемого класса), но пользователей систем проектирования чаще интересует среднестатистическая модель для заданных параметров.

Исходными данными для построения базовой модели является 3D-модель женского манекена стандартной формы, полученная

трёхмерным сканированием. Входная модель имеет полигональную структуру: множество точек $t_{ij}(x_{ij}, y_{ij}, z_{ij})$, соединённых в треугольные полигоны $p_i = (t_{i1}, t_{i2}, t_{i3})$, $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1,3}$, где N — количество полигонов. Модель не имеет внутренних полигонов, пересечений полигонов и отверстий. Задача ориентации модели в пространстве не рассматривается, модель ориентирована таким образом, что горизонтальная плоскость xOy разделяет верхнюю и нижнюю части манекена, вертикальная плоскость yOz отделяет переднюю часть от задней, вертикальная плоскость xOz разделяет манекен на две половины по оси симметрии [6].

Для реализации алгоритмов параметризации входная модель приводится к формальному виду. Исходя из основных особенностей формы — симметричности и протяжённости вдоль оси Oz — модели манекенов достаточно хорошо описываются множеством горизонтальных параллельных сечений, которые, в свою очередь, представляют собой гладкие, симметричные фигуры. Поэтому входная модель разбивается на множество горизонтальных сечений h_i от уровня промежности до уровня основания шеи сзади. Каждое сечение содержит одинаковое количество точек $\{v_{ij}\}$, отсортированных по полярному углу и равноотстоящих друг от друга $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, M}$, где N — количество сечений, M — количество точек в сечениях. Затем сечения h_i подвергают симметризации — определению средних значений между левыми и правыми половинами относительно плоскости xOz, и сглаживанию — интерполяции сплайнами третьего порядка [6].

Обработанные таким образом сечения h_i используют для анализа формы в целях выявления базовых характеристик — характерных точек (ХТ) и характерных уровней (ХУ). Под характерными понимаются точки в сечении, наилучшим образом, с точки зрения определённого признака, характеризующие его форму.

Мощным аппаратом для описания характеристик формы является дифференциальная геометрия. В работе используют два схожих между собой критерия — равенство нулю первой и равенство нулю второй производной. Для снижения вычислительной нагрузки расчёты выполняют по полусечениям. Каждое i-е полусечение рассматривается как кусочно-линейная функция $y(x)$ и выражается в параметризованном виде функциями $x(s)$ и $y(s)$. Параметром s выступает накопленная (суммарная) длина, т. е. при $s_0 = 0$

$$s_i = s_{i-1} + \sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2},$$

где $i = \overline{1, M}$.

Для $x(s)$ и $y(s)$ определяются точки, в которых первая или вторая производные равны нулю. Характерными признаются также точки начала и конца i-го полусечения, располагающиеся соответственно на оси симметрии манекена. На рис. 1 представлено сечение на уровне бёдер в исходном и параметризованном видах, отмечены ХТ, определённые критерием равенства нулю первой производной.

В качестве третьего критерия, применяемого для поиска ХТ, используют алгоритм определения доминантных точек, применяемых для многих приложений машинного зрения, обработки изображений и распознавания образов. Кратко используемый алгоритм [7] можно описать следующим образом:

1) для всех точек полусечения рассчитывается величина

$$b_{ik} = \max(|x_{i-k} - 2x_i + x_{i+k}|, |y_{i-k} - 2y_i + y_{i+k}|), \quad i = \overline{2, N-1},$$

где N — количество точек в полусечении; при этом k подбирается итерационно начиная с $k = 1$, до тех пор, пока $b_{ik} \leqslant b_{ik+1}$;

2) для всех точек полусечения определяется значение $v_i = \frac{1}{k_i} \sum_{j=1}^{k_i} b_{ij};;$

3) все точки полусечения проверяются на четыре условия:

$v_i < \varepsilon$;
$v_i < v_j$ при $j = i - 1$ или $j = i + 1$;
$v_i = v_{i-1}$ при $k_i < k_{i-1}$;
$v_i - v_{i+1}$ при $k_i \leqslant k_{i+1}$,

если хотя бы одно из условий выполняется, то точка не является характерной. Для ε используется рекомендуемое значение 0,25.

На рис. 2 представлено полусечение на уровне груди с отмеченными ХТ, определёнными по трём описанным критериям.

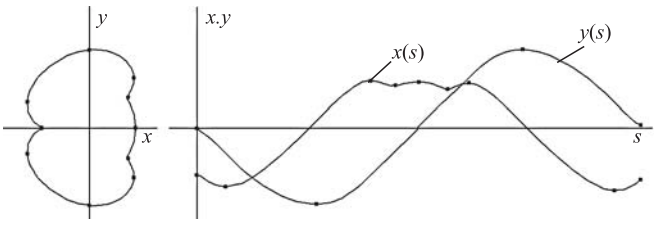


Рис. 1. Сечение на уровне бёдер, с отмеченными ХТ, в исходном (слева) и параметризованном (справа) видах

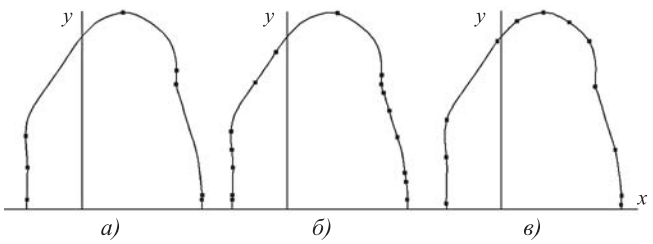


Рис. 2. Полусечение на уровне груди с отмеченными ХТ, определёнными с использованием критерия: равенства нулю первой производной (*а*) и второй производной (*б*), доминантных точек (*в*)

Представление модели манекена в виде множества сечений, как отмечалось выше, весьма удобно в связи с особенностями её формы. По этой же причине возможно выделение ХУ-уровней сечений, добавление которых к множеству h_i способствует достижению большей схожести с оригиналом. Выделение таких уровней сводится к исследованию некоторой функции $t(z)$, где аргументом является высота уровня, а значение функции — заданный геометрический параметр сечения (например, периметр, площадь и т. п.), а также контуров модели.

В первом случае в качестве параметра рассматривают периметр минимальной выпуклой оболочки (обхват) точек сечения на уровне z. Во втором — по сечениям h_i определяют передний, задний и боковой контуры, для этого в каждом i-м сечении находят точки с минимальной и максимальной x-координатой и с максимальной y-координатой. Полученные значения представляют кусочно-линейными функциями $f(z)$, $b(z)$, $s(z)$. Функции $t(z)$, $f(z)$, $b(z)$, $s(z)$ подвергают анализу — определению значения z, при котором первые производные равняются нулю. Сечения, расположенные на ХУ, добавляются к множеству сечений h_i, на них также определяют ХТ.

Под алгоритмом построения каркаса подразумевается соединение точек сечений таким образом, чтобы они образовывали четырёхугольную сеточную структуру, в узлах которой находятся ХТ. На вход алгоритма поступает N полусечений h_i по M точек, при этом $\{p_{ij}\}$ из них характерные, где $i = \overline{1, N}$, $j = \overline{1, m_i}$. Построение каркаса осуществляют в три этапа: соединение точек трёх контуров, построение вертикальных рёбер патчей, построение горизонтальных рёбер патчей.

Соединение точек контуров происходит вертикальными линиями, при этом точки переднего и заднего контуров определяются как начало и конец полусечений; точки бокового контура определяются как ХТ, имеющие наибольшую координату по оси y и x-координату в интервале $[-L_1, L_1]$, где L_1 — эмпирически определяемое ограничение.

Построение вертикальных рёбер патчей происходит путём соединения ХТ в соседних полусечениях. Если ХТ $a \in \{p_{ij}\}$ имеет в соседнем полусечении ближайшую к ней ХТ $b \in \{p_{i+1j}\}$ и евклидово расстояние $E(a, b)$ между ними удовлетворяет условию $E < L_2$, то a и b соединяются между собой, где L_2 — эмпирически определяемое ограничение.

Построение горизонтальных рёбер патчей выполняется соединением ХТ по горизонтали по линиям соответствующих полусечений. При этом ХТ p_{ij} соединяется с соседними ХТ p_{ij+1} и p_{ij-1}, если выполняется одно из двух условий: p_{ij} имеет одно вертикальное соединение (снизу или сверху), p_{ij} вообще не имеет вертикальных соединений.

Линии каркаса аппроксимируются полиномами третьей степени, при этом каждая линия описывает ломаную в пространстве, т.е. множество точек $p = \{p_i(x_i, y_i, z_i)\}$, $i = \overline{1, n}$, где p_0 и p_n — ХТ. Вектор-функция, описывающая аппроксимирующую кривую, имеет вид:

$$r(s) = A + Bs + Cs^2 + Ds^3;$$

$$A = p_0, B = q_0, \; C = \frac{\Delta r - q_0}{s_n} - DL;$$

$$D = \frac{q_0 - q_n - 2\Delta r}{{s_n}^2}; \; \Delta r = \frac{p_n - p_0}{s_n},$$

где q_0, q_n — касательные к кривой p в точках p_0 и p_n соответственно; s — накопленная длина аппроксимируемой кривой.

Касательные q_0 и q_n определяются с учётом линий каркаса, примыкающих в точках p_0 и p_n. Расчёт касательной q_0 происходит в несколько этапов:

1. Определяют векторы k_0 в точке p_0 по формуле: $k_0 = (p_1 - p_0)/(s_1 - s_0)$.

2. Рассчитывают векторы $k_1,...,k_m$ для всех m линий, примыкающих к точке p_0 по формуле: $k_i = (p_0 - p_1^{(i)})/(s_1^{(i)} - s_0)$, $i = \overline{1, m}$, где (i) — порядковый индекс линии, примыкающей к точке p_0.

3. Для всех возможных пар векторов из $\{k_0, ..., k_m\}$ определяют нормали $N_0, ..., N_z$, направленные от модели, $z = m!/2!(m - 2)!$.

4. Находят среднюю нормаль

$$N' = \frac{N_0 + \ldots + N_z}{|N_0 + \ldots + N_z|}.$$

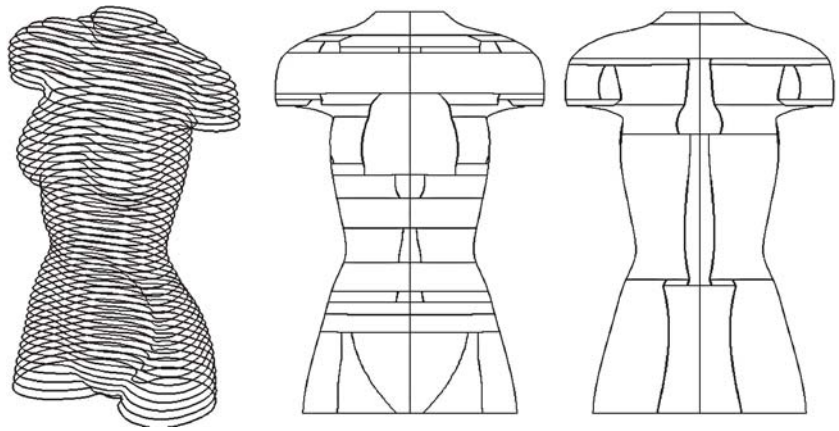


Рис. 3. Пример сечений манекена (*а*) и построенные на их основе каркасные линии: вид спереди (*б*); вид сзади (*в*)

5. Рассчитывают проекцию k_0 на плоскость, нормалью которой является N' по формуле: $q_0 = k_1 - N' <k_1, N'>$.

Аналогичным образом определяют вектор q_n. Если линия, образующая границу патча, представляет собой отрезок, соединяющий две ХТ, то касательные вектора будут определяться по формулам: $k_0 = (p_n - p_0)/|p_n - p_0|$, $k_0 = (p_0 - p_n)/|p_0 - p_n|$. На рис. 3 представлен пример сечений манекена и построенного на их основе каркаса.

По четырём кривым, образующим патч $p^{(i)}(s^{(i)})$ и соединяющим их точкам p_i, $i = \overline{1,4}$, строится линейная поверхность Кунса, которая описывается векторной функцией:

$$r(u, v) = (1 - v)p^{(1)}(s^{(1)}) + (1 - u)p^{(2)}(s^{(2)}) + vp^{(4)}(s^{(4)}) + up^{(3)}(s^{(3)}) - (1 - u)(1 - v)p_1 - u(1 - v)p_2 - (1 - u)vp_3 - uvp_4;$$

$$s^{(1)} = p_1(1 - u) + p_2u;\ s^{(2)} = p_2(1 - v) + p_3v;$$

$$s^{(3)} = p_3(1 - u) + p_4u;\ s^{(4)} = p_1(1 - v) + p_4v;$$

$$0 \leqslant u \leqslant 1,\ 0 \leqslant v \leqslant 1.$$

На рис. 4 показана модель манекена, аппроксимированная патчами, с каркасными линиями и в полигональной форме.

Исследование результатов моделирования. Изложенные в работе алгоритмы проверяют на трёх моделях женских манекенов. На первом этапе определяют степень влияния параметров: количество сечений разбиения (n), количество точек в сечениях разбиения (t) на ряд критериев:

количество патчей (p);

среднее количество ХТ в сечениях (m);

отношение количества ХТ, образующих углы патчей, к общему количеству ХТ (g);

суммарный критерий схожести (s).

Суммарный критерий схожести рассчитывается как сумма четырёх показателей [6], каждый из которых определяет степень схожести входной и базовой моделей посредством расчёта среднеквадратичного отклонения для каждого из них по формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(P_i^I - P_i^{II})^2},$$

где P_i^I — i-е нормированное значение показателя для исходной модели; P_i^{II} — i-е нормированное значение показателя для базовой модели.

В качестве показателей используют четыре метрики, рассчитываемые по набору N горизонтальных сечений по M точек в каждом:

Периметр i-го сечения

$$S^v = \sum_{j=1}^{M-1}\sqrt{(x_j - x_{j+1})^2 + (y_j - y_{j+1})^2},$$

где, $v_j(x_j, y_j)$ — j-я точка сечения.

Периметр обхвата i-го сечения

$$S^w = \sum_{k=1}^{R-1}\sqrt{(x_k - x_{k+1})^2 + (y_k - y_{k+1})^2},$$

где R — количество точек обхвата i-го сечения; $w_k(x_k, y_k)$ — k-я точка обхвата.

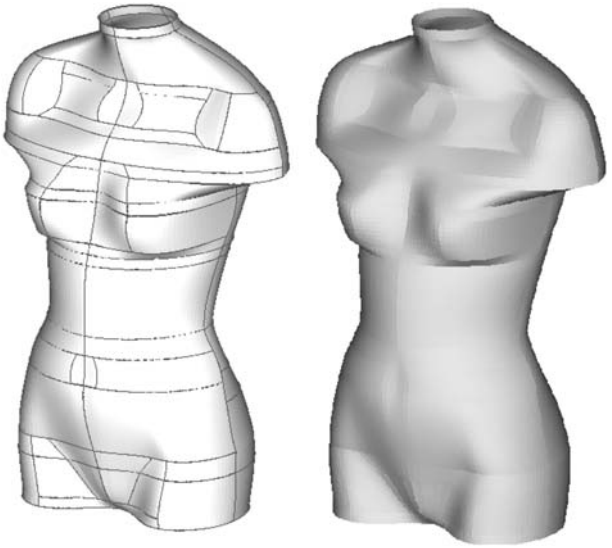


Рис. 4. Аппроксимированная патчами модель с каркасными линиями (слева) и в полигональном триангулированном виде (справа)

Таблица 1

Зависимость критериев *p*, *m*, *g*, *s* от количества сечений разбиения *n*

Число сечений *n*	15	30	50	70	90	110	130
Число патчей *p*	70,00	120,67	139,33	167,33	190,00	161,33	192,67
Среднее число ХТ в сечениях *m*	11,38	11,07	10,92	10,98	10,97	10,97	11,01
Отношение числа ХТ, образующих углы патчей, к общему числу ХТ *g*	0,54	0,47	0,34	0,30	0,26	0,20	0,20
Суммарный критерий сходства *s*	0,28	0,23	0,20	0,21	0,22	0,26	0,25

Дескриптор формы *i*-го сечения

$$D_i = \sum_{j=1}^{M-1} L_j \cos\alpha_j,$$

где L_j — расстояние в плоскости сечения от центра масс до *j*-й точки сечения; α_j — разница по модулю между полярным углом *j*-й точки сечения и углом $360j/M$.

Площадь *i*-го сечения

$$A = \frac{1}{2}\sum_{j=1}^{M-1} L_j^2 \varphi_j,$$

где φ_j — угол между радиус-векторами *j*-й и $(j + 1)$-й точками сечения.

В табл. 1 даны средние по трём моделям значения критериев *p*, *m*, *g*, *s* при изменении количества сечений разбиения.

На основании представленных в табл. 1 данных можно сделать вывод о том, что количество патчей с некоторым отклонением линейно возрастает при увеличении количества сечений (рис. 5, *а*) по причине роста общего числа ХТ. Однако увеличение числа патчей не улучшает модель (рис. 5, *б*) потому, что слишком частое разбиение приводит к появлению значительного количества небольших патчей, которые, в свою очередь, при аппроксимации поверхностями Кунса вызывают искажение поверхности. Наилучшая схожесть обеспечивается при значении параметра в 50 сечений. Следует также отметить, что среднее количество ХТ в сечении уменьшается по закону, близкому к экспоненциальному (рис. 5, *в*). Это свидетельствует о том, что количество сечений в диапазоне от 50 до 70 достаточно для определения всех особенностей формы модели, при том, что общее число задействованных в построении патчей ХТ постоянно уменьшается (рис. 5, *г*).

В табл. 2 представлены средние по трём моделям значения критериев *p*, *m*, *g*, *s* при изменении количества точек в сечениях разбиения.

По приведённым в табл. 2 данным не установлена очевидная связь изменяемого пара-

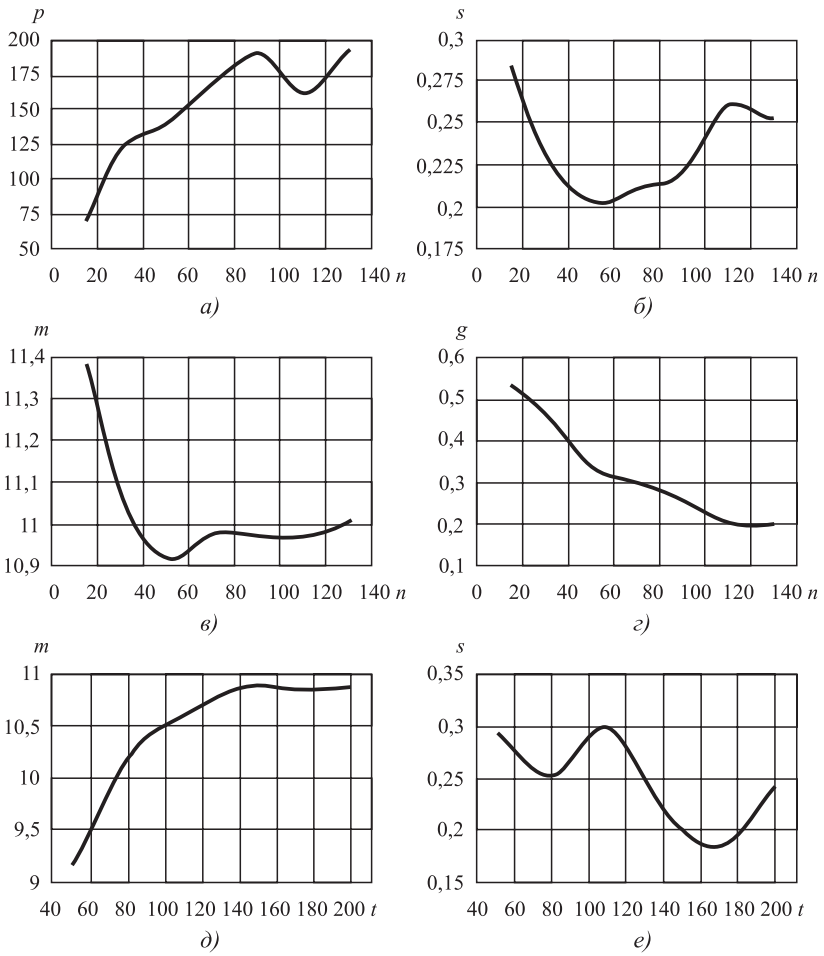


Рис. 5. Графики изменения критериев *p*, *m*, *g*, *s* в зависимости от параметров *n* и *t*

Таблица 2

Зависимость критериев *p*, *m*, *g*, *s* от количества точек в сечениях разбиения *t*

Число точек в сечениях *t*	50	80	110	140	170	200
Число патчей *p*	70,00	120,67	139,33	167,33	190,00	161,33
Среднее число ХТ в сечениях *m*	11,38	11,07	10,88	11,04	10,97	10,97
Отношение числа ХТ, образующих углы патчей, к общему числу ХТ *g*	0,54	0,47	0,34	0,30	0,26	0,20
Суммарный критерий сходства *s*	0,28	0,23	0,20	0,21	0,22	0,39

метра с количеством патчей модели, поэтому можно сделать вывод, что число точек в сечении не влияет на количество патчей. Изменение среднего количества ХТ в сечении (рис. 5, *д*) при числе точек в сечении больше 150 не выявляет новых ХТ. При этом суммарный критерий сходства имеет постоянную, с незначительными колебаниями, тенденцию к снижению, достигая наименьшего значения при 170 точках (рис. 5, *е*).

На основании изложенного выше можно заключить, что ни увеличение количества сечений разбиения, ни точек в них не улучшает качество базовой модели, поэтому рекомендуются границы изменения этих параметров от 50 до 70 и от 150 до 170 точек соответственно.

Результаты сопоставления различных способов определения ХТ и ХУ в среднем для трёх моделей представлены в табл. 3. По этим данным можно сделать следующие выводы:

Таблица 3

Зависимость критериев *p*, *s* от способа определения ХТ и ХУ

Способ определения ХТ, ХУ	Число патчей *p*	Суммарный критерий сходства *s*
Равенство нулю 1-й производной	77,33	0,19
Равенство нулю 2-й производной	340,00	0,16
Доминантные точки	720,67	0,18
Равенство нулю 1-й производной в сочетании с обхватами	111,33	0,17
Равенство нулю 1-й производной в сочетании с контурами	154,00	0,18

критерии равенства нулю второй производной и доминантные точки позволяют построить более точную модель, чем при использовании критерия равенства первой производной, но при этом вызывает появление большого количества патчей, что противоречит самой идее метода;

сочетание критериев равенства нулю первой производной и обхватов даёт лучшие результаты, чем использование вместо последнего контуров модели.

Заключение. В статье описан метод реконструкции и параметризации базовой модели виртуального манекена заданной структуры по полигональной модели исходного объекта в рамках задачи параметрического представления трёхмерных объектов со сложной структурой. Рассмотрена оригинальная параметризация модели, сохраняющая геометрическую информацию об объекте. Авторами исследованы основные способы определения геометрических характеристик формы моделей. Рассматриваемые алгоритмы могут быть использованы в процессе параметрического моделирования виртуальных манекенов. При этом создание производных моделей будет происходить в результате изменения координат узловых точек каркаса с последующим пересчётом линий каркаса и аппроксимирующих поверхностей.

На основе проведённых исследований, разработанных моделей и алгоритмов создано программное обеспечение. Алгоритмы реализованы на языках C++ в среде разработки Embarcadero RAD Studio с использованием графической библиотеки Open GL.

Перспективным развитием рассмотренных решений являются: расширение списка исследуемых критериев для определения характеристик формы модели; разработка процесса

параметрического моделирования виртуальных манекенов на основе предложенного представления и геометрической параметризации; определение зависимостей предметных и геометрических параметров в контексте моделирования манекенов для швейной промышленности.

Библиографические ссылки

1. **Фроловский В.Д.** Компьютерное проектирование манекенов и одежды. Трёхмерные модели и математические методы. Germany, Saarbrucken: LAMBERT Academic Publishing, 2012. 269 с.

2. **Абдулин П.К., Фроловский В.Д.** Сжатие геометрической информации сложных объектов на основе порождающих моделей // Тр. 15-й Межд. конф. по компьютерной графике и её приложениям "ГРАФИКОН — 2005" (20—24 июня 2005 г.). Новосибирск: Институт вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, 2005. С. 175—178.

3. **Kasap M., Magnenat-Thalmann N.** Skeleton-aware size variations in digital mannequins // The Visual Computer. 2011. Vol. 27. 4. P. 263—274.

4. **Wang C.C.L.** Parameterization and parametric design of mannequins // Computer-Aided Design. 2005. Vol. 37. No. 1. P. 83—98.

5. **Грудинин С.Н., Фроловский В.Д.** Предметная параметризация виртуальных манекенов // Автоматика и программная инженерия. 2014. № 1(7). С. 53—56.

6. **Грудинин С.Н., Фроловский В.Д.** Параметрическое моделирование и оценка близости виртуальных манекенов // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. 2014. № 1 (22). С. 62—72.

7. **Wu W.-Y.** Dominant point detection using adaptive bending value // Image and Vision Computing. 2003. Vol. 21. P. 517—525.

УДК 621.002:658; 65.012.2; 65.012.122

В.Е. Лелюхин, канд. техн. наук, доц.
(ОАО "Дальрыбтехцентр", г. Владивосток),
О.В. Колесникова
(Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток)
miis@mail.ru

АЛГОРИТМ ПЛАНИРОВАНИЯ ДИСКРЕТНОГО МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОГО ПРОИЗВОДСТВА "ОПАДАЮЩИЕ ЛИСТЬЯ"

Предложен алгоритм определения последовательности изготовления деталей и сборочных единиц при составлении плана производства. В отличие от алгоритмов, в которых структура изделия раскладывается по уровням вхождения, предложенный алгоритм основан на разложении графа-дерева структуры изделия по слоям. Апробация алгоритма на реальных изделиях, выпускаемых предприятием, показала повышение эффективности при разработке планов на 20...30 %.

Ключевые слова: машиностроение; дискретное производство; алгоритм планирования; подготовка производства; загрузка оборудования.

An algorithm for determining the sequence of the parts and assembly units manufacture at the drawing up of the production plan is proposed. In contrast to the algorithms in which the structure of the product is decomposed by entry levels, the proposed algorithm is based on the decomposition in layers of the product graph-tree structure. The algorithm approbationon on the real products manufactured by the enterprise showed increased efficiency at plans development for the 20... 30 %.

Key words: machine-building; discrete manufacturing; scheduling algorithm; production preparation; equipment loading.

Для организации эффективного производства предприятий мелкосерийного и единичного типа одной из важных задач является корректное планирование. Проблема кроется, в первую очередь, в самом типе производства, когда почти отсутствует повторяемость изготовляемых изделий и, соответственно, трудно планировать сроки и последовательность изготовления деталей.

С одной стороны, качественное (с операционной степенью детализации) планирование требует достаточного информационного обес-

печения для каждой технологической операции изготовляемых деталей и сборочных единиц по всем рассматриваемы изделиям, т. е. наличия конструкторской и технологической информации (документации) с пооперационной степенью детализации.

Другая, не менее важная, сторона проблемы заключается в умении составить корректный и реализуемый производственный план, соответствующий условиям машиностроительного предприятия. При составлении производственного плана приходится оперировать с большим количеством вариантов сочетаний и перестановок, даже сравнительно несложных изделий. Поэтому эффективность принимаемых решений во многом зависит от алгоритмов планирования.

В рассматриваемой статье задача планирования заключается в составлении графика загрузки рабочих мест (технологического оборудования) с учётом структуры изделий и последовательности выполнения технологических операций в процессе изготовления требуемых деталей и сборок. При этом важно обеспечить наиболее эффективную загрузку оборудования, а также при строгом выполнении технологической дисциплины минимизировать производственный цикл и гарантировать производство изделий в установленный срок.

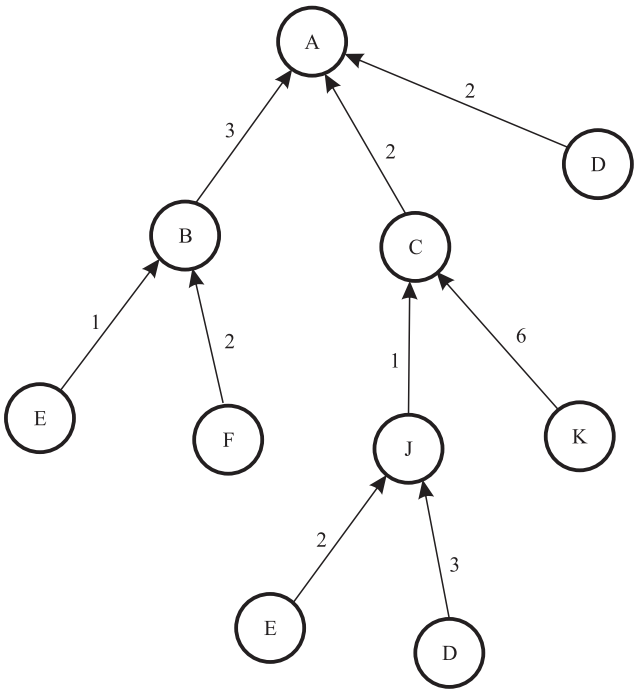


Рис. 1. Представление электронной структуры изделия в виде ориентированного графа-дерева

Во всех машиностроительных отраслях описание производимой продукции принято представлять в виде электронной структуры машиностроительного изделия в соответствии с ГОСТ 2.053—2006 [1]. Электронная структура изделия (ЭСИ) — это конструкторский документ, содержащий состав сборочной единицы, комплекса или комплекта и иерархические отношения (связи) между его составными частями, а также другие данные в зависимости от его назначения.

ГОСТ 2.053—2006 рекомендует представлять ЭСИ в виде ориентированного ациклического графа, вершины которого соответствуют компонентам изделия, а рёбра, соединяющие вершины, — отношениям (связям) между компонентами [1].

Пример такого графа показан на рис. 1. Вершинами графа (обозначены латинскими символами) являются деталесборочные единицы (ДСЕ), а дуги (стрелки) показывают взаимосвязи между ними. Цифры рядом со стрелками указывают входимость ДСЕ в более высокий уровень, т. е. количество деталей или сборочных единиц, применяемых в узле. В данном примере вершина *A* в соответствии с направлением дуг является конечной.

Исходя из такого иерархического представления (см. рис. 1), изготовление изделия должно начинаться с деталей, находящихся на самом нижнем уровне иерархии. Действительно, изготовление сборочной единицы возможно только тогда, когда изготовлены все входящие в её состав компоненты. В приведённом примере изделие *A* может быть изготовлено только после изготовления сборочных единиц *B*, *C* и детали *D*. Сборку узла *B* можно начать после изготовления деталей *E* и *F*.

Соответственно деталями, не являющимися сборочными единицами, будут *D*, *E*, *F* и *K*. Именно с них должно начаться изготовление изделия. Однако не решён вопрос последовательности обработки этих деталей.

На сегодняшний день не существует абсолютно точного метода решения этой задачи. В различных алгоритмах применяют разные подходы к определению порядка обработки деталей, причём эффективность алгоритмов может отличаться в зависимости от выбранного изделия.

Наиболее часто используют подход определения порядка обработки ДСЕ в зависимости от уровня их вхождения в изделие. Этот подход применяют при реализации методов MRP-II (*Manufacture Resources Planning* — пла-

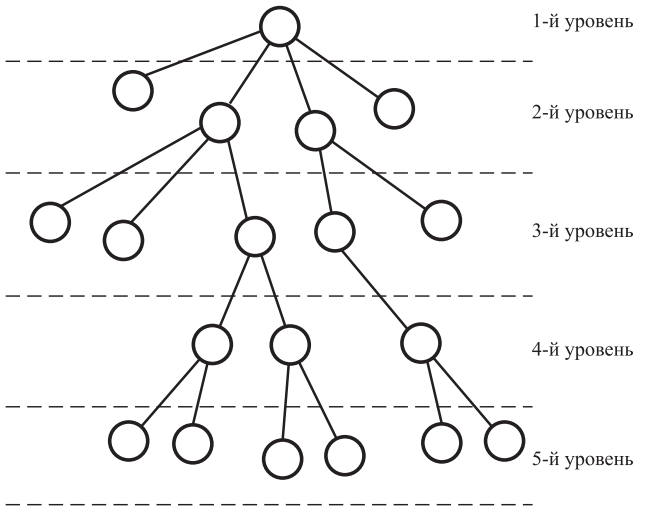


Рис. 2. Схема определения последовательности изготовления ДСЕ по уровням вхождения в ЭСИ

нирование производственных ресурсов) и APS (*Advanced Planning & Scheduling* — система синхронного планирования) при помощи сетевых моделей [2]. Разделение по уровням производится довольно просто. Само изделие представляет первый уровень. Все узлы, входящие в изделие, составляют второй уровень. ДСЕ, входящие в узлы второго уровня, составляют третий уровень и т. д. Схема разделения ДСЕ по уровням представлена на рис. 2.

При этом подходе изготовление ДСЕ начинают с самого нижнего уровня. Выбирают все детали, находящиеся на нижнем уровне, затем в порядке очерёдности рассматривают технологию их изготовления и осуществляют расстановку операций в план производства, т. е. составляют расписание. После обработки всех ДСЕ-уровней происходит переход на уровень выше и операция повторяется.

Этот достаточно понятный механизм имеет свои положительные и отрицательные стороны. Серьёзным упущением данного подхода является игнорирование времени изготовления составляющих изделие компонентов. На первый взгляд, можно предположить, что чем ниже уровень вхождения, тем раньше надо изготавливать деталь или узел, тем больше времени пройдет от начала его изготовления до сборки готового изделия. Однако время изготовления ДСЕ определяется технологическим процессом и нормами времени. Поэтому в некоторых случаях для изготовления деталей верхнего уровня требуется больше времени, чем для изготовления сборочных единиц, входящих в группу компонентов нижних уровней.

При решении задач планирования часто используют опыт массового и крупносерийного производства изделий, имеющих значительные преимущества. Основываясь на опыте производства определённого изделия, предприятие отлаживает как технологические процессы его изготовления, так и планирование производства, и очерёдность запуска ДСЕ. В мелкосерийном и единичном производстве, когда почти каждое изделие является новым, ситуация более сложная. Здесь довольно трудно предусмотреть и определить порядок изготовления ДСЕ. Требуется разработка новых алгоритмов и методов, учитывающих трудовое нормирование операций технологического процесса.

Задачу упорядочения обработки деталей предлагается решить группировкой ДСЕ не по уровням вхождения в ЭСИ (граф), а по слоям. В первый слой отбирают все висячие вершины графа, т. е. листья, степень которых равна единице. Второй слой образуют вершины, которые станут листьями после удаления первого слоя (рис. 3).

Отождествляя удаление листьев графа с процессом послойного срезания крайних элементов при стрижке деревьев и кустарников, рассматриваемый алгоритм назовем "Опадающие листья".

Последовательность обработки деталей и узлов определяется в пределах каждого слоя. В первую очередь обрабатывают детали (сборочные единицы), имеющие самый длинный технологический цикл изготовления. Затем

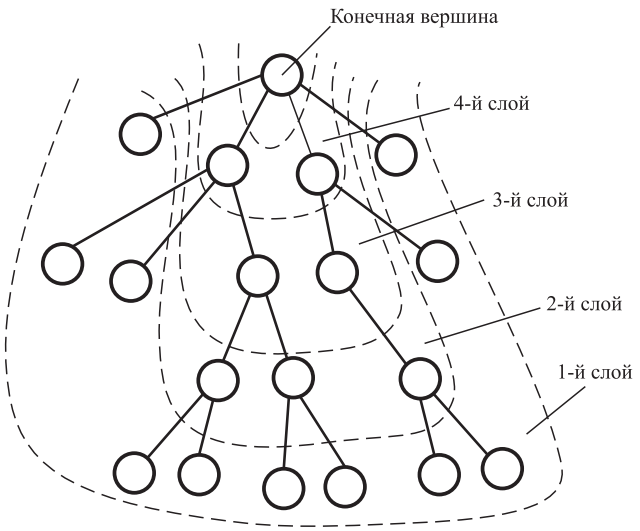


Рис. 3. Схема определения последовательности изготовления ДСЕ по слоям (алгоритм "Опадающие листья")

рассматривают все ДСЕ в порядке убывания длительности технологического цикла.

Длину технологического (производственного) цикла определяют следующим образом. Составляют список вершин первого слоя (листьев), имеющих степень 1. Поскольку степенью вершины называется количество рёбер, инцидентных ей, то в графе $G = (V,E)$, где $V = \{v_1,..., v_n\}$ — множество вершин, а $E = \{e_1, ..., e_m\}$ — множество дуг, требуется найти вершины [3, 4]:

$$v_i \in V, \deg(v_i) = 1.$$

Далее для каждой вершины полученного множества определяется простая цепь, соединяющая вершину с корнем дерева. Цепь — это чередующаяся последовательность вершин и рёбер (v_0, e_1, v_1, e_2, ..., v_{k-1}, e_k, v_k), где v_{i-1}, и v_i являются концами ребра e_i. Простой цепью называется цепь, не содержащая повторяющиеся вершины. Простая цепь в ориентированном графе имеет название "путь". Длиной пути называют количество составляющих его рёбер [3, 4].

Дерево $G = (V, E)$ можно представить в виде графа со взвешенными рёбрами. Обозначим c_i — вес ребра e_i, соединяющего вершины v_i и v_j.

Тогда длину пути определяют как сумму весов рёбер, составляющих путь:

$$P_{ij} = \sum_{k=i}^{j} c_k,$$

где P_{ij} — путь из вершины v_i в вершину v_j.

В качестве весов рёбер предлагается использовать длину технологического цикла производства ДСЕ с учётом её применяемости в изделии. Под применяемостью в изделии понимается количество экземпляров данной ДСЕ (с учётом входимости во все сборочные узлы), необходимых для изготовления изделия.

Соответственно весом ребра является время изготовления всех экземпляров рассматриваемой детали или узла. Тогда длина пути — это время, затраченное на изготовление всех ДСЕ, включённых в путь. Исходя из этого, введено обозначение длины пути T_n, которую вычисляют по формуле:

$$T_n = \sum_{i=1}^{m} T_{\text{ДСЕ}i},$$

где $T_{\text{ДСЕ}i}$ — время изготовления i-й ДСЕ; m — количество ДСЕ пути.

Время изготовления ДСЕ ($T_{\text{ДСЕ}i}$) равно сумме времени выполнения каждой технологической операции:

$$T_{\text{ДСЕ}} = \sum_{j=1}^{k} T_{\text{оп}j},$$

где $T_{\text{оп}j}$ — время изготовления j-й операции; k — количество операций в технологическом процессе изготовления ДСЕ.

Время выполнения операции складывается из двух категорий времени: подготовительно-заключительного и штучного:

$$T_{\text{оп}} = T_{\text{п.з}} + T_{\text{шт}} \left\lceil \frac{n}{\text{КОИД}} \right\rceil,$$

где $T_{\text{п.з}}$ — подготовительно-заключительное время; $T_{\text{шт}}$ — штучное время; n — партия запуска ДСЕ (в рассматриваемой работе приравнивается к применяемости ДСЕ в изделии); КОИД — количество одновременно изготавливаемых деталей.

Таким образом, порядок обработки ДСЕ определяется ранжированием списка ДСЕ в порядке уменьшения длины пути (времени изготовления).

Алгоритм состоит из следующих шагов:

Шаг 1. Определение висячих вершин — "листьев" в электронной структуре изделия.

Шаг 2. Определение длины пути от каждого листа до вершины.

Шаг 3. Определение порядка обработки деталесборочных единиц (листьев) в текущем слое.

Шаг 4. Расстановка технологических операций по рабочим местам в соответствии с загрузкой.

Шаг 5. Удаление "листьев".

После расстановки технологических операций всех ДСЕ, являющихся листьями, соответствующие им вершины вычёркиваются из дерева. В результате чего, следующие вершины, в которые входили вычеркнутые, становятся листьями. Процесс повторяется с шага 1 для второго и всех последующих слоёв до тех пор, пока не будут вычеркнуты все вершины графа.

Алгоритм "Опадающие листья" реализован в виде программного модуля на платформе 1С:УПП и внедряется на машиностроительном предприятии ОАО "Дальрыбтехцентр" (г. Владивосток). Предварительная апробация алгоритма на реальных изделиях, выпускаемых предприятием, показала, что с увеличением деталесборочных единиц и усреднённого

количества операций в технологических процессах возрастает эффективность алгоритма "Опадающие листья" по сравнению с алгоритмом, основанном на уровнях вхождения. Для небольших изделий с числом около 100 ДСЕ и 500—600 деталеопераций использование алгоритма "Опадающие листья" позволяет сократить технологический цикл изготовления изделия до 20 % и повысить загрузку рабочих мест в среднем до 25...30 %.

Исследование выполнялось в Дальневосточном федеральном университете (г. Владивосток) и на машиностроительном предприятии ОАО "Дальрыбтехцентр" (г. Владивосток).

Библиографический список

1. **ГОСТ 2.053—2006**. Единая система конструкторской документации. Электронная структура изделия. Общие положения. М.: Стандартинформ, 2007.

2. **Питеркин С.В.** Когда MRP не работает // Директор информационной службы. 2004. № 1. С. 1—3.

3. **Домнин Л.Н.** Элементы теории графов: учеб. пособие. Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2007. 144 с.

4. **Харари Ф., Палмер Э.** Перечисление графов. М.: Мир, 1977. 326 с.

УДК 622.663.3

А.В. Николаев, канд. техн. наук, доц.
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)
nikolaev0811@mail.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА ВОЗДУХОПОДГОТОВКИ НА ПОДЗЕМНЫХ ГОРНО-ДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Рассмотрена конструкция шахтной калориферной установки (ШКУ), применяемой для нагрева воздуха в холодное время года и охлаждения его в тёплое. Приведённая ШКУ, состоящая из пластинчатых элементов, являющихся рёбрами трубок с теплоносителем (хладоносителем), располагается в калориферном канале. Система автоматизации, в зависимости от параметров (температуры, барометрического давления, влажности и т. д.) наружного воздуха, управляет процессом подачи теплоносителя (хладоносителя). Приведены структурные схемы управления электроприводами нагнетательных вентиляторов и сетевого насоса, регулируемых для поддержания требуемой смешиваемости нагретого (охлаждённого) в ШКУ и подсасываемого через надшахтное здание потоков воздуха.

Ключевые слова: шахтная калориферная установка; пластинчатые элементы; автоматизированный электропривод; система автоматизации; кондиционирование воздуха.

The design of the mine air heater installation (MAHI) used for heaing the air in the cold season and cooling it in a warm season is considered. This MAHI, consisting of lamellar elements wich represent the ribs of the tubes with heat carrier (cold carrier), is located in the channel of air heater. The automation system, depending on the external air parameters (temperature, barometric pressure, humidity, etc.) controls the heat carrier (cold carrier) supplying. The structural control schemes for electric drive of force fans and network pump, adjusted for maintenance of the demanded airflow miscibility: heated (cooled) in the MAHI and coming through pithead.

Key words: *mine air heater installation; lamellar elements; automatic electric drive; automation system; air conditioning.*

Введение. На шахтах и рудниках существует проблема, связанная с малой эффективностью шахтных калориферных установок (ШКУ), в результате чего наблюдается значительный перерасход энергоресурсов (природного газа, расходуемого в котельной установке на нагрев воды — для водяных ШКУ). В связи с решением Правительства РФ, принятым в 2012 г., необходимо разработать мероприятия, обеспечивающие ресурсосбережение при работе ШКУ.

Подаваемый в ШКУ воздух необходимо нагревать до температуры не ниже +2 °С [1], но фактически наблюдается ситуация, когда данная температура значительно превышает установленное правилами безопасности значение. Это ведёт к нарушению температурного режима в них, а также приводит к перерасходу энергоресурсов [2]. Связано это с тем, что в воздухоподающий ствол поступает два потока воздуха: нагретый в ШКУ ($Q_{\text{ШКУ}}$) и подсасы-

ваемый через надшахтное здание ($Q_{н.зд}$) за счёт давления, создаваемого главной вентиляторной установкой (ГВУ) (рис. 1). Для поддержания требуемой "смешиваемости" необходимо регулировать производительность и давление, развиваемое нагнетательными вентиляторами ШКУ. При отсутствии подобного регулирования в воздухоподающих стволах наблюдается неравномерное распределение температурных полей, что приводит к нарушению герметизации межтюбинговых уплотнений крепи.

Основная задача настоящей работы — разработка технических решений, позволяющих повысить эффективность работы ШКУ и обеспечить режим, при котором в воздухоподающем стволе будет наблюдаться равномерное распределение тепловых потоков посредством создания системы автоматизации процесса воздухоподготовки.

Предлагаемая конструкция шахтной калориферной установки. В работе [3] для воздухоподготовки предложено использовать пластины, являющиеся рёбрами трубок с теплоносителем (рис. 2). Основным достоинством предложенного способа является большая поверхность теплообмена нагревательных пластин с подаваемым в установку воздухом, в результате чего можно снизить температуру нагрева пластин, а следовательно, уменьшить затраты энергоресурсов на их работу. В связи с тем, что нагревательные пластины будут размещены в калориферном канале, для установки не потребуется выделять дополнительное место на промплощадке.

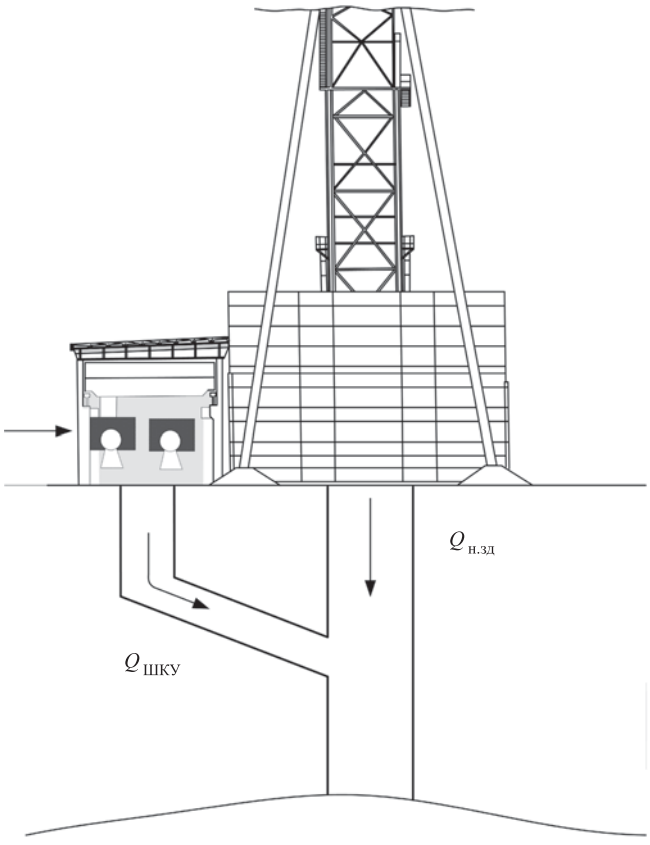


Рис. 1. Поступление воздуха в воздухоподающий ствол

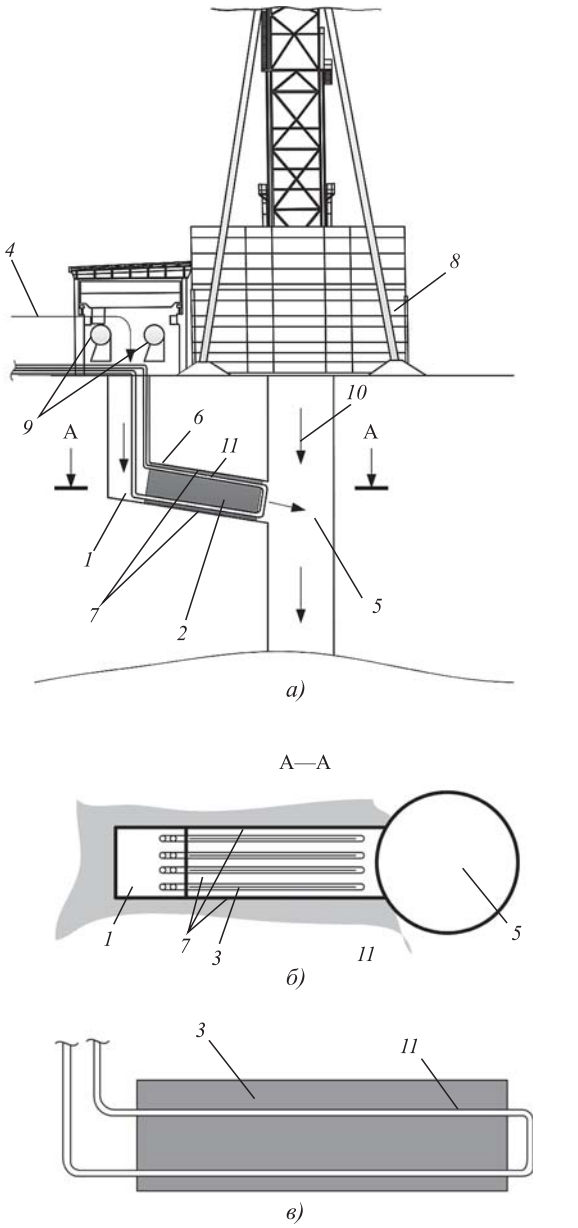


Рис. 2. Водяная ШКУ, расположенная в калориферном канале:

а — вид сбоку; *б* — вид сверху (разрез); *в* — пластинчатый элемент с расположенной в нём трубкой с теплоносителем; *1* — калориферный канал; *2* — калориферная установка; *3* — пластинчатый элемент; *4* — наружный воздух; *5* — воздухоподающий ствол; *6* — нижняя часть калориферного канала; *7* — теплоизоляционный слой; *8* — надшахтное здание; *9* — нагнетательные вентиляторы; *10* — наружный воздух, подсасываемый через надшахтное здание; *11* — теплообменные трубки

Также в работе [3] предлагается по периметру калориферного канала размещать теплоизоляционный материал либо термостекло (thermo glass) [4], в результате чего в ШКУ практически исключаются теплопотери при осуществлении воздухоподготовки.

Кроме подогрева воздуха, подаваемого в шахту в холодное время года, при подобной конструкции ШКУ предусмотрено кондиционирование (охлаждение и осушение) воздуха в теплое время года. В этом случае система автоматизации подачи теплоносителя (хладоносителя) в ШКУ за счёт управляемых задвижек, в зависимости от температуры наружного воздуха, переключает источники подачи воды, либо, при отсутствии необходимости в воздухоподготовке, полностью отключает систему теплоснабжения (рис. 3).

В воздухоподающий ствол через надшахтное здание подсасывается наружный воздух (см. рис. 1). Для смешивания нагретого (охлаждённого) в ШКУ и подсасываемого через надшахтное здание наружного потоков воздуха необходимо регулировать режим работы нагнетательных вентиляторов, а также процесс подачи теплоносителя (хладоносителя) в установку.

Теплопроизводительность ШКУ регулируется изменением производительности нагнетательных вентиляторов и расходом теплоносителя (хладоносителя) как совместно, так и в отдельности. Расход теплоносителя регулируется производительностью сетевого насоса, положением управляемых задвижек, либо их совместным использованием.

В случае применения ШКУ для кондиционирования воздуха под пластинчатыми элементами необходимо предусмотреть ёмкость для сбора сконденсированной влаги с возможностью её откачки из калориферного канала.

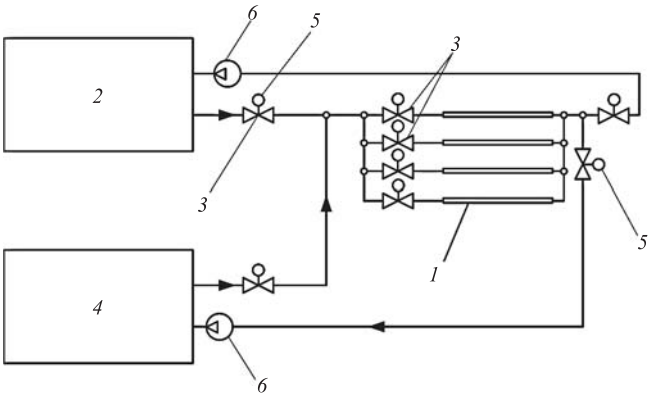


Рис. 3. Схема подачи теплоносителя в калориферную установку:
1 — пластинчатый элемент; *2* — котельная установка; *3* — управляемые задвижки; *4* — система охлаждения хладоносителя; *5* — устройство управления приводами задвижек; *6* — сетевые насосы

Расчётные зависимости для определения температуры воздуха на выходе предлагаемой шахтной калориферной установки. Количество тепла, выделяемого теплообменником согласно работе [5], определяется по формуле

$$q_{\text{т.о}} = k_{\text{п}} F \Delta t_{\text{ср.л}},$$

где $k_{\text{п}}$ — коэффициент полной теплопередачи; F — площадь поверхности теплообмена; $\Delta t_{\text{ср.л}} = \dfrac{\Delta t_{\text{б}} - \Delta t_{\text{м}}}{2{,}3 \ln \dfrac{\Delta t_{\text{б}}}{\Delta t_{\text{м}}}}$ — величина среднего температурного напора; $\Delta t_{\text{б}}$ и $\Delta t_{\text{м}}$ — разность температур на поверхности теплообмена.

Коэффициент полной теплопередачи для оребрённых поверхностей [6] определяется по формуле

$$k_{\text{п}} = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_{\text{н}} \eta_{\text{р}} \xi} + \dfrac{\delta_{\text{р}}}{\lambda_{\text{р}}} \dfrac{F_{\text{н}}}{F_{\text{вн}}} + \dfrac{1}{\alpha_{\text{вн}}} \dfrac{F_{\text{н}}}{F_{\text{вн}}}},$$

где $\alpha_{\text{н}}$ — коэффициент теплоотдачи между воздухом и наружной поверхностью теплообменника; $\eta_{\text{р}} = \dfrac{\text{th}(h\sqrt{m})}{h\sqrt{m}}$ — коэффициент эффективности ребра прямоугольного сечения; m — безразмерный коэффициент эффективности ребра [6]; $\alpha_{\text{вн}}$ — коэффициент теплоотдачи между внутренней стенкой теплообменника и воздухом; ξ — безразмерный показатель соотношения количества полного и явного тепла; $\delta_{\text{р}}$ — толщина ребра; $\lambda_{\text{р}}$ — коэффициент теплопроводности; $F_{\text{н}}/F_{\text{вн}}$ — коэффициент оребрения — отношение оребрённой поверхности к поверхности теплообменника; th — гиперболический тангенс; h — высота ребра.

Величина m согласно работе [6] вычисляется по формулам:

для режимов нагрева и охлаждения без конденсации влаги

$$m = \frac{2\alpha_{\text{н}}}{\delta_{\text{р}} \lambda_{\text{р}}};$$

для режимов охлаждения с конденсацией влаги

$$m = \frac{2\alpha_{\text{н}} \xi}{\delta_{\text{р}} \lambda_{\text{р}}}.$$

При режимах нагрева или сухого охлаждения $\xi = 1$, а при режиме конденсации влаги на ребре определяется отношением полного ($Q_{\text{п}}$) и явного ($Q_{\text{я}}$) тепла [6]:

$$\xi = \frac{dQ_{\text{п}}}{dQ_{\text{я}}}.$$

В инженерной практике для вычисления коэффициента теплоотдачи между внутренней стенкой теплообменника и воздухом [5] используется формула

$$\alpha_{\text{вн}} = (1230 + 19t_{\omega})\frac{\omega_{\text{тн}}^{0,8}}{d_{\text{э}}^{0,2}},$$

где t_{ω} — температура теплоносителя; $\omega_{\text{тн}}$ — скорость потока теплоносителя в трубках теплообменника.

Эквивалентный диаметр трубки запишется в виде:

$$d_{\text{э}} = \frac{2(s_1 - d_{\text{Т}})(s_{\text{р}} - \delta_{\text{р}})}{(s_1 - d_{\text{Т}}) + (s_{\text{р}} - \delta_{\text{р}})},$$

где S_1 — шаг трубок в плоскости, перпендикулярной направлению движения воздуха (поперечный шаг); $S_{\text{р}}$ — шаг ребер; $d_{\text{Т}}$ — наружный диаметр трубки.

При длине пластины l число Рейнольдса [5, 6] определяется по формуле

$$\text{Re}_{\text{ж}l} = \frac{\omega l}{v} = \frac{Q_{\text{КУ}} l}{S_{\text{КК}} v}, \qquad (1)$$

где ω — скорость движения воздуха в калориферном канале; v — коэффициент кинематической вязкости воздуха; $S_{\text{КК}}$ — сечение калориферного канала; $Q_{\text{КУ}}$ — объём воздуха, поступающего в калориферный канал.

При $\text{Re}_{\text{ж}l} > 10^5$ режим течения воздуха в пограничном слое у поверхности пластины будет являться турбулентным.

Среднее значение коэффициента теплоотдачи ($\alpha_{\text{н}}$) при обтекании пластины [5, 6] можно записать в виде:

при ламинарном режиме течения воздуха

$$\overline{\text{Nu}}_{\text{ж}l} = 0,57\,\text{Re}_{\text{ж}l}^{0,5}; \qquad (2)$$

при турбулентном режиме течения воздуха

$$\overline{\text{Nu}}_{\text{ж}l} = 0,032\,\text{Re}_{\text{ж}l}^{0,8}. \qquad (3)$$

Подставив выражение (1) в уравнения (2) или (3), получим величину критерия Нуссельта $\overline{\text{Nu}}_{\text{ж}l}$.

Тогда среднее значение коэффициента теплоотдачи пластиной воздуху имеет вид

$$\alpha_{\text{н}} = \overline{\text{Nu}}_{\text{ж}l}\frac{\lambda_{\text{ж}}}{l},$$

где $\lambda_{\text{ж}}$ — теплопроводность воздуха.

При оборудовании калориферного канала термостеклом температура воздуха на выходе из ШКУ [7] находится итерационным путём по формуле

$$t_2^{(i)} = \frac{c_{\rho 1}}{c_{\rho 1}^{(i-1)}}t_1 + \frac{P}{S_{\text{КК}}\rho_{\text{ср}}^{(i-1)}c_{\rho 2}^{(i-1)}\omega}, \qquad (4)$$

где t_1 и t_2 — температура воздуха соответственно наружного и на выходе из ШКУ; $c_{\rho 1}$ и $c_{\rho 2}$ — изобарная теплоёмкость воздуха, определяемая по табличным значениям [7] для температур t_1 и t_2; P — тепловая мощность термостекла (равна активной электрической мощности); $\rho_{\text{ср}}$ — плотность воздуха, определяемая по среднему значению температур t_1 и t_2; i — номер итерации.

Процесс продолжается до требуемой точности вычислений, которая определяется по формуле

$$\varepsilon = \left|\frac{t_2^{(i)} - t_2^{(i-1)}}{t_2^{(i-1)}}\right| 100\ \%,$$

где $t_2^{(i)}$ и $t_2^{(i-1)}$ — температура воздуха на выходе из калориферного канала, полученная в предыдущей итерации и из уравнения (4).

Применение частотного электропривода для регулирования режимов работы нагнетательных вентиляторов и сетевого насоса. Схема автоматизации подачи теплоносителя в ШКУ представлена на рис. 4.

В зависимости от температуры и давления воды на входе в ШКУ сетевым насосом и управляемой задвижкой *1* регулируется расход теплоносителя (хладоносителя), который, в свою очередь, зависит от параметров наружного воздуха. Требуемое "смешение" потоков воздуха в стволе регулируется режимом работы нагнетательных вентиляторов, управляемых регулируемым электроприводом.

В холодное время года управляемой задвижкой *2* поддерживается требуемый расход прямой воды на собственные нужды (обогрев

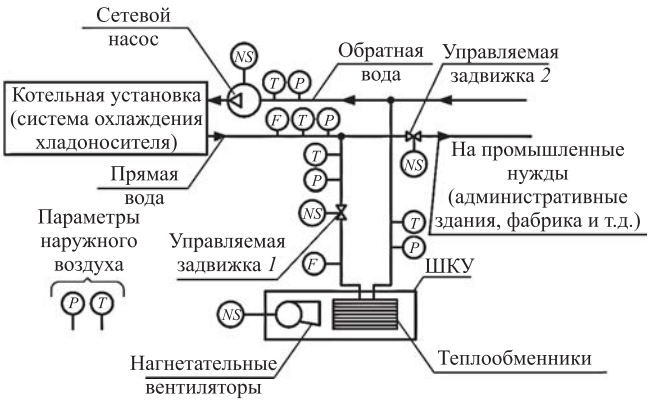


Рис. 4. Структурная схема автоматизации:
P — датчик давления; *T* — датчик температуры; *F* — датчик расхода; *NS* — регулируемый электропривод

административных зданий, для подачи воды на обогатительную фабрику и т. д.).

Для управления режимами работы вентиляторов и насоса [8] наилучшим является вариант скалярного управления электроприводом, при котором осуществляется изменение скорости вращения двигателя путём воздействия на частоту напряжения на статоре (f) при одновременном изменении модуля этого напряжения.

Главным достоинством скалярного управления являются его простота и возможность одновременного управления группой электродвигателей.

При регулировании скорости вращения электродвигателя в классе законов E_1/f (E_1 — ЭДС статора) необходимо повышать фазное напряжение $U_1 = E_1 + I_1R_1$ только на величину падения напряжения I_1R_1 на активном сопротивлении обмотки статора, а способ регулирования скорости асинхронного двигателя получил название — частотное регулирование с *IR*-компенсацией.

Реализация управления, компенсирующего падения напряжения на активном сопротивлении статора асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором нагнетательных вентиляторов, возможна как по отклонению, так и по возмущению, со скалярной *IR*-компенсацией (рис. 5).

Для привода сетевого насоса также используется асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором, мощность которого определяется подачей воды, являющейся теплоносителем (хладоносителем).

Требования к параметрам теплоносителя [9]:

скорость движения воды в трубках калориферов должна находиться в пределах 0,3—0,8 м/с;

давление воды в любой точке гидравлической сети ШКУ не должно превышать предельно допустимое по условиям механической прочности. При этом в холодное время года оно должно быть не менее 0,3—0,5 МПа для предотвращения закипания воды в сети этой установки. Давление на выходе гидравлической сети должно быть не менее 0,1 МПа;

при проектировании ШКУ следует принимать величину расчётной массовой скорости движения воздуха во фронтальном сечении

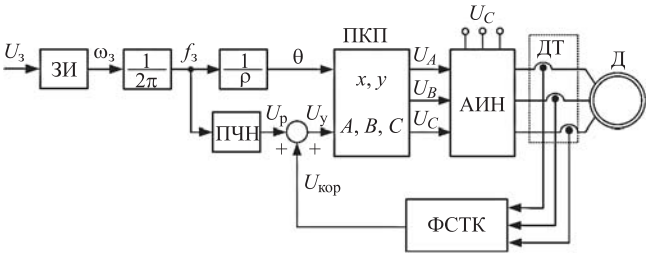


Рис. 5. Реализация управления электроприводом нагнетательных вентиляторов на базе схемы скалярного управления с *IR*-компенсацией:
$U_з$ — напряжение задания; ЗИ — задатчик интенсивности изменения заданной скорости ($\omega_з$) и частоты ($f_з$); ПЧН — преобразователь частота — напряжение; ПКП — преобразователь координат для прямого преобразования двухкоординатной системы напряжения (x, y) в трёхфазную (U_A, U_B, U_C) систему управляемых напряжений автономного инвертора напряжения (АИН); ДТ — датчик трёхфазной системы тока; ФСТК — формирователь системы токовой компенсации; $U_у$ — напряжение управления ПКП; $U_{кор}$ — напряжение *IR*-компенсации; θ — угол пространственного положения двухкоординатной системы x, y обобщённой электромеханической системы электродвигателя; ρ — символ дифференцирования; $U_р$ — напряжение ПЧН; $U_с$ — напряжение сети; *Д* — электродвигатель нагнетательного вентилятора

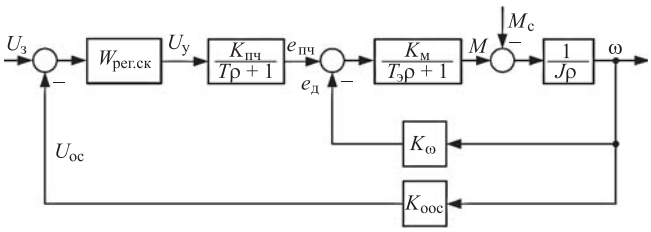


Рис. 6. Структурная схема управления сетевым насосом:
M — электромагнитный момент двигателя; $M_с$ — момент сопротивления; J — суммарный момент инерции электропривода; $T_э$ — электромеханическая постоянная времени; $K_м$ — передаточный коэффициент двигателя по моменту; $K_ω$ — коэффициент внутренней обратной связи по скорости; $e_д$ — противоЭДС двигателя; $e_{пч}$ — ЭДС преобразователя частоты; $K_{пч}$ — передаточный коэффициент преобразователя частоты; $K_{ос}$ — коэффициент обратной связи по скорости; T — постоянная времени преобразователя частоты; $U_з$ — напряжение задания; $U_{ос}$ — напряжение обратной связи; $W_{рег.\ ск}$ — передаточная функция регулятора скорости; $U_у$ — напряжение управления; ρ — символ дифференцирования

в пределах 3,6—5,0 кг/м^{2}с. Величину скорости движения холодного (тёплого) воздуха во входных проёмах — в пределах 3,0—4,0 м/с.

Регулирование расхода теплоносителя (хладоносителя) в зависимости от приведённых выше требований реализовано за счёт системы регулирования, представленной на рис. 6.

Управление режимом работы нагнетательных вентиляторов, сетевого насоса и управляемых задвижек осуществляется системой автоматизации в зависимости от изменяющихся климатических условий.

Таким образом, применение пластинчатых элементов, являющихся рёбрами трубок с теплоносителем, в качестве ШКУ, расположенной в калориферном канале, позволит повысить эффективность нагрева, подаваемого в шахту воздуха. Кроме того, предложенная конструкция ШКУ, помимо нагрева воздуха в холодное время года, позволит использовать установку для кондиционирования его в тёплое время года. Совместное регулирование режимов работы нагнетательных вентиляторов и сетевого насоса позволит обеспечить требуемую смешиваемость нагретого (охлаждённого) в процессе работы ШКУ и подсасываемого через надшахтное здание потоков воздуха.

Предусмотренная в ШКУ система автоматизации, в зависимости от параметров (температуры, барометрического давления, влажности и т. д.) наружного воздуха, контролирует процесс подачи тепло- либо хладоносителя в установку.

Библиографические ссылки

1. **Федеральные** нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых". Серия 03. Вып. 78. М.: ЗАО "Научно-технический центр исследований проблем промышленной безопасности", 2014. 276 с.

2. **Николаев А.В., Постникова М.Ю., Мохирев Н.Н.** Сравнительный анализ потребления тепло- и энергоресурсов шахтными калориферными установками // Вестник ПГТУ. Геология, геоинформационные системы, горно-нефтяное дело. 2010. №5. С. 95—102.

3. **Николаев А.В., Алыменко Н.И., Седунин А.М., Лялькина Г.Б., Николаев В.А.** Шахтная калориферная установка // Патент России № 142085. 2014. Бюл. № 17.

4. **Инфракрасные** стеклянные обогреватели Пион Thermo Glass: [Электронный ресурс] // "Вам тепло" — интернет-магазин климатической техники. URL: http://vamteplo.ru/catalog.18.html. (дата обращения 10.11.2013).

5. **Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С.** Теплопередача: учебник для вузов. М.: Энергоиздат, 1981. 416 с.

6. **Кокорин О.Я.** Установки кондиционирования воздуха. Основы расчёта и проектирования. М.: Машиностроение, 1971. 344 с.

7. **Николаев А.В.** Интенсификация теплообмена в шахтной калориферной установке // Горное оборудование и электромеханика. 2013. № 11. С. 10—13.

8. **Дементьев Ю.Н., Чернышев А.Ю., Чернышев И.А.** Автоматизированный электропривод: учебн. пособие. Томск: Изд-во ТПУ, 2009. 224 с.

9. **Ивановский И. Г.** Проектирование проветривания и калориферных установок шахт: учебн. пособие. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2000. 107 с.

Уважаемые читатели!

Подписку можно оформить в любом почтовом отделении по каталогам:

"Роспечать" — индекс **70537**;

"Пресса России" — индекс **27838**;

"Почта России" — индекс **60267**.

УДК 681.513

А.В. Пролетарский, д-р техн. наук, проф., **Чжо Зин Хтут**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

Pav.@bmstu.ru

СИСТЕМА ДИАГНОСТИКИ БОРТОВЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ СРЕДСТВ

Описан синтез системы диагностики работоспособности измерительных приборов летательного аппарата. Рассмотрены технологии разработки диагностической системы на основе модели погрешностей гироприборов, которые используются для измерения параметров летательного аппарата.

Ключевые слова: диагностика; динамическая система; погрешности гироприборов; модель ошибок; оценка; прогноз.

The diagnostic system synthesis of the measuring instruments performance for aircraft is described. The development technology of the diagnostic systems based on the errors model of the gyroscopic apparatus that are used for measuring of the aircraft parameters are considered.

Key words: diagnostics; dynamic system; gyroscopic apparatus errors; errors model; valuation; forecast.

Введение. Требования по надёжности и точности, предъявляемые к измерительным системам летательного аппарата (ЛА), постоянно возрастают. Для обеспечения требуемых характеристик измерительных систем и приборов необходимо иметь информацию об их состоянии, точностных характеристиках и перспективах изменения этих параметров в будущем. Указанные задачи решаются с помощью различных систем диагностики и контроля [1—3]. Синтез системы диагностики целесообразно осуществлять с использованием подхода алгоритмического конструирования, позволяющего достичь требуемого результата за короткое время с минимальными финансовыми затратами.

Реализация систем контроля и диагностики ЛА осуществляется в бортовой цифровой вычислительной машине (БЦВМ). Цель данной работы — создание прототипа диагностической системы определения и прогнозирования состояния измерительной техники ЛА.

Результатом работы является прототип системы диагностики перспективного ЛА для выявления неисправности, а также анализа функционирования измерительной техники для повышения эффективности её работы.

Жизнеспособность и развитие информационных технологий объясняется тем, что современный ЛА крайне чувствителен к ошибкам в управлении. Ошибки и сбои в работе алгоритмического обеспечения снижают качество функционирования систем управления и могут привести к фатальным результатам.

Поэтому чрезвычайно важно понять, какие измерительные приборы вышли из строя, уровень их точности и перспективы изменения точностных характеристик. Эта информация позволяет принять решение о способах использования сигналов измерительных приборов в системе управления ЛА.

Система автоматического диагностирования представляет собой комплекс программных и аппаратурных средств.

Рассмотрим синтез систем диагностики на примере задачи оценки и прогнозирования погрешностей гироприборов на борту ЛА.

Методы оценки и прогнозирования инструментальных погрешностей гироприборов. В зависимости от характера проявления действующих на ЛА возмущений угловая скорость ухода Ω гироприборов может быть разделена на скорость ухода $\Omega_н$, не зависящую от ускорения, и скорость ухода Ω_p, пропорциональную разбалансировке и зависящую от ускорения. В свою очередь, Ω_p включает в себя скорости ухода Ω_{pI} и Ω_{pII}, пропорциональные осевой и радиальной разбалансировкам соответственно.

Наиболее чувствительной к техническому состоянию гироприбора, определяющему его точностные характеристики, является составляющая Ω_{pI}. В связи с этим для разработки метода оценки и прогнозирования инструментальных погрешностей гироприборов, применяемых в измерительном комплексе (ИК) перспективных ЛА, можно использовать, например, оценку и прогнозирование работо-

способности гироприбора по характеру изменения скорости ухода Ω_{pI}.

Данный метод предусматривает:

определение стабильной составляющей скорости ухода Ω_{pI} на основании информации, полученной в результате измерения её как в процессе предыдущих испытаний, так и по замерам при запуске гироприбора для ввода поправок на эту составляющую в алгоритмы управления;

прогноз величины стабильной составляющей скорости ухода Ω_{pI} ("скачка") на последующий запуск гироприбора и оценку соответствия её заданному допуску;

определение и прогноз точностных характеристик гироприбора на время полёта ЛА при нахождении переменной составляющей скорости ухода Ω_{pI} в пределах заданного допуска.

Последние два пункта позволяют принять решение о возможности постановки гироприбора на борт ЛА.

Разделение общей задачи оценки и прогноза основных инструментальных погрешностей гироприборов на задачу определения величины стабильной составляющей скорости ухода Ω_{pI} при запуске для ввода соответствующих поправок в алгоритмы управления и задачу оценки и прогноза точностных характеристик гироприбора на время полёта ЛА является условным и сделано только из методических соображений удобства решения общей задачи. В действительности указанные задачи находятся в тесной взаимосвязи и в целом раскрывают методологические вопросы индивидуальной оценки и прогноза точностных характеристик отдельного гироприбора, а также определения и компенсации его инструментальных погрешностей.

Представим математическую модель процесса скорости ухода гироприбора Ω_{pI} в следующем виде:

$$\Omega_{M_t} = \ell^3(\Omega_t^3) + \alpha_\Delta(\Delta\Omega_t^3) + \ell^c(\Omega_t^c), \qquad (1)$$

где Ω_{Mt} — скорость ухода гироприбора Ω_{pI}, полученная на основе модели; Ω_t^3, $\Delta\Omega_t^3$ — соответственно значения стабильной и переменной составляющих при данном запуске гироприбора; Ω_t^c — значение "скачка" стабильной составляющей скорости ухода гироприбора от запуска к запуску; $\ell^3, \alpha_\Delta, \ell^c$ — параметры модели.

В связи с тем, что ввод поправок осуществляется на величину Ω_t^3, то для данной задачи примем $\Omega_{M_t} = \ell^3(\Omega_t^3)$, а эффективность ввода поправок на стабильную составляющую скорости будем определять степенью приближения моделируемой скорости ухода к её реальному значению, т. е.

$$/\Omega_t^3 - \Omega_{M_t}/ \leqslant \varepsilon_\Omega \text{ при } t_{изм} \leqslant t_{доп}, \qquad (2)$$

где ε_Ω — точность оценки стабильной составляющей скорости ухода за время её измерения $t_{изм}$, не превышающего допустимого значения $t_{доп}$.

При правильно выбранной структуре модели (1) погрешность оценки Ω_{M_t} будет зависеть только от точности определения параметров модели, характеризующейся стабильностью значений этих параметров во времени по мере накопления измерительной информации.

Для оценки стабильности параметров модели могут быть использованы следующие критерии:

$$K_I = \left|M[\ell^3] - \ell_i^3\right| \leqslant \Delta;$$

$$K_{II} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\ell_i^3 - M[\ell^3])^2}{n-1}} \leqslant \eta_\ell; \qquad (3)$$

$$K_{III} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(\ell_i^3 - \ell_{i-1}^3)^2}{n}} \leqslant \varepsilon_\ell,$$

где $M[\ell^3]$ — математическое ожидание; $\Delta, \eta_\ell, \varepsilon_\ell$ — заданные точности определения параметров модели, получаемые из условия обеспечения минимального влияния инструментальных погрешностей ИК на точность приведения ЛА в заданную область фазового пространства; $i = 1, 2, ..., n$ — последовательность оценок параметров модели.

Исследования показали, что критерий K_{III} является более чувствительным к изменению параметров модели (1).

Для оценки и прогноза точностных характеристик гироприбора по результатам прогноза величины "скачка" стабильной составляющей скорости ухода от запуска к запуску из общей модели (1) воспользуемся слагаемым $\Omega_{M_t} = \ell^c(\Omega_t^c)$, характеризующим процесс изменения "скачка".

При наличии математической модели "скачков" Ω_t^c от запуска к запуску появляется возможность осуществить прогноз её величины и сравнить с заданным допуском при обеспечении требуемой точности определения параметров модели ℓ^c по критерию K_{III}.

Для получения полной оценки прогнозируемых точностных характеристик гироприборов на время полёта ЛА и принятия решения о возможности установки гироприбора на борт необходимо, кроме прогноза последую-

щего "скачка" $\Omega_t^{\text{с}}$ спрогнозировать и оценить соответствие величины переменной составляющей $\Delta\Omega_t^3$ заданному допуску скорости ухода на время полёта ЛА.

Поведение переменной составляющей скорости ухода гироприбора можно описать с помощью второго члена общей модели процесса изменения скорости ухода (1). При этом время нахождения $\Delta\Omega_t^3$ в пределах заданного допуска описывается с помощью смешанного распределения Вейбулла

$$f(t) = \begin{cases} \dfrac{\beta_\Omega}{\alpha_\Omega}(e-\gamma_\Omega)^{\beta_\Omega-1}\exp\left[-\dfrac{(t-\gamma_\Omega)^{\beta_\Omega}}{\alpha_\Omega}\right]; \\ t \geqslant \gamma_\Omega,\ \beta_\Omega > 0,\ \alpha_\Omega > 0 \\ 0 - \text{в остальных случаях}, \end{cases} \quad (4)$$

где α_Ω, β_Ω — параметры масштаба и формы, характеризующие время нахождения $\Delta\Omega_t^3$ в пределах заданного допуска и степень износа гироприбора соответственно; γ_Ω — параметр положения, соответствующий конечному значению времени, до которого выход $\Delta\Omega_t^3$ за допуск невозможен.

При допущении $\gamma_\Omega \approx 0$ вероятность $P(t)$ и среднее время μ_t нахождения $\Delta\Omega_t^3$ в заданном допуске определяются по формулам

$$P(t) = \exp\left[-\frac{t^{\beta_\Omega}}{\alpha_\Omega}\right];\ \mu_t = (\alpha_\Omega)^{\frac{1}{\beta_\Omega}} - \left(1+\frac{1}{\beta_\Omega}\right), \quad (5)$$

где $\Gamma(\circ)$ — гамма-функция.

С учётом того, что процесс изменения скорости ухода при запусках $\Omega_{M_t} = \ell^3(\Omega_t^3)$ может быть описан авторегрессионной моделью

$$\Omega_k^3 = (1+\ell_1^3)\Omega_{k-1} + \ell_1^3\Omega_{k-2}, \quad (6)$$

а процесс изменения "скачков" стабильной составляющей скорости ухода $\Omega_{M_t} = \ell^{\text{с}}(\Omega_t^{\text{с}})$ моделью

$$\Omega_k^{\text{с}} = \ell_1^{\text{с}}\Omega_{k-1}, \quad (7)$$

то для определения параметров моделей могут быть использованы соотношения

$$\ell_t^3 = \frac{\sum\limits_{i=2}^{k}\omega_i\omega_{i-1}}{\sum\limits_{i=2}^{k}\omega_{i-1}^2};\quad \ell_1^{\text{с}} = \frac{\sum\limits_{i=2}^{k}\Omega_i\Omega_{i-1}}{\sum\limits_{i=2}^{k}\Omega_{i-1}^2}, \quad (8)$$

где $\omega_k = \Omega_k - \Omega_{k-1}$ — разность первого порядка; для реальных приборов $\ell_1^3 = 0,03 - 0,2$; $\ell_1^{\text{с}} = 0,15 - 0,5$.

Если для определения параметров Вейбулла в выражении (4) воспользоваться методом максимального правдоподобия, то уравнения для оценки параметров α_Ω и β_Ω будут иметь вид

$$\begin{aligned} &n\alpha_\Omega - \sum_{i=1}^{n} t_i^{\beta_\Omega} = 0; \\ &\frac{n}{\beta_\Omega} + \sum_{i=1}^{n}\ln t_i - \frac{1}{\alpha_\Omega}\sum_{i=1}^{n} t_i^{\beta_\Omega}\ln t_i = 0, \end{aligned} \quad (9)$$

где n — количество информации о времени нахождения переменной составляющей в пределах заданного в формуляре на прибор допуска; t_i — время нахождения переменной составляющей в пределах допуска, полученного по результатам испытаний прибора (i = 1, 2, ..., n).

Для решения системы уравнений (9) воспользуемся методом случайного поиска, который подразумевает нахождение минимальной невязки

$$\Delta E = /E_1/ - /E_2/, \quad (10)$$

где E_1, E_2 — являются соответственно первым и вторым уравнениями системы (9).

В качестве начальных приближений могут быть использованы значения параметров α_Ω и β_Ω, полученные в результате предыдущих испытаний данного прибора или партии приборов. В дальнейших расчётах на каждом шаге поиска в качестве этих значений принимаются величины

$$\bar{h}^{(N)} = \ell\xi^{(N)}, \quad (11)$$

где $\bar{h} = (\alpha_\Omega, \beta_\Omega)^T$; N — количество шагов поиска; ℓ — масштаб, определяемый возможными пределами изменения $\bar{h}$; ξ — нормальное распределение случайной величины.

Поиск прекращается при условии $\Delta E < \varepsilon_2$, где ε_2 — заданная точность решения. Полученные значения α_Ω и β_Ω позволяют определить показатели (5).

Таким образом, изложенный метод позволяет с помощью соотношений (5) и (7) оценить и спрогнозировать работоспособность отдельного гироприбора ИК по его точностным параметрам. При этом прибор допускается к эксплуатации, если выполняются условия

$$\Omega_k^{\text{с}} \leqslant \Omega_{\text{доп}}^{\text{с}};\ P(t) \geqslant P_{\text{зад}};\ \mu_t \geqslant t_{\text{пол}}, \quad (12)$$

где $\Omega_{\text{доп}}^{\text{с}}$ — допустимое значение "скачка" стабильной составляющей скорости ухода Ω_{PI}; $P_{\text{зад}}$ — заданное значение вероятности нахождения переменной составляющей скорости ухода в заданном диапазоне за время полёта ЛА $t_{\text{пол}}$.

Структура и параметры модели (1), а также средние значения $\alpha_\Omega^{ср}, \beta_\Omega^{ср}$, количество запусков прибора n на заводе и значения $P(t)$ и μ_t должны быть определены в условиях завода-изготовителя и записаны в формуляр на гироприбор. После поступления прибора в эксплуатирующую организацию структура и параметры модели не уточняются. В то же время в процессе испытаний гироприбора уточняются параметры Вейбулла с помощью алгоритма

$$\alpha_\Omega = \alpha_\Omega^{ср} - \frac{1}{n+K}(\alpha_\Omega^{ср} - \alpha_T);$$
$$\beta_\Omega = \beta_\Omega^{ср} - \frac{1}{n+K}(\beta_\Omega^{ср} - \beta_T), \qquad (13)$$

где K, α_T, β_T — количество запусков и параметры, определяемые по результатам испытаний гироприбора.

После уточнения α_Ω и β_Ω рассчитываются показатели $P(t)$, μ_t и в соответствии с выражением (12) по результатам испытаний гироприбора принимается решение о возможности его установки на борт ЛА.

Оценку стабильной составляющей Ω_t^3 для ввода поправок на её величину в алгоритмы управления необходимо осуществлять с помощью модели (6) при значении параметра ℓ_1^3, определённого по результатам заводских испытаний гироприбора. Это позволяет существенно сократить требуемый временной интервал для оценки и прогнозирования величины стабильной составляющей скорости ухода гироприбора.

Методы прогнозирования. Прогнозирование состояния ИК ЛА осуществляется на основе априорной математической модели [4]. На современном этапе появилась возможность использовать на борту ЛА эволюционные алгоритмы построения прогнозирующих моделей, которые базируются на методах самоорганизации, генетических подходах и нейронных сетях [5—7]. Также широко используются методы, основанные на идеях идентификации параметров модели с заданной структурой [3].

Применение априорных моделей вида (1) отличается простотой и достаточно высокой точностью, так как базируются на большом статистическом материале.

В алгоритмах прогноза, основанных на идентификации параметров модели с априорно заданной структурой, основная сложность заключается в предварительном выборе адекватной априорной информации о структуре модели.

Эволюционные алгоритмы реализуют механизм естественного отбора. В процессе функционирования алгоритма приспособленность моделей-претендентов в целом возрастает. Эволюционные алгоритмы применяются для решения задач, имеющих много локальных минимумов, а их недостатками при использовании в системах диагностики на борту ЛА являются повышенные требования к производительности вычислительных средств при реализации на борту ЛА, а также необходимость учёта особенностей проектирования алгоритмов (удачный выбор ансамбля критериев селекции алгоритма самоорганизации [8], выбор функции приспособленности генетического алгоритма и др.).

Выводы. Таким образом, разработан подход к задаче синтеза системы диагностики измерительной аппаратуры динамического объекта. Технология синтеза продемонстрирована на примере создания автоматической системы диагностики гироприборов ИК перспективного ЛА. Для оценивания и прогнозирования состояния гироприборов используются априорные модели, алгоритмы идентификации и эволюционные алгоритмы построения прогнозирующих моделей.

Библиографические ссылки

1. **Агеёв В.М., Павлова Н.В.** Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование. М.: Машиностроение, 1990. 375 с.

2. **Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Цибизова Т.Ю.** Системы управления летательными аппаратами и алгоритмы обработки информации. М.: Изд-во МГОУ, 2006. 235 с.

3. **Неусыпин К.А.** Методы контроля технического состояния навигационного комплекса // Автоматизация и современные технологии. 2000. № 7. С. 24—27.

4. **Эйкхофф П.** Основы идентификации систем управления. М.: Мир, 1975. 680 с.

5. **Ивахненко А.Г., Мюллер Й.Я.** Самоорганизация прогнозирующих моделей. Киев: Техника, 1985. 375 с.

6. **Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М.** Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003. С. 432.

7. **Неусыпин К.А.** Разработка модифицированных алгоритмов самоорганизации для коррекции навигационной информации // Автоматизация и современные технологии. 2009. № 1. С. 37—39.

8. **Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Вайс Ю.Л., Шолохов Д.О.** Формирование ансамбля критериев селекции компактного алгоритма самоорганизации // Автоматизация и современные технологии. 2012. № 11. С. 14—16.

УДК 681.513

К.А. Неусыпин, д-р техн. наук, проф., **Чан Нгок Хыонг**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

neysipin@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМИЧЕСКОГО МЕТОДА КОРРЕКЦИИ АВТОНОМНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Рассмотрены способы формирования сигналов коррекции автономной инерциальной навигационной системы. Проведено сравнение компактных алгоритмов коррекции и алгоритма компенсации погрешностей автономной навигационной системы с фильтром Калмана. На основе анализа результатов моделирования алгоритмов коррекции даны рекомендации по их практическому применению.

Ключевые слова: автономная инерциальная навигационная система; алгоритмическая коррекция; углы прецессии.

The correction signals formation methods of the autonomous inertial navigation system are considered. A comparison of compact correction algorithms and error compensation algorithm of the autonomous navigation system with Kalman filter is carried out. On base analysis results of the correction algorithms simulation recommendations for their practical application are given.

Key words: autonomous inertial navigation system; algorithmic correction; precession angles.

Введение. Управление летательными аппаратами (ЛА) осуществляется на основе сигналов с различных датчиков навигационной информации [1—3]. В зависимости от типа ЛА используются навигационные системы и датчики с различными характеристиками. Ниже рассматривается грубая автономная инерциальная навигационная система (ИНС), устанавливаемая на высокоманевренные ЛА, в частности на беспилотные ЛА. ИНС состоит из гиростабилизированной платформы (ГСП) и установленных на ней акселерометров. ГСП построена на базе трёх двухстепенных гироскопов. Преимуществом таких грубых ИНС является невысокая стоимость, хорошая технологическая проработка. Однако точность таких ИНС невысока, при маневрировании ЛА погрешности ИНС достигают неприемлемых величин. Поэтому необходимо корректировать ИНС от внешних источников информации (ГЛОНАСС, РЛС и др.) или осуществлять алгоритмическую коррекцию.

Известные алгоритмические методы коррекции автономных ИНС предполагают формирование компенсационных сигналов для коррекции в структуре ИНС [3—5] и в выходной информации [4, 6]. Точность коррекции зависит от интенсивности маневрирования ЛА, но конкретные данные, на основе которых можно сформулировать рекомендации по применению этих методов, отсутствуют.

На современном этапе развития алгоритмического обеспечения ИНС, корректируемых от внешних датчиков, создано большое количество эффективных высокоточных алгоритмов [5—8]. Алгоритмическое обеспечение ИНС и навигационных комплексов включает алгоритмы оценивания, управления, алгоритмы идентификации и построения прогнозирующих моделей и др. [1, 7, 9—11]. С помощью этих алгоритмов с высокой точностью оцениваются и прогнозируются ошибки ИНС, а также формируются управляющие сигналы на датчики моментов ГСП и первые интеграторы ИНС.

Цель данной работы — исследование компактного алгоритмического способа коррекции автономной ИНС в выходном сигнале и выработка рекомендаций по уровню подробности представления сигналов коррекции.

Компактный алгоритм коррекции автономной ИНС. В условиях интенсивного маневрирования ЛА возникает динамический систематический дрейф ГСП, который может быть уменьшен только алгоритмической компенсацией, а не технологическими методами.

Известен метод компенсации, основанный на приближённом формировании угловых скоростей ГСП вокруг осей стабилизации как функции соответствующих углов прецессии.

Систематический дрейф ГСП вызван нелинейным гироскопическим моментом.

Метод компенсации ошибок ИНС заключается в коррекции выходной информации системы. Этот метод предполагает определение ошибок ИНС, вызванных дрейфом ГСП,

и обусловлен влиянием нелинейных гироскопических моментов.

Недостатком метода является эффект увеличения шумов в сигналах с датчиков углов прецессии, от которых берётся производная по времени. Этот недостаток устраняется с помощью усреднённого сигнала с датчика угла прецессии.

Наиболее полная компенсация погрешностей ИНС возможна посредством алгоритма линейной фильтрации с использованием внешнего источника информации [8]. Однако ИНС, корректируемая от внешнего датчика информации, теряет такое своё ценное качество, как автономность.

Компенсация ошибок ИНС предполагает формирование сигналов коррекции, пропорциональных ошибкам системы в определении скорости, углам отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника и дрейфам ГСП. Эти ошибки автономной ИНС в отсутствии внешнего датчика информации не поддаются непосредственному измерению. Поэтому для формирования компенсационного сигнала необходимо оценить ошибки системы с помощью алгоритма фильтрации. В качестве уравнений объекта в алгоритме фильтрации приняты уравнения ошибок ИНС, выраженные через углы отклонения ГСП относительно опорной системы координат, а в качестве измерений можно принять углы отклонения ГСП от плоскости горизонта и заданного направления в азимуте, сформированные на основе информации, снимаемой с датчиков углов прецессии гироскопов.

Движение гироскопов относительно ГСП описывается следующей системой уравнений [1, 10]:

$$\begin{aligned} J\ddot{\delta} + h\dot{\delta} + H\dot{\Phi}_1 &= H\dot{\Phi}_2\delta + H\dot{\Phi}_3\Phi_2 + M_1;\\ J\ddot{\lambda} + h\dot{\lambda} - H\dot{\Phi}_2 &= H\dot{\Phi}_1\lambda - H\dot{\Phi}_3\Phi_1 + M_2;\\ J\ddot{\vartheta} + h\dot{\vartheta} + H\dot{\Phi}_3 &= H\dot{\Phi}_2\vartheta - H\dot{\Phi}_1\Phi_2 + M_3, \end{aligned} \quad (1)$$

где Φ_1, Φ_2, Φ_3 — угловые координаты ориентации ГСП относительно выбранного сопровождающего трёхгранника; δ, λ, ϑ — углы прецессии гироскопов; J — момент инерции гироскопа относительно оси прецессии; H — собственный кинетический момент гироскопа; h — удельный момент сил скоростного трения вокруг оси прецессии гироскопа; M_i (i = 1, 2, 3) — прочие малые возмущающие моменты, имеющие случайный характер и в дальнейшем не рассматриваемые.

Учитывая, что углы прецессии непосредственно измеряются датчиками углов гироскопов, то углы ориентации ГСП в первом приближении определяются по формулам:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= -\frac{1}{H}\int\left(J\ddot{\delta} + h\dot{\delta}\right)dt;\\ \Phi_2 &= \frac{1}{H}\int\left(J\ddot{\lambda} + h\dot{\lambda}\right)dt;\\ \Phi_1 &= -\frac{1}{H}\int\left(J\ddot{\vartheta} + h\dot{\vartheta}\right)dt. \end{aligned} \quad (2)$$

Подставим выражения первого приближения в исходную систему (1) и определим углы ориентации ГСП во втором приближении:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= -\frac{J}{H}\dot{\delta} - \frac{h}{H}\delta + \\ &+ \frac{1}{H}\int\left[\left(J\ddot{\lambda} + h\dot{\lambda}\right)\delta - \frac{1}{H}\left(J\ddot{\vartheta} + h\dot{\vartheta}\right)\left(J\dot{\lambda} + h\lambda\right)\right]dt;\\ \Phi_2 &= \frac{J}{H}\dot{\lambda} + \frac{h}{H}\lambda + \\ &+ \frac{1}{H}\int\left[\left(J\ddot{\delta} + h\dot{\delta}\right)\lambda + \frac{1}{H}\left(J\ddot{\vartheta} + h\dot{\vartheta}\right)\left(J\dot{\delta} + h\delta\right)\right]dt;\\ \Phi_3 &= -\frac{J}{H}\dot{\vartheta} - \frac{h}{H}\vartheta + \\ &+ \frac{1}{H}\int\left[\left(J\ddot{\lambda} + h\dot{\lambda}\right)\vartheta + \frac{1}{H}\left(J\ddot{\delta} + h\dot{\delta}\right)\left(J\dot{\lambda} + h\lambda\right)\right]dt. \end{aligned} \quad (3)$$

Таким образом, получены формализованные зависимости углов ориентации ГСП от углов прецессии гироскопов. Сформированные в соответствии с формулами (2) и (3) углы ориентации можно использовать в алгоритме оценивания в качестве вектора измерений.

Однако следует заметить, что полученные углы Φ_1, Φ_2, Φ_3 несколько отличаются от истинных углов ориентации ГСП. Отличие обусловлено тем, что подынтегральные функции получены методом последовательного приближения. Углы ориентации ГСП в третьем приближении будут содержать в подынтегральных функциях члены третьего порядка малости, количественная роль которых столь незначительна, что их, как правило, не учитывают и ограничиваются вычислением углов ориентации ГСП только во втором приближении. Таким образом, используя информацию с датчиков углов гироскопов, можно непрерывно вычислять углы ориентации ГСП.

Оценка вектора состояния используется для компенсации погрешностей ИНС в выходной информации.

Наиболее полная компенсация ошибок ИНС проводится методами линейной фильтрации. Формирование компенсационных сигна-

лов осуществляется на основе информации с датчиков углов гироскопов.

В качестве измерений в алгоритме оценивания можно использовать погрешности ИНС в определении скорости, которые запишутся в виде:

$$\begin{aligned} \delta V_x &= \int\left(-g\Phi_1 + f_y\Phi_3\right)dt; \\ \delta V_y &= \int\left(-g\Phi_2 + f_x\Phi_3\right)dt, \end{aligned} \qquad (4)$$

где f_x, f_y — проекции абсолютного ускорения ЛА на оси ГСП.

В уравнениях (4) углы отклонения ГСП относительно сопровождающего трёхгранника определяются выражениями (2) или (3), а проекции горизонтального абсолютного ускорения ЛА на оси ГСП измеряются непосредственно акселерометрами.

В условиях дефицита мощности БЦВМ используют выражения (2), (3) и (4) в качестве компенсационных сигналов (алгоритм оценивания не используется). По сравнению с методом компенсации ошибок ИНС с помощью алгоритмов оценивания этот метод отличается меньшей точностью. Относительно низкая точность компенсации обусловлена тем, что сформированные углы отклонения платформы не адекватны истинным углам её отклонения относительно сопровождающего трёхгранника. К преимуществам предложенного метода формирования компенсационного сигнала следует отнести значительно меньший объём машинной памяти, необходимый для реализации компенсационных сигналов.

Результаты экспериментальных исследований. Для проверки работоспособности и эффективности представленных методов в процессе проведения математического моделирования используются тестовые модели [1, 11]: модель горизонтального канала погрешностей ИНС и динамическая модель ГСП.

На рис. 1 представлены результаты моделирования угла отклонения ГСП, полученные с помощью модели погрешностей ИНС и сформированные измерения угла отклонения ГСП в соответствии с формулой (2).

На рис. 2 представлены результаты моделирования угла отклонения ГСП, полученные с помощью модели погрешностей ИНС и сформированные измерения угла отклонения ГСП в соответствии с формулой (3).

На рис. 3 представлены углы отклонения ГСП при увеличении интенсивности измерительного шума на порядок и сформированные

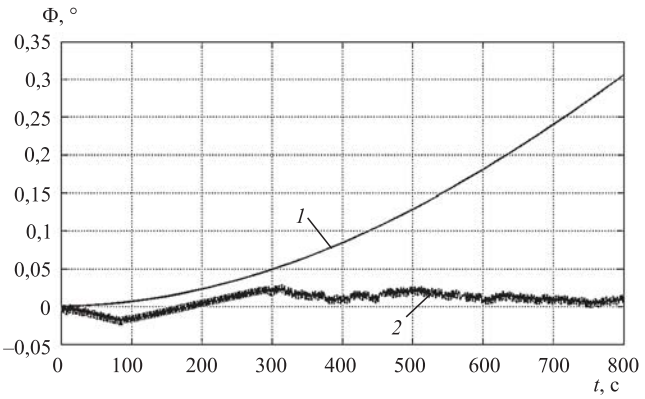


Рис. 1. Углы отклонения ГСП и сформированный сигнал коррекции в первом приближении:
1 — угол отклонения ГПС, полученный с помощью модели погрешностей ИНС; *2* — сформированное измерение угла отклонения ГСП в соответствии с формулой (2)

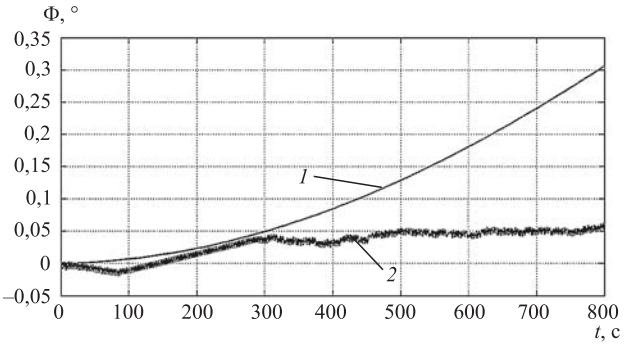


Рис. 2. Углы отклонения ГСП и сигнал коррекции во втором приближении:
1 — угол отклонения ГПС, полученный с помощью модели погрешностей ИНС; *2* — сформированное измерение угла отклонения ГПС в соответствии с формулой (3)

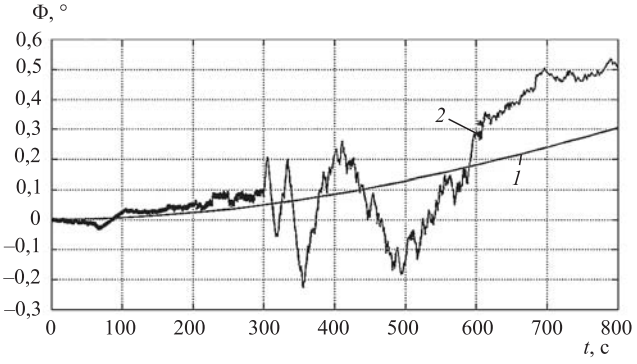


Рис. 3. Углы отклонения ГСП и сигнал коррекции (2) при интенсивном маневрировании ЛА:
1 — угол отклонения ГПС, полученный с помощью модели погрешностей ИНС; *2* — сформированное измерение угла отклонения ГПС в соответствии с формулой (2)

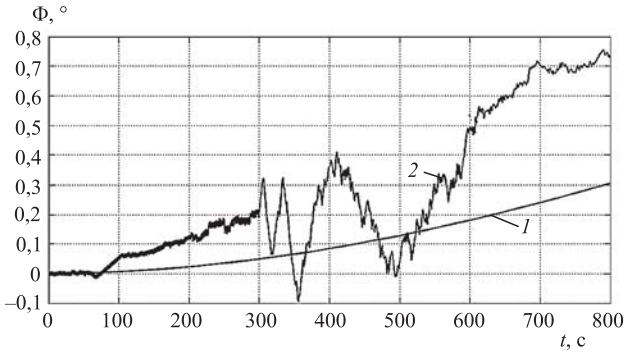


Рис. 4. Углы отклонения ГСП и алгоритм коррекции (3) при интенсивном маневрировании ЛА:
1 — угол отклонения ГПС, полученный с помощью модели погрешностей ИНС; *2* — сформированное измерение угла отклонения ГПС в соответствии с формулой (3)

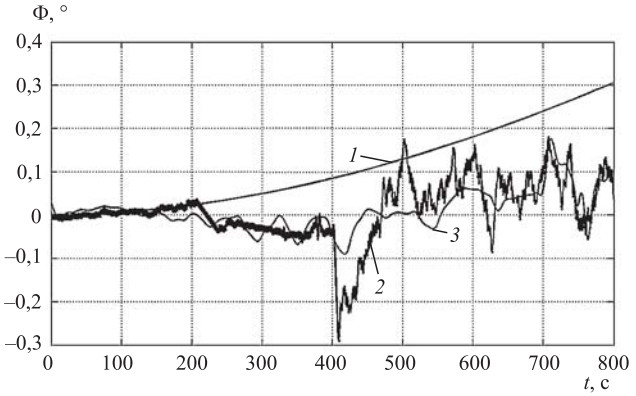


Рис. 5. Углы отклонения ГСП и его оценки с помощью адаптивного алгоритма оценивания:
1 — угол отклонения ГПС, полученный с помощью модели погрешностей ИНС; *2* — сформированное измерение угла отклонения ГПС в соответствии с формулой (2); *3* — оценка угла отклонения

измерения по формуле (2). Увеличение измерительного шума проводится на интервале 300—800 с.

На рис. 4 представлены углы отклонения ГСП при увеличении интенсивности измерительного шума и сформированные измерения по формуле (3). Увеличение измерительного шума проводится на интервале 300—800 с.

На рис. 5 представлены результаты моделирования угла отклонения ГСП и его оценки с помощью адаптивного алгоритма оценивания, являющегося прямой модификацией фильтра Калмана [1, 8, 11].

Анализ результатов моделирования. В результате анализа полученных графиков можно сделать следующие выводы. Углы отклонения ГСП, полученные с помощью математической модели погрешностей ИНС, несколько отличаются от сформированных углов отклонения ГСП. Отличие обусловлено тем, что учитывается только динамическая составляющая при формировании углов отклонения ГСП на основе сигналов с датчиков углов прецессии.

В условиях умеренного маневрирования ЛА формирование компенсационных сигналов по формуле (3) позволяет получить достаточно хорошие результаты.

При интенсивном маневрировании ЛА для формирования компенсационных сигналов целесообразно использовать формулу (2), так как применение более подробного представления углов ГСП в соответствии с выражением (3) приводит к увеличению ошибок компенсации. Для увеличения точности коррекции ИНС рекомендуется использовать адаптивные алгоритмы оценивания. Точность коррекции в этом случае возрастает, но требуются большие вычислительные затраты при реализации алгоритма коррекции автономной ИНС.

Заключение. Таким образом, представлены и исследованы способы формирования компенсационных сигналов автономной ИНС, а также вектора измерений, позволяющие использовать алгоритм оценивания для коррекции автономной ИНС в выходном сигнале.

Сформированные сигналы представляют собой зависимости углов отклонения ГСП, а также ошибок ИНС в определении скорости от углов прецессии гироскопов.

Применение представленного метода компенсации ошибок ИНС позволяет значительно повысить точность выходной информации о навигационных параметрах ЛА. На основе проведённого математического моделирования даны рекомендации по способу формирования измерительного сигнала для алгоритма оценивания в зависимости от требуемой точности определения навигационных параметров ЛА.

Библиографические ссылки

1. **Пролетарский А.В., Никифоров В.М., Неусыпин К.А.** Исследование и разработка систем управления и навигационных комплексов летательных аппаратов. М.: ИИУ МГОУ, 2014. 232 с.

2. **Антохин А.И., Власов А.И., Косолапов И.А.** Концепция системы стабилизации на базе МЭМС гироскопа // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2011. № 10. С. 51.

3. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Кузнецов И.А.** Исследование особенностей спутниковых навигационных систем. В сб. "Теоретические и практические исследования XXI в.". Труды междунар. науч.-практ. конф.. Москва, 2014. С. 579—583.

4. **Пролетарский А.В., Неусыпин К.А., Шэнь К.** Алгоритмические способы коррекции автономных инерциальных навигационных систем. В сб. "Управление в морских и аэрокосмических системах (УМАС-2014)". 7-я Российская мультиконф. по проблемам управления. ГНЦ РФ ОАО "КОНЦЕРН "ЦНИИ" ЭЛЕКТРОПРИБОР". 2014. С. 637—641.

5. **Фам С.Ф., Цибизова Т.Ю.** Методы построения математических моделей: генетические алгоритмы // Достижения вузовской науки: Труды междунар. науч.-практ. конф. (Московская область, г. Дедовск, 15—20 сентября 2014 г.). Часть 2. М.: ИИУ МГОУ, 2014. С. 158—162.

6. **Цибизова Т.Ю.** Методы идентификации нелинейных систем управления // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 1. URL: http://www.science-education.ru/121—1791 (дата обращения 05.04.2015).

7. **Неусыпин К.А., Пролетарский А.В., Власов С.В.** Алгоритмические способы повышения точности автономных систем // Труды ФГУП "НПЦАП". Системы и приборы управления. 2010. № 3. С. 68—74.

8. **Неусыпин К.А., Шелухина Н.А.** Коррекция навигационной информации посредством нелинейного фильтра Калмана // Автоматизация и современные технологии. 2000. № 4. С. 21—23.

9. **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—33.

10. **Буй Ван Кыонг, Неусыпин К.А.** Алгоритмический способ повышения точности навигационных систем // Автоматизация и современные технологии. 2005. № 7. С. 11—15.

11. **Fang Ke, A. Proletarsky, K. Neusipin.** Selection of Measured Signals in the Navigation Measuring Complex // Journal of Measurement Science and Instrumentation. December, 2011.04, V. 02, P. 346—348.

УДК 621.757

В.М. Вартанов, д-р техн наук, проф., **И.Н. Зинина,** канд. техн. наук, доц.
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))

iptm@mami.ru

МЕТОДОЛОГИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧНОСТИ ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ В ПРОЦЕССЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Обеспечение технологичности изделий до настоящего времени остаётся наименее формализованной задачей технологической подготовки производства, решение которой во многом реализуется эвристическими методами и зависит от квалификации специалиста. Разработанные стратегии обеспечения технологичности позволяют одновременно с конструкторским осуществлять и технологическое проектирование с учётом требований технологичности.

Ключевые слова: технологичность конструкции; технологическое совершенствование; параллельное проектирование; подготовка производства.

Products manufacturability ensuring to date remains the least formalized task of production technological preparation. This task decision is largely implemented through the use of heuristic methods and depends on the expert qualifications. The developed strategies permit to realise design and technological projection simultianeously taking into account the manufacturability requirements.

Key words: design manufacturability; technological improvement; parallel designig, production preparation.

Одним из базовых понятий технологии машиностроения является понятие технологичности конструкции изделий. Технологичность изделия устанавливает взаимосвязь конструкции изделий и технологии его производства. Например, проект конструкции автомобиля, составляющий только 5 % затрат на весь проект, влияет на общие затраты более чем на 70 %.

В этой связи выявление нетехнологичных решений на ранних стадиях проектирования давно рассматривается как важнейшая технико-экономическая задача машиностроения.

Изменение уже спроектированных изделий оказывается неэффективным вследствие ограниченности сроков проектирования и необходимости дополнительных затрат. Тем

более невозможным оказывается внесение принципиальных изменений в изделия, находящиеся в производстве.

Выявить взаимосвязи конструкции и технологии довольно сложно, так как обеспечение технологичности остаётся наименее формализованной задачей технологической подготовки производства. Следовательно, решать её приходится эвристическими методами, эффективность которых во многом зависит от квалификации специалистов. Практический опыт свидетельствует, что это ведёт к дополнительным затратам времени, труда, средств и затрудняет автоматизацию сборочного процесса.

Наиболее широкое распространение получила методика оценки технологичности изделий в условиях автоматизации сборки DFMA [1], которая реализована в виде программного продукта [2]. В Советском Союзе, а затем и в России также разработан ряд подобных методик [3, 4].

Предлагалось использование технологии экспертных систем на ранних стадиях проектирования по спецификации на изделие в интерактивном режиме. Предпринимались попытки [2] взаимодействия с системой AutoCAD, анализа конструкции отдельных деталей [4] и проведения функционального анализа всего изделия [5].

Развитие систем автоматизированного проектирования было использовано и при отработке изделий на технологичность. Так, фирма Boothroyd &Dewhurst Inc. (USA) выпустила программный продукт DFA Product Simplification [1]. Программное обеспечение (ПО) содержит большую библиотеку конструкторских решений, в том числе и для автомобильной промышленности. ПО совместимо с системами Catia, Creo, NX, AutoCAD, Solid Works и работает под управлением Windows.

В настоящее время общепризнано, что решение проблемы технологичности изделия связано с возможностью параллельного проектирования в современных CAD/CAM/CAE системах. Существующая система подготовки производства не обеспечивает параллельность конструкторско-технологического проектирования для обеспечения технологичности. Известные методики оценки технологичности позволяют сравнивать варианты конструктивных решений. При этом предполагается, что формирование вариантов конструктивных решений входит в обязанности конструктора и неформализовано. Вопросы выбора эффективной структуры изделия, как правило, не изучаются, например, при замене механических соединений на клеевые.

Можно утверждать, что известные методики реализуют "пассивный" подход к указанной проблеме и не реализуют параллельности конструкторско-технологического проектирования в вопросах обеспечения технологичности, начиная с ранних стадий проектирования.

В Университете машиностроения (Москва) разработана методология технологического совершенствования изделий, объединяющая две стратегии, реализуемые на ранних стадиях проектирования [5].

Предпосылки для внедрения обеих стратегий созданы. Например, разработаны конструкторские банки данных. Одним из наиболее известных в России является банк данных, созданный проф. А.Ф. Крайневым [6].

Первый из подходов реализует технологическое совершенствование изделия-прототипа. Его суть — выявление и устранение "недостатков" изделия. Сущность первого подхода показана на рис. 1.

Стратегию можно внедрить с верхних уровней конструкторского проектирования, например, использовать при анализе функций и выборе функциональной структуры изделия.

Существует контрольный перечень, выявляющий потенциальные проблемы при автоматизации сборки. Для устранения технологических недостатков применяют индексные карты, устанавливающие нетехнологичные решения и способы их устранения.

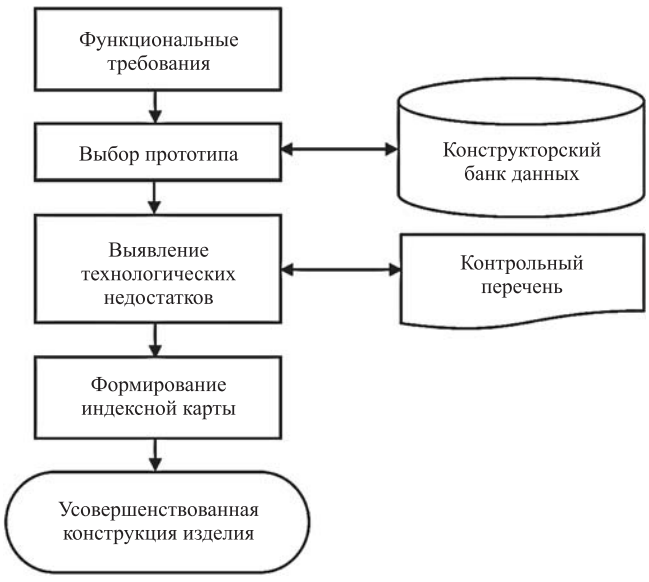


Рис. 1. Последовательность процедур при технологическом совершенствовании изделий

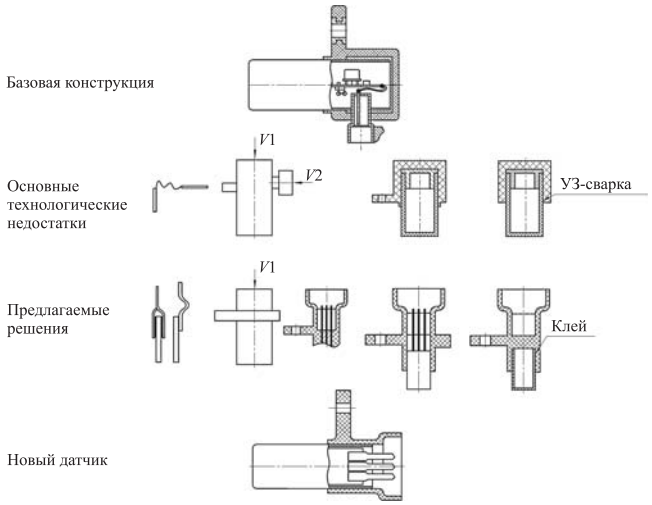


Рис. 2. Технологическое совершенствование датчика фазы автомобильного двигателя:
*V*1 — вертикальное направление сборки; *V*2 — горизонтальное направление сборки

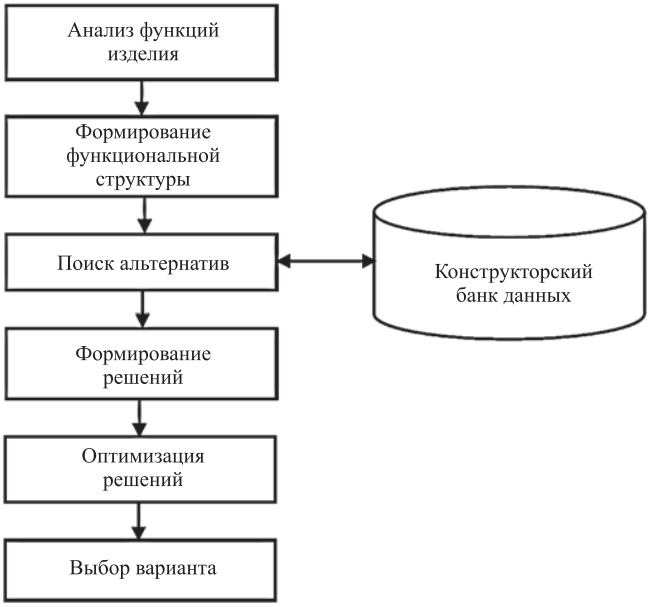


Рис. 3. Последовательность процедур при формировании множества решений и их оптимизация

Стратегия апробирована при подготовке производства ряда промышленных изделий. На рис. 2 показано технологическое совершенствование датчика фазы автомобильного двигателя. В таблице представлена индексная карта на датчик.

Сущность второй стратегии (рис. 3) — формирование множества решений и их последующая оптимизация.

Стратегия также охватывает основные этапы проектирования изделия, начиная с анализа функций и элементов. Уже на уровне "принципа действия" могут быть найдены различные решения по отдельным функциям.

Задача формирования технических решений по изделию на избыточном функциональном множестве формулировалась следующим образом: сколькими способами можно сгенерировать *K*-элементное множество с повторениями? Постановка задачи предусматривала наличие монофункциональных A_{Ij} и полифункциональных B_{Ij} элементов. Общее число R технических решений может быть определено суммой вида:

$$R = R_0 + R_1,$$

где R_0 — количество решений, содержащих элементы монофункциональных множеств; R_1 — количество решений, содержащих хотя бы один полифункциональный элемент.

Формирование множества решений основано на комбинаторном подходе. Мощность формируемого множества оценивается соотношением:

$$R = \sum_{I=0}^{m} S_I \times \prod_{I=1}^{K} n_I^{\omega_{IJ}},$$

где S_I — количество элементов в полифункциональном множестве; n_I — количество элементов

Конструкция датчика	Главные технологические недостатки	Критерии развития	Улучшенные показатели
Базовая	Наличие гибкого соединения внутри корпуса. Неэффективность фиксации платы. Сборка по двум осям. Наличие "лишних" деталей	Возможность деформации при УЗ-сварке крышки с корпусом. Сокращение числа деталей. Применение технологичных видов соединений	У прототипа имелось две крышки: металлическая и пластмассовая
Усовершенствованная	—	—	Сборка по одной оси. Исключение заглушки. Склеивание крышки со стаканом. Непосредственное соединение вывода с платой токопроводящим клеем

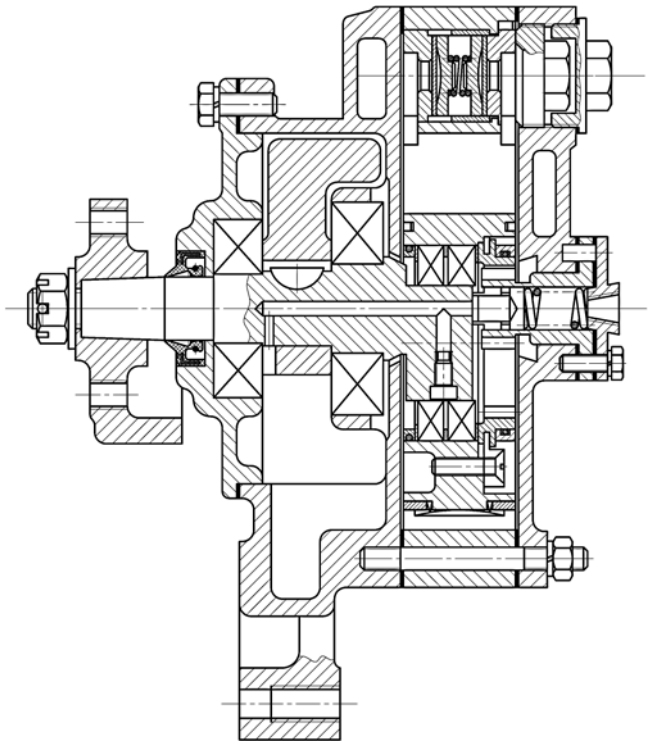


Рис. 4. Роторный автомобильный компрессор (базовая конструкция)

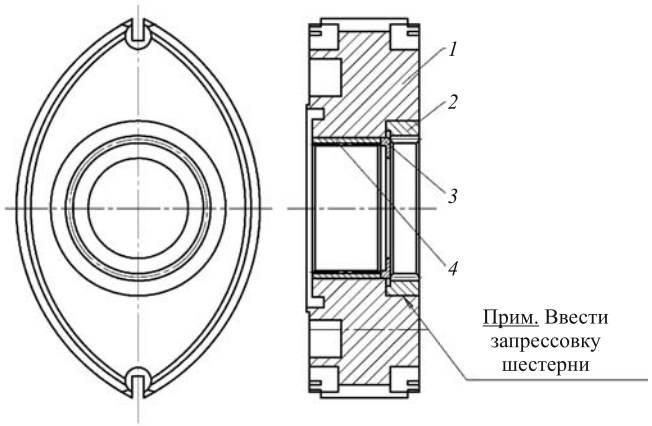


Рис. 5. Узел ротора автомобильного компрессора (новая конструкция):
1 — ротор (∂_2); *2* — шестерня (e); *3* — кольцо маслоотражательное (d_2); *4* — вкладыш (f_2)

Рис. 6. Изготовленный узел ротора (фото)

в каждом из монофункциональных множеств; ω_{IJ} — показатель вхождения элемента монофункционального множества в элемент полифункционального множества.

Стратегия апробирована при проектировании ряда промышленных изделий. Одним из таких изделий является роторный автомобильный компрессор (рис. 4).

В частности, по узлу ротора было сформировано восемь вариантов технических решений. Оптимальный вариант подхода показан на рис. 5 и 6.

Разработанные стратегии позволяют аккумулировать и использовать на практике накопленный опыт по технологическому совершенствованию изделий под автоматическую сборку, а также, одновременно с разработкой конструкции, осуществлять технологическое проектирование с учётом обеспечения её технологичности, сокращая затраты на подготовку производства и непосредственно в производстве.

Технологическое совершенствование изделий на ранних стадиях проектирования изделий даёт возможность выявить нетехнологичные решения уже на ранних стадиях проектирования и принять принципиальные решения по конструкции изделия.

Библиографические ссылки

1. **BOOTHROYD** DEWHURST, Inc. BOOTHROYD DEWHURST, Inc. // DFMA. Boothroyd Dewhurst, Inc., 2014. 20.01.2015. www.dfma.com.

2. **Попов А.М.** Повышение сборочной технологичности конструкций изделий в интегрированных системах автоматизированного проектирования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 1. С. 14—19.

3. **Холодкова А.Г., Кристаль М.Г.** Технология автоматической сборки. М.: Машиностроение, 2010. 560 с.

4. **Ван Хун По.** Разработка метода отработки на технологичность деталей машин в условиях автоматизированного производства с применением технологии партнерских систем // Дисс. ... канд. техн. наук. М.: МАМИ, 1998. 215 с.

5. **Вартанов М.А.** Обеспечение технологичности конструкций изделий при многоуровневом преобразовании в структуру процесса автоматизированной сборки // Дисс. ... д-ра техн. наук. М.: МАМИ, 2005. 415 с.

6. **Крайнев А.Ф.** Идеология конструирования. Структурный синтез машин // Справочник. Инженерный журнал. 2000. Приложение № 4. 24 с.

УДК 612:681

Ш.М. Гулямов, д-р техн. наук, проф., **А.Н. Юсупбеков,** д-р техн. наук, проф.,
А.О. Атауллаев, К.Р. Абдуллаева
(Ташкентский государственный технический университет, Республика Узбекистан)
aziz-217@mail.ru

СИНТЕЗ СЛЕДЯЩИХ СИСТЕМ С ВОЛНОВЫМИ КАНАЛАМИ

Показано, что используя результаты измерений, "засоренных" шумом линейных комбинаций переменных состояния объекта, их оценки можно получать, применяя фильтр. Фильтр состоит из "модели" исходной системы и сигнала обратной связи, пропорционального разности между действительным измерением и его оценкой. Комбинация оптимального фильтра и оптимального детерминированного регулятора является регулятором с обратной связью. Последний также является оптимальным в случае линейной задачи с квадратичным функционалом и аддитивным гауссовским белым шумом при условии, когда справедлив принцип стохастической эквивалентности или теорема разделимости. На вход регулятора поступают зашумленные измерения, которые фильтруются оптимальным фильтром и используются для формирования управляющих воздействий. Закон оптимального управления сводится к минимизации усреднённого по ансамблю квадратичного критерия качества функционирования системы.

Ключевые слова: радиотехнические следящие системы; системы с волновыми каналами; измеритель; регулятор; оцениватель; заданная часть следящей системы; регуляторы.

It is shown that, using the measurement results, "cloged" by linear combinations noise of the object variable state, their valuation can be obtained through the use of a filter. The filter consists of the initiall system "model" and the feedback signal proportional to the difference between the actual measurement and its valuation. The combination of the optimal filter and deterministic optimal regulator is a feedback controller. The latter also is the optimal in the case of a linear task with a quadratic functional and additive white Gaussian noise under condition, when the stochastic equivalence principle or separability theorem is valid. Noisy measurements proceed to the regulator input that are filtered by an optimal filter and are used to forming control actions. The optimal control law is boiled down to minimization on the ensemble averaged quality quadratic criterion of the system performance.

Key words: radio tracking systems; systems with wave channels; measuring instrument; regulator; estimator; the specified portion of the tracking system; regulators.

Введение. В состав радиотехнических устройств и комплексов обычно входят автоматические системы слежения за параметрами электромагнитного сигнала: направлением его прихода, временным положением, частотой и фазой. Такие системы имеют свою специфику по сравнению с другими системами автоматического регулирования. Их выделяют в отдельный класс систем, называемых радиотехническими следящими системами (РТСС) [1—3], а точнее — следящими системами с волновыми каналами (ССВК), поскольку подобные системы работают в частотном, оптическом, рентгеновском и радиационном диапазонах.

ССВК используются в качестве следящих дискриминаторов для определения параметров взаимного и собственного движения летальных аппаратов; автоматического сопровождения по направлению и дальности; для автоматического определения относительной скорости объектов. Важной особенностью ССВК является возможность потери сопровождения, а также под действием внешних воздействий.

До недавнего времени для расчёта ССВК использовали или метод частотных характеристик, приводящий к выбору корректирующего звена, или метод, используемый для проектирования устройств переработки информации — линейных и нелинейных фильтров [2]. Следует подчеркнуть, что такой подход не учитывает влияния структуры системы на её свойства. Задача расчёта реальной радиотехнической следящей системы существенно отличается от задачи расчёта фильтров и требует специального рассмотрения. Это различие имеет место по следующим основным причинам.

Мгновенные значения желаемого сигнала на выходе зачастую должны быть равны соответствующим значениям входного сигнала. Это требование к ССВК является более жёстким по сравнению с требованиями при расчёте фильтра, где допускается некоторое запаздывание при воспроизведении желаемого сигнала.

Значительная часть элементов ССВК может быть заранее задана, т.е. инженер не может свободно ими распоряжаться. Некоторая свобода имеется только в выборе коррекции,

которая должна использоваться для заданных элементов. В фильтрах, напротив, условия задачи редко включают в себя требования о неизменных элементах.

В ССВК возмущения могут действовать не только на входе, но и в других точках. В ряде случаев уменьшение влияния этих возмущений на выходной сигнал может стать основным требованием. При расчёте фильтра проблема возмущений (приложенных в точках, отличных от входных) не возникает вовсе либо ставится не столь жёстко.

В ССВК приходится иметь дело с элементами, параметры которых заданы неточно и нестабильны во времени. В частности, таковыми являются электромеханические, гидравлические и другие элементы, которые используются в выходных каскадах ССВК.

Нельзя отрицать того факта, что в ССВК и фильтрах есть много общего. Те и другие связаны с процессом переработки системной информации и имеют обратные связи.

Существующие методы теории оптимального управления позволяют по-новому подойти к проектированию подобных систем.

Рассмотрим вопрос применения этих методов к решению задач синтеза ССВК. Сложившаяся на сегодняшний день практика использования подобного подхода свидетельствует о её плодотворности [4—6]. При этом улучшаются точностные характеристики ССВК, повышается эффективность проектирования, поскольку метод хорошо приспособлен к автоматизации этой процедуры.

Задача построения следящих систем с волновыми каналами. Сформулируем задачу синтеза ССВК [3]. На рисунке приведена структурная схема ССВК. Радиотехническая следящая система состоит из дискриминатора заданной части, оценивателя и регулятора. Заданная часть ССВК зависит и от её целевого назначения. Так, например, для угломерного следящего устройства заданная часть будет включать в себя антенну (например, фазированную решетку), исполнительные устройства и измерительный комплекс. В случае автоматического слежения за частотой заданная часть будет состоять из перестраиваемого генератора, устройства управления частотой колебаний генератора, измерительно-преобразующих устройств и т. д.

Синтезировать законы оптимального управления ССВК можно для режимов:

слежения, обеспечивающего наименьшие статические и динамические ошибки;

сканирования, обеспечивающего обзор пространства за минимально возможное время (сюда же относится режим перехода луча из одного установившегося состояния в другое за минимально возможное время);

автоматической коррекции фазового фронта электромагнитной волны при формировании узкой диаграммы направленности и др.;

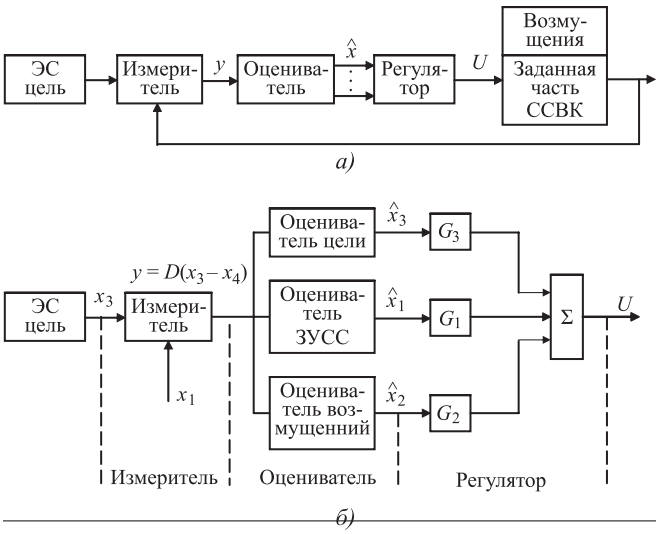
вспомогательных задач (таких как синтез автоматической регулировки усиления ССВК, автоматической подстройки частоты и т. п.).

Заданная часть ССВК (рисунок, *а*) состоит из измерителя (дискриминатора) и управляемой части, а также эталонного сигнала (ЭС) о динамике цели.

Особенность измерителей следящих систем с волновыми каналами (рисунок, *б*) состоит в том, что в них имеется канал, в котором сигнал передаётся при помощи высокочастотных электромагнитных волн. Диапазон частот при этом зависит от типа следящей системы и может меняться в широких пределах (от жёсткого излучения до радиочастот). Входными сигналами дискриминаторов в этом случае являются электромагнитные колебания с длиной волны, определяемой типом следящей системы.

Это обстоятельство имеет важное значение и является отличительным признаком следящих систем с волновыми каналами.

Отражённый от цели сигнал усиливается приёмным устройством, с выхода которого снимается узкополосный случайный процесс, представляющей собой аддитивную смесь отражённого сигнала и помехи [7]. В таблице приведены основные типы дискриминаторов, использующихся в следящих системах с волновыми каналами.



Структурная схема ССВК

В системах углового сопровождения цели в качестве измерительного устройства используют пеленгаторы, различаемые способами формирования равносигнальной зоны (РСЗ).

В пеленгационных устройствах с последовательным сравнением сигналов применяют одну антенну и одноканальный приёмник. Диаграмма направленности антенны перемещается в пространстве (сканирует) с периодом T_c.

Угловое рассогласование измеряется сравнением периодически изменяющейся огибающей радиосигнала или оптического сигнала с опорным колебанием, синхронизированным с перемещением диаграммы. Время измерения соизмеримо с T_c.

В пеленгационных устройствах с одновременным сравнением сигналов или с мгновенной равносигнальной зоной (называемых также моноимпульсными) используется антенная система, формирующая четыре отдельные (парциальные) диаграммы направленности, а также многоканальный приёмник. Угловое рассогласование определяют в результате сопоставления одновременно принятых сигналов. При этом время измерения соизмеримо со временем обработки сигналов в прямом тракте, т.е. может быть достаточно малым.

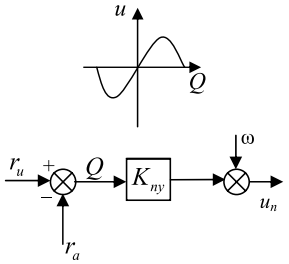
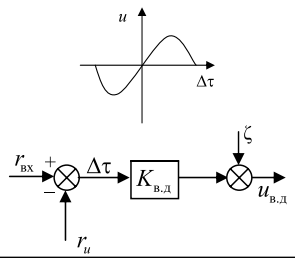
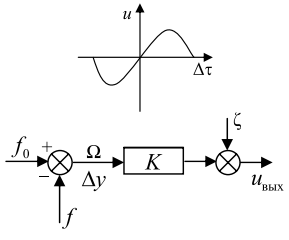
Возможность применения амплитудных, фазовых и амплитудно-фазовых методов пеленгации и различных схем обработки сигналов обусловила большое разнообразие в построении моноимпульсных пеленгационных устройств.

Сигналы на выходе измерителя фазы или частоты зависят от Ω или $\Delta\varphi_1$, где $\Omega = (f_{вх} - f)$ и $\Delta\varphi_1 = (\varphi_{вх} - \varphi)$ соответственно.

Вопросы анализа и синтеза оптимальных и квазиоптимальных дискриминаторов подробно рассмотрены в работе [8]. Там же проанализированы способы цифровой реализации измерителей.

Система слежения за положением цели в качестве управляемой части может иметь антенну с механическим приводом или фазированную антенну — решетку с электрическим управлением пространственной модуляцией луча.

Основные типы дискриминаторов в составе радиотехнических следящих систем

Тип системы	Основные характеристики			
	Наименование измерителей и назначение	Выход измерителя $y = g(x, t) + \omega$	Дискриминационная характеристика и эквивалентная схема измерителя	Шумы измерений
Угловое сопровождение	Пеленгационное устройство (измеритель углов). Измеряет угол между направлением на цель, от которой принимается электромагнитный сигнал, и установочной осью	$U_n = g(q, t) + \omega$ $q = r_u - r_a$ r_a — угол между РСЗ и установочной осью. Линейная аппроксимация пеленгационного устройства $u_n = K_{ny}(r_u - r_a) = K_{ny}Q$; $K_{ny} = \frac{\partial u_n}{\partial Q}\Big\vert Q = 0$		Радиопомехи, поступающие вместе с сигналом на вход и внутренний шум приёмного устройства; угловой шум цели; амплитудный шум цели
Слежение по дальности	Измеритель временного положения импульсного сигнала; временной селектор	$u_{в.д} = g(\Delta\tau, t) + \zeta$ Линеаризованная характеристика: $u_{в.д} = K_{в.д}\Delta\tau + \zeta$, $K_{в.д} = \frac{\partial u_{в.д}}{\partial \Delta\tau}\Big\vert \tau = 0$		Внутренний шум приёмного устройства; внешний шум на радиочастоте; замирание сигналов; амплитудный шум; флуктуационное смещение центра отражения
Слежение за частотой и фазой	Фазочастотные дискриминаторы. Измеряют разность частот или фаз между их заданным и фактическим значениями	$u_{в.д} = g(\Omega, t) + \zeta_{ч.д}$, $u_{ф.д} = g(\Delta y, t) + \zeta_{ф.д}$. Линеаризованные характеристики: $u_{ф.д} = K_{ч.д}\Omega + \zeta_{ч.д}$, $u_{ч.д} = K_{ф.д}\Delta\varphi + \zeta_{ф.д}$		Внутренний шум приёмного устройства и т. п.

С точки зрения анализа и синтеза систем представляется целесообразным все переменные, характеризующие систему или имеющие определённое к ней отношение, классифицировать на группы:

входные переменные или входные воздействия u_i, представляющие собой сигналы, генерируемые системами, внешними по отношению к исследуемой, и влияющие на поведение системы;

выходные наблюдаемые переменные или переменные, характеризующие реакцию системы y_j и позволяющие описать некоторые аспекты поведения системы;

переменные (координаты) состояния или промежуточные переменные x_k, характеризующие динамическое поведение исследуемого объекта.

В любой момент времени состояние системы является функцией начального состояния $x(t_0)$ и вектора входа $u(t, t_0)$, т. е.

$$x(t) = f[x(t), u(t), t]. \quad (1)$$

Это векторное дифференциальное уравнение может быть записано в скалярной форме:

$$x_k(t) = f_k[x(t), u(t), t], \quad (2)$$

где $k = 1, 2, ..., n$.

Уравнения (1) и (2) — это уравнения состояния динамического процесса.

Вектор выхода (измеряемого выходного сигнала) определяется соотношением:

$$y_j(t) = g_j[x(t), u(t), t] \quad (3)$$

или

$$y(t) = g[x(t), u(t), t],$$

которое применимо в большинстве задач ССВК (уравнение дискриминатора).

Наконец, в некоторых ССВК имеет место насыщение, так что в динамический процесс должны быть включены уравнения процесса насыщения:

$$u(t) \in U, x(t) \in x. \quad (4)$$

Обозначение $u(t) \in U$ указывает на то, что вектор $u(t)$ лежит внутри или на границе замкнутой области $U(t)$ векторного пространства.

Примером уравнения насыщения может служить соотношение

$$-U_i \leqslant u_i(t) \leqslant U_i, \; i = 1, 2, ..., n. \quad (5)$$

Для линейной управляемой части ССВК удобно ввести дополнительные обозначения. Уравнение состояния в этом случае запишем в виде:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Cv(t), \quad (6)$$

где $x(t)$ — n-мерный вектор состояния; u — m-мерный вектор управления; v — n-мерный вектор возмущений.

Уравнение выходного измеряемого сигнала представим в виде:

$$Y(t) = Dx(t) + W(t), \quad (7)$$

где $W(t)$ — шумы измерения.

Если динамический процесс линеен и не имеет место насыщение, то уравнения насыщения просто опускаются.

В уравнениях (6) и (7) матрицы A, B, C, D имеют вид:

$$\mathrm{A} = \begin{bmatrix} a_{11}(t) & a_{12}(t) & \dots & a_{1n}(t) \\ a_{21}(t) & a_{22}(t) & \dots & a_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1}(t) & a_{n2}(t) & \dots & a_{nn}(t) \end{bmatrix};$$

$$\mathrm{B} = \begin{bmatrix} b_{11}(t) & b_{12}(t) & \dots & b_{1n}(t) \\ b_{21}(t) & b_{22}(t) & \dots & b_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1}(t) & b_{n2}(t) & \dots & b_{nn}(t) \end{bmatrix};$$

$$\mathrm{C} = \begin{bmatrix} c_{11}(t) & c_{12}(t) & \dots & c_{1n}(t) \\ c_{21}(t) & c_{22}(t) & \dots & c_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{n1}(t) & c_{n2}(t) & \dots & c_{nn}(t) \end{bmatrix};$$

$$\mathrm{D} = \begin{bmatrix} d_{11}(t) & d_{12}(t) & \dots & d_{1n}(t) \\ d_{21}(t) & d_{22}(t) & \dots & d_{2n}(t) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1}(t) & d_{n2}(t) & \dots & d_{nn}(t) \end{bmatrix}, \quad (8)$$

где A — матрица коэффициентов, обратно пропорциональных постоянной времени; B — матрица управления; C — матрица возмущений; D — матрица выхода.

В литературе по ССВК широко освещаются частотные методы анализа с использованием передаточных функций. Так, при применении вариационных принципов предпочтение отдают описанию объектов во временной области. При этом необходимо осуществлять переход от передаточных функций к дифференциальным уравнениям в переменных состояния.

Схемы непрерывных технологических объектов в переменных состояния совпада-

ют со схемами моделирования данных систем на аналоговых вычислительных машинах. В специальной литературе по радиоавтоматике передаточная функция линейного динамического процесса, как правило, аппроксимируется соотношением вида:

$$W(p) = \frac{y_1(p)}{u_1(p)} = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} d_i p^i}{\sum_{i=0}^{n} a_i p^i}, \qquad (9)$$

где $y_1(p)$ и $u_1(p)$ — преобразования Лапласа функций $y_1(p)$ и $u_1(p)$ при нулевых начальных условиях.

Не теряя общности, можно положить $a_n = 1$. От (9) перейдем к дифференциальному уравнению:

$$\sum_{i=0}^{n} a_i y_1^{(i)}(t) = \sum_{i=0}^{n-1} d_i u_1^{(i)}(t). \qquad (10)$$

Далее введём новую переменную $x_n(t)$, так что уравнение (10) будет эквивалентно уравнениям:

$$\sum_{i=0}^{n} a_i x_n^{(i)}(t) = u_1(t); \qquad (11)$$

$$\sum_{i=0}^{n-1} d_i x_n^{(i)}(t) = y_1(t). \qquad (12)$$

Наконец, вводя новые переменные

$$\dot{x}_i(t) = x_{i-1}(t), i = 1, 2, \ldots, n, \qquad (13)$$

приведём уравнение (11) к виду:

$$\dot{x}_i(t) = \sum_{i=1}^{n} \left[-a_{n-1} x_i(t)\right] + u_i(t). \qquad (14)$$

Аналогичным образом уравнение (14) преобразуется к следующему виду:

$$y_1(t) = \sum_{i=1}^{n} d_{n-1} x_i(t). \qquad (15)$$

Уравнения (13) и (14) представляют собой уравнения состояния, а выражение (15) — уравнение выходного сигнала для заданной части системы.

Динамика цели является неуправляемой заданной частью ССВК. Траектория цели в общем случае — случайная функция. Поэтому для описания используют соответствующий математический аппарат [9].

Модель динамики цели требуется для того, чтобы осуществлять прогноз (экстраполяцию) траектории для обеспечения оптимального слежения, а также прерывания поступления информации по волновому каналу.

В случае оптимального слежения алгоритм, формирующий сигнал управления, экстраполированный вперёд на время τ, требует знания как состояния цели, так и заданной части ССВК в момент времени τ. Иными словами, необходимы математические модели цели и заданной части ССВК, а также знание начальных условий.

Для моделирования динамики цели и прогноза её состояния используют гауссовский марковский случайный процесс (последовательность), представленный как вектор состояния непрерывной линейной динамической системы, возбуждаемой гауссовским чисто случайным процессом и имеющий гауссовский вектор начального состояния [10]:

$$\dot{x}_2 = E(t) x_2 + F(t) n(t), \qquad (16)$$

где x_2 — n-мерный вектор; $n(t)$ — m-мерный вектор.

В зависимости от спектра возмущающего воздействия (в данном случае — цели) возмущение может моделироваться или белым шумом (если спектр возмущения превышает полосу пропускания системы), или "окрашенным" — коррелированным.

Параметры уравнения (16) можно экспериментально определить, используя переход

$$R_{\upsilon\upsilon} \to S_{\upsilon\upsilon} \to W(j\omega) \to$$
$$\to \text{дифференциальное уравнение}, \qquad (17)$$

где $R_{\upsilon\upsilon}$ — экспериментально определяемая автокорреляционная функция; $S_{\upsilon\upsilon} = |W(j\omega)|^2$.

Отсюда перейдём к дифференциальному уравнению (16).

Используя теорию оптимального управления, в основном расчитывают последовательности управления или управлений в виде функций непрерывного времени, которые при подаче их на управляемую часть следящих систем с волновыми каналами на заданном интервале времени в будущем вынудят её работать оптимально. При этом необходимо точное знание начального состояния управляемой части ССВК и динамических характеристик объекта.

Первым шагом синтеза следящей системы является обоснование некоторого критерия качества, характеризующего общую ошибку за весь период работы ССВК. С этой целью используется скалярная величина, полученная интегрированием по интервалу управления некоторой меры ошибки, т.е. функция переменных состояния и управления.

Затем используют идеи вариационного исчисления для получения необходимых усло-

вий, которым должны удовлетворять экстремали. По определению экстремали представляют собой зависящие от времени функции управления и состояния, соответствующие экстремуму критерия ошибки. Эти условия имеют вид системы дифференциальных уравнений с определёнными граничными свойствами (например, уравнений Эйлера—Лагранжа, или сопряжённых уравнений). Те же условия можно представить с помощью уравнений Понтрягина и показать при этом, что в распространённом и важном частном случае, когда амплитуда управления ограничена, в качестве необходимого условия можно применять принцип максимума.

Требования, предъявляемые к ССВК, в значительной степени определяются характером решаемой задачи. Это могут быть задачи слежения, быстрого перевода, например, антенны из одного состояния в другое — заданное, формирования фазового фронта электромагнитной волны и т.д. Эти требования, сформулированные на языке математики, являются критерием качества работы ССВК, или целевым функционалом.

Необходимые условия получают также и при использовании процедуры динамического программирования в форме дифференциальных уравнений в частных производных Гамильтона—Якоби. Решения этих уравнений могут быть получены для ограниченного класса уравнений состояний и критериев качества. Необходимые условия выражаются также в виде матричного дифференциального уравнения Риккати.

Существует тесная связь между этими методами. Для рассматриваемых задач оптимальная система управления определяется как система, которая минимизирует заданный критерий качества для конкретного динамического процесса при заданных ограничениях.

Последние могут заключаться в том, что система управления должна быть линейной или иметь какую-либо определённую структуру элементов и т.д. Следует отметить, что приведённое выше определение для оптимальной системы основано на математической модели решаемой задачи. Если математическая модель изменится, то минимизация может привести к другому закону управления.

Заключение. Рассмотрена непрерывная линейная система, содержащая аддитивные белые шумы в уравнениях системы и измерений. Установлено [9], что оптимальное управление линейной системой с квадратичным критерием качества сводится к линейной обратной связи по фазовым переменным. Фазовые переменные можно получить, пользуясь результатами измерений засоренных шумами линейных комбинаций фазовых переменных. Для этого применяется фильтр, состоящий из "модели" исходной системы с сигналом корректирующей обратной связи, пропорциональной разности между действительным измерением фазовой переменной и её оценкой. Комбинация оптимального фильтра и оптимального детерминированного регулятора является регулятором с обратной связью. Последний также является оптимальным в случае линейной задачи с квадратичным функционалом и аддитивным гауссовским белым шумом при условии, когда справедлив принцип стохастической эквивалентности или теорема разделимости. На вход регулятора поступают зашумленные измерения, которые фильтруются оптимальным фильтром и используются для формирования управляющих воздействий. Закон оптимального управления сводится к минимизации усреднённого по ансамблю квадратичного критерия качества функционирования системы.

Библиографические ссылки

1. **Перов А.И.** Статистическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2003. 398 с.

2. **Первачев С.В., Чиликин В.М.** Цифровые системы радиоавтоматики. М.: Изд-во МЭИ, 1999. 46 с.

3. **Гулямов Ш.М., Юсупбеков А.Н., Рашидов Ю.Р., Атауллаев А.О.** Методика расчета управлений в следящей системе с волновыми каналами с учетом сложных помехо-сигнальных условий// "Промышленные АСУ и контроллеры". 2014. № 1. С. 24—30.

4. **Первачев С.В., Фам Хай Чунг.** Адаптация цифровых радиотехнических следящих систем при неизвестной интенсивности динамического воздействия // Вестник МЭИ. 2005. № 4. С. 91—96.

5. **Dressler R.M., Traser E.S.** Optimal Communication and tracking system. Stanford Res. Inst. Menlo Park. Calif. Final Rep. Contract NAS 12-59SRI Project 5578. October, 1967.

6. **Первачев С.В., Фам Хай Чунг.** Адаптация дискретных радиотехнических следящих систем к априорно неопределенному динамическому воздействию // Радиотехнические тетради. 2004. № 30. С. 49—53.

7. **Григорьев В.В., Быстров С.В., Бойков В.И., Болтунов Г.И., Коровьяков А.Н., Мансурова О.К., Першин И.М.** Проектирование регуляторов для стохастических систем и объектов с неопределенными параметрами. СПб: НИУ ИТМО, 2013. 172 с.

8. **Лихарев В.А.** Цифровые методы и устройства в радиолокации. М.: Советское радио, 1973.

9. **Медич Дж.** Статистически оптимальные линейные оценки и управление. М.: Энергия, 1973.

10. **Первачев С.В., Перов А.И.** Адаптивная фильтрация сообщений. М.: Радио и связь, 1991. 160 с.

УДК 681.5.09

А.Г. Шумихин, д-р техн. наук, проф., **С.Л. Пегушин**
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)
atp@pstu.ru

АНАЛИЗ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ АСУТП С ВОССТАНОВЛЕНИЕМ ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ ФУНКЦИИ ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЗАЩИТЫ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕПЕРЕРАБОТКИ

Рассмотрена экономическая эффективность систем противоаварийной автоматической защиты с различными вариантами надёжностных схем резервирования, приведён сравнительный анализ схем. Введено понятие экономической "полезности" системы с функцией, учитывающей предотвращенные экономические потери предприятия при срабатывании системы в предаварийной ситуации и ущерб при "ложном" её срабатывании (в отсутствии предаварийной ситуации).

Ключевые слова: объект нефтепереработки; противоаварийная автоматическая защита; отказ; восстановление; эффективность.

The economic efficiency of the anti-damage automatic protection systems with different variants of the secure buckup schemes is considered; the schemes comparative analysis is adduced. It is given the concseption of the system economic "usefulness" to function, taking into account the enterprise economic losses prevention at system response in the pre-emergency situation and the damage in the "wrong" response (in the absence of pre-emergency situation).

Key words: oil refining object; anti-damage automatic protection; failure; recovery; efficiency.

Среди важнейших характеристик эффективности функционирования системы противоаварийной автоматической защиты (ПАЗ) особое место занимает надёжность, определяемая как комплексное свойство системы к сохранению во времени в установленных пределах всех тех параметров, которые отражают способность системы выполнить требуемые функции в заданных режимах и условиях эксплуатации. Как следует из этого определения, поиск более совершенных и адекватных методов и путей оценивания, анализа, совершенствования вида характеристик и повышения надёжности систем ПАЗ и их компонентов имеет важное значение.

При выборе структуры системы ПАЗ и определении соотношения между надёжностью, диктуемой жёсткими требованиями промышленной безопасности опасных производственных объектов, и её стоимостью требуется анализ надёжностно-экономических предпосылок, т.е. в конечном счёте решение задачи экономической оптимизации. Целесообразно ввести понятие экономической "полезности" ПАЗ, которую можно оценить, например, с помощью следующей функции

$$F_P = \frac{(P - Y)(1 - Q)}{P}, \qquad (1)$$

где F_P — функция экономической полезности ПАЗ; $F_P \in [0; 1]$; P — потери предприятия, связанные с несрабатыванием ПАЗ при аварийной ситуации, т.е. с ущербом, нанесённым материальным ценностям, персоналу, окружающим территориям и населению; Y — потери предприятия, связанные с ложным срабатыванием ПАЗ, т.е. вызванными при этом остановками производства; Q — вероятность отказа ПАЗ.

Следовательно, для увеличения функции полезности системы ПАЗ следует снижать переменную Y — потери предприятия, связанные с её ложными срабатываниями.

Снижение затрат для производственного объекта, имеющего в составе системы автоматизации контроля и управления систему ПАЗ, может быть достигнуто уменьшением в процессе эксплуатации количества ложных срабатываний элементов комплекса технических средств (датчики, сигнализаторы, контроллеры, модули ввода-вывода сигналов, исполнительные устройства, барьеры искрозащиты и др.). Под ложным срабатыванием ПАЗ понимается состояние, когда происходит включение противоаварийной защиты при отсутствии реальных отклонений от нормы режима функционирования технологического объекта.

Один из способов снижения количества ложных срабатываний — это аппаратное ре-

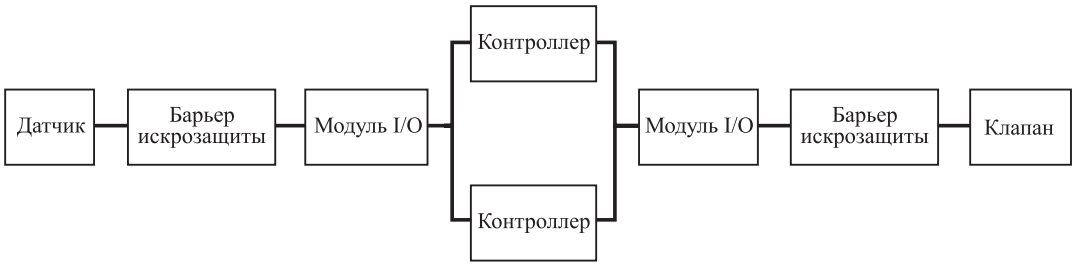


Рис. 1. Типовая надёжностная схема с резервированным контроллером

зервирование элементов комплекса технических средств системы ПАЗ. Резервирование является широко используемым методом повышения надёжности систем автоматизации крупнотоннажных непрерывных промышленных производств, для которых даже короткий простой ведёт к большим экономическим потерям. Для резервированных элементов комплекса технических средств ПАЗ важную роль в повышении работоспособности играет время (быстрота, скорость) восстановления оборудования после отказа.

Экономические потери предприятия, связанные с остановкой производства, при ложном срабатывании систем ПАЗ с учётом её надёжности можно оценить по следующей формуле [1]:

$$S_{\text{Т}} = n\left[B\int_0^h \lambda t dt + B_0\right], \qquad (2)$$

где $S_{\text{Т}}$ — стоимость технологических потерь, связанных с рабочими (необходимыми) и ложными срабатываниями; n — число рабочих периодов или интервалов между профилактическими остановами, на которое выдвинуто количественное требование безаварийности; B — затраты на выпускаемую продукцию; B_0 — затраты на продукцию, обусловленные предварительной технологической подготовкой к пуску процесса; λ — интенсивность потока отказов типа "ложное срабатывание" оборудования системы ПАЗ; h — временной интервал использования ПАЗ.

Рассматривают две схемы реализации ПАЗ с резервированием элементов, а также те же схемы с восстановлением, с расчётом экономических потерь при их отказе.

Пусть, например, время безотказной работы оборудования по отказам при "ложном срабатывании" $T_{\text{Н}} = 100\ 000$ ч, интенсивность отказов $\lambda = \dfrac{1}{T_{\text{Н}}} = 0,00001$ ч$^{-1}$, время восстановления $T_{\text{В}} = 2$ ч, интенсивность восстановления $\mu = \dfrac{1}{T_{\text{В}}} = 0,5$ ч$^{-1}$ [2].

На рис. 1 представлена типовая надёжностная схема ПАЗ с резервированным контроллером, для которой в работе [3] получено значение средней наработки до отказа, вычисляемое по формуле $T_{\text{Н}} = \int_0^{+\infty} P(t)dt$ [4], равное $T_{\text{Н}} = 16071,43$ ч и интенсивность отказов системы $\lambda = \dfrac{1}{T_{\text{Н}}} = 0,0000622$ ч$^{-1}$, соответствующие экспоненциальному закону распределения времени безотказной работы.

Рассчитаем оценки показателей надёжности для случая схемы 1 с восстановлением всех элементов. Схеме соответствует размеченный граф состояний, представленный на рис. 2.

Графу на рис. 2 соответствует следующая системы уравнений Колмогорова:

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0}{dt} = \mu P_2 + \mu P_1 - 8\lambda P_0 + 6\mu P_3; \\ \dfrac{dP_1}{dt} = \mu P_3 + \lambda P_0 - (\mu + \lambda) P_1; \\ \dfrac{dP_2}{dt} = \mu P_3 + \lambda P_0 - (\mu + \lambda) P_2; \\ \dfrac{dP_3}{dt} = \lambda P_2 + \lambda P_1 + 6\lambda P_0 - 8\mu P_3. \end{cases} \qquad (3)$$

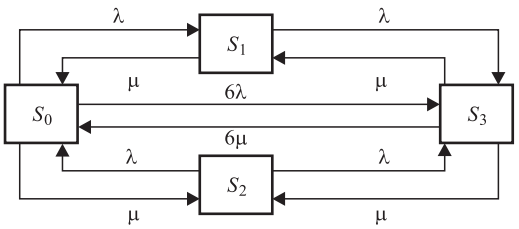


Рис. 2. Граф состояний для схемы с резервированным контроллером с восстановлением:

S_0 — все элементы исправны; S_1 — отказ одного из контроллеров, система исправна; S_2 — отказ одного из контроллеров, система исправна; S_3 — один из элементов неисправен, отказ системы

Система уравнений Колмогорова с начальными условиями $P_0(0) = 1$; $P_i(0) = 0$, $i = 1, 2, 3$ преобразуется по Лапласу. В операторной форме система будет иметь вид:

$$\begin{cases} sP_0(s) - P_0(s) = \mu P_2(s) + \mu P_1(s) - 8\lambda P_0(s) + 6\mu P_3(s); \\ sP_1(s) - P_1(s) = \mu P_3(s) + \lambda P_0(s) - (\mu + \lambda) P_1(s); \\ sP_2(s) - P_2(s) = \mu P_3(s) + \lambda P_0(s) - (\mu + \lambda) P_2(s); \\ sP_3(s) - P_3(s) = \lambda P_2(s) + \lambda P_1(s) + 6\lambda P_0(s) - 8\mu P_3(s). \end{cases} \quad (4)$$

Время наработки на отказ в i-м состоянии определяется выражением:

$$t_{\text{H}_i} = \int_0^\infty P_i(t)dt. \quad (5)$$

Преобразование Лапласа для вероятности i-го состояния

$$P_i(s) = \int_0^\infty P_i(t)e^{-st}dt. \quad (6)$$

При $t \to \infty$, $s \to 0$ преобразование Лапласа от $P_i(t)$ определяется выражением

$$P_i(s) = \int_0^\infty P_i(t)dt. \quad (7)$$

Правые части уравнений (5) и (7) равны. Тогда

$$t_{\text{H}_i} = P_i(s). \quad (8)$$

С учётом того, что $P_0(0) = 1$ и равенства (8), система уравнений Колмогорова преобразуется к виду:

$$\begin{cases} -1 = \mu t_{\text{H2}} + \mu t_{\text{H1}} - 8\lambda t_{\text{H0}} + 6\mu t_{\text{H3}}; \\ 0 = \mu t_{\text{H3}} + \lambda t_{\text{H0}} - (\mu + \lambda) t_{\text{H1}}; \\ 0 = \mu t_{\text{H3}} + \lambda t_{\text{H0}} - (\mu + \lambda) t_{\text{H2}}; \\ 0 = \lambda t_{\text{H2}} + \lambda t_{\text{H1}} + 6\lambda t_{\text{H0}} - 8\mu t_{\text{H3}}. \end{cases} \quad (9)$$

При этом, если S_3 — состояние отказа (неработоспособное) всей системы, то $t_{\text{H3}} = 0$ и четвёртое уравнение системы (9) принимает вид:

$$\lambda t_{\text{H2}} + \lambda t_{\text{H1}} = -6\lambda t_{\text{H0}}. \quad (10)$$

Так как величины $\lambda > 0$, $t_{\text{H0}} > 0$, $\lambda t_{\text{H1}} > 0$, $\lambda t_{\text{H2}} > 0$, то уравнение (9) не имеет физического смысла. С учётом этого, систему уравнений Колмогорова запишем в виде:

$$\begin{cases} -1 = \mu t_{\text{H2}} + \mu t_{\text{H1}} - 8\lambda t_{\text{H0}}; \\ 0 = \lambda t_{\text{H0}} - (\mu + \lambda) t_{\text{H1}}; \\ 0 = \lambda t_{\text{H0}} - (\mu + \lambda) t_{\text{H2}}. \end{cases} \quad (11)$$

Суммарное время наработки на отказ системы будет равно $t_{\text{H.C1}} = t_{\text{H0}} + t_{\text{H1}} + t_{\text{H2}}$.

Решение системы уравнений (11) после подстановки численных значений λ и μ методом Крамера даёт следующие значения времени наработки на отказ (ч) для исходного состояния в момент сечения времени $t = 0$, когда все элементы исправны:

$$t_{\text{H0}} = 16666{,}56;$$
$$t_{\text{H1}} = 0{,}333324;$$
$$t_{\text{H2}} = 0{,}333324;$$
$$t_{\text{HC1}} = 16667{,}22.$$

Интенсивность отказов системы

$$\lambda = \frac{1}{t_{\text{H.C1}}} = 0{,}00006 \ \text{ч}^{-1}.$$

Рассмотрим вторую альтернативную типовую надёжностную схему системы ПАЗ с резервированным контроллером и каналом измерения с групповым резервированием элементов (рис. 3).

Для схемы на рис. 3 средняя наработка до отказа T_{H} составляет 21233,77 ч, а интенсивность потока отказов системы

$$\lambda = \frac{1}{T_{\text{H}}} = 0{,}0000471 \ \text{ч}^{-1}.$$

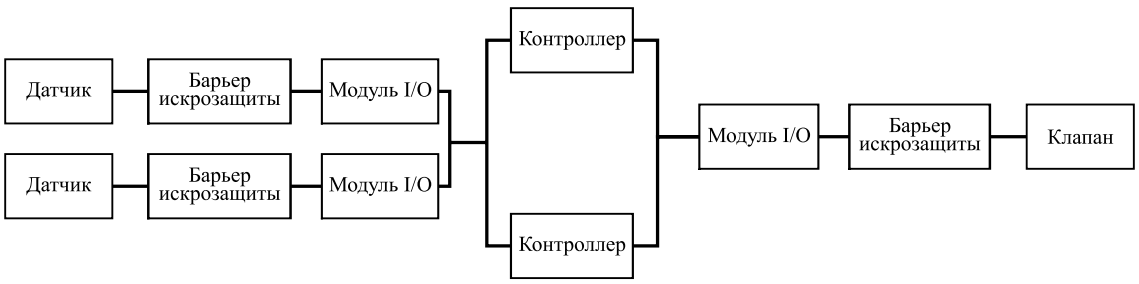


Рис. 3. Типовая надёжностная схема с резервированным контроллером и каналом измерения с групповым резервированием элементов

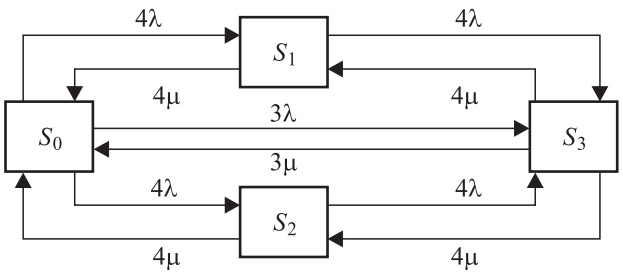


Рис. 4. Граф состояний для схемы с резервированным контроллером и каналом измерения с групповым резервированием элементов с восстановлением:
S_0 — все элементы исправны; S_1 — отказ одного из контроллеров, система исправна; S_2 — отказ одного из контроллеров, система исправна; S_3 — один из элементов неисправен, отказ системы

Рассчитаем оценки показателей надёжности системы ПАЗ с резервированным контроллером и каналом измерения с групповым резервированием элементов, надёжностная схема которой представлена на рис. 3.

Размеченный граф состояний, соответствующий этому варианту, представлен на рис. 4.

Графу состояний, приведённому на рис. 4, соответствует следующая система уравнений Колмогорова:

$$\begin{cases} \dfrac{dP_0}{dt} = 4\mu P_1 + 4\mu P_2 - (4\lambda + 4\lambda + 3\lambda)P_0 + 3\mu P_3; \\ \dfrac{dP_1}{dt} = 4\lambda P_0 + 4\mu P_3 - (4\lambda + 4\mu)P_1; \\ \dfrac{dP_2}{dt} = 4\lambda P_0 + 4\mu P_3 - (4\lambda + 4\mu)P_2; \\ \dfrac{dP_3}{dt} = 4\lambda P_1 + 4\lambda P_2 + 3\lambda P_0 - (4\mu + 4\mu + 3\mu)P_3. \end{cases} \quad (12)$$

Система уравнений Колмогорова с начальными условиями $P_0(0) = 1$; $P_i(0) = 0$, $i = 1, 2, 3$ преобразуется по Лапласу. В операторной форме система будет иметь вид:

$$\begin{cases} sP_0(s) - P_0(s) = 4\mu P_1(s) + 4\mu P_2(s) - \\ -(4\lambda + 4\lambda + 3\lambda)P_0(s) + 3\mu P_3(s); \\ sP_1(s) - P_1(s) = 4\lambda P_0(s) + 4\mu P_3(s) - \\ -(4\lambda + 4\mu)P_1(s); \\ sP_2(s) - P_2(s) = 4\lambda P_0(s) + 4\mu P_3(s) - \\ -(4\lambda + 4\mu)P_2(s); \\ sP_3(s) - P_3(s) = 4\lambda P_1(s) + 4\lambda P_2(s) + \\ +3\lambda P_0(s) - (4\mu + 4\mu + 3\mu)P_3(s). \end{cases} \quad (13)$$

С учётом равенства (7) для $P_0(0) = 1$ и $P_i(0) = 0$, $i = 1, 2, 3$ система уравнений Колмогорова преобразуется к виду:

$$\begin{cases} -1 = 4\mu t_{H1} + 4\mu t_{H2} - (4\lambda + 4\lambda + 3\lambda)t_{H0} + 3\mu t_{H3}; \\ 0 = 4\lambda t_{H0} + 4\mu t_{H3} - (4\lambda + 4\mu)t_{H1}; \\ 0 = 4\lambda t_{H0} + 4\mu t_{H3} - (4\lambda + 4\mu)t_{H2}; \\ 0 = 4\lambda t_{H1} + 4\lambda t_{H2} + 3\lambda t_{H0} - (4\mu + 4\mu + 3\mu)t_{H3}. \end{cases} \quad (14)$$

При этом, если S_3 — состояние отказа (неработоспособное) всей системы, то $t_{H3} = 0$ и четвёртое уравнение системы принимает вид:

$$4\lambda t_{H1} + 4\lambda t_{H2} = -3\lambda t_{H0}. \quad (15)$$

Так как величины $\lambda > 0$, $t_{H0} > 0$, $\lambda t_{H1} > 0$, $\lambda t_{H2} > 0$, то уравнение (15) не имеет физического смысла. С учётом этого, систему уравнений Колмогорова перепишем в виде:

$$\begin{cases} -1 = 4\mu t_{H1} + 4\mu t_{H2} - (4\lambda + 4\lambda + 3\lambda)t_{H0}; \\ 0 = 4\lambda t_{H0} - (4\lambda + 4\mu)t_{H1}; \\ 0 = 4\lambda t_{H0} - (4\lambda + 4\mu)t_{H2}. \end{cases} \quad (16)$$

Суммарное время наработки на отказ системы будет равно $t_{H.C2} = t_{H0} + t_{H1} + t_{H2}$.

Решая систему уравнений (15) с заданными значениями λ и μ методом Крамера, получим следующие значения времени (ч) наработки на отказ для исходного состояния в момент сечения времени $t = 0$, когда все элементы исправны:

$$t_{H0} = 33331,56;$$
$$t_{H1} = 0,66662;$$
$$t_{H2} = 0,66662;$$
$$t_{H.C2} = 33332,89.$$

Для экспоненциального закона распределения времени безотказной работы системы интенсивность отказов $\lambda = \dfrac{1}{t_{H.C2}} = 0,00003\ \text{ч}^{-1}$.

В соответствии с формулой (2) при $n = 1$, $B = 10000$ у.е./ч, $B_0 = 2\,000\,000$ у.е., $h = 8760$ ч, $N = 365$ дн. (1 год) определены затраты предприятия при ложном срабатывании ПАЗ в результате отказа какого-либо её оборудования, приводящего к остановке производства продукции, для всех рассматриваемых надёжностных схем. Результат расчёта представлен в таблице.

Сравнительный анализ затрат предприятия

Параметры	Схемы			
	Типовая надёжностная схема с резервированным контроллером (см. рис. 1)	Типовая надёжностная схема с резервированным контроллером и каналом измерения с групповым резервированием элементов (см. рис. 3)	Типовая надёжностная схема с резервированным контроллером с восстановлением (см. рис. 1)	Типовая надёжностная схема с резервированным контроллером и каналом измерения с групповым резервированием элементов с восстановлением (см. рис. 3)
Наработка на отказ T, ч	16071,43	21233,77	16667,22	33332,89
Интенсивность отказов λ, $ч^{-1}$	0,0000622	0,0000471	0,00006	0,00003
Экономические потери S_T, у.е.	25865393,6	20071704,8	25021280	13510640

Для наглядности сравнительного анализа на рис. 5 представлена гистограмма затрат предприятия для рассмотренных надёжностных схем при ложном срабатывании ПАЗ.

Сравнительный анализ затрат предприятия при использовании рассмотренных вариантов систем ПАЗ позволяет сделать следующие выводы:

применение резервированной схемы увеличивает затраты предприятия на монтаж и внедрение ПАЗ, но снижает затраты, связанные с остановками производства в результате "ложного" срабатывания;

применение резервированной системы ПАЗ вследствие увеличения затрат на её монтаж и внедрение целесообразно на особо ответственных потенциально опасных технологических объектах;

восстановление отказавших элементов в надёжностной схеме позволяет увеличить время наработки на отказ.

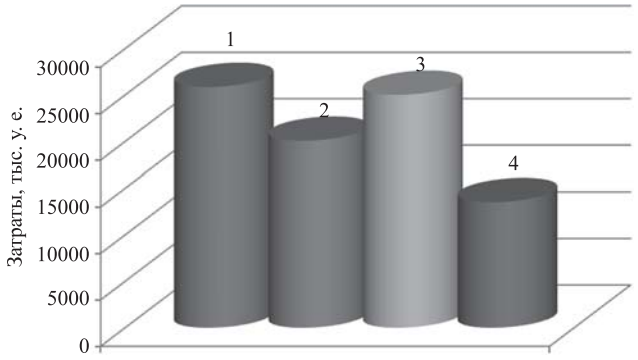


Рис. 5. Гистограмма затрат предприятия при отказе надёжностных схем:
1 — типовая надёжностная схема с резервированным контроллером; 2 — типовая надёжностная схема с резервированным контроллером и каналом измерения с групповым резервированием элементов; 3 — типовая надёжностная схема с резервированным контроллером с восстановлением; 4 — типовая надёжностная схема с резервированным контроллером и каналом измерения с групповым резервированием элементов с восстановлением

Библиографические ссылки

1. **Федоров Ю.Н.** Основы построения АСУТП взрывоопасных производств. В 2-х томах. Т. 1. М.: СИНТЕГ, 2006. 720 с.

2. **Пегушин С.Л., Шумихин А.Г.** Планирование технического обслуживания автоматических систем противоаварийной защиты производственных объектов с учётом оценки надёжности и ремонтопригодности // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. 2012. № 14. С. 13—21.

3. **Пегушин С.Л., Шумихин А.Г.** Анализ экономической целесообразности резервирования при выборе комплекса технических средств систем противоаварийной защиты с учётом их надёжностных характеристик // Вестник ПНИПУ. Химическая технология и биотехнология. 2014. № 3. С. 7—14.

4. **Острейковский В.А.** Теория надёжности. М.: Высшая школа, 2003. 463 с.

ПО СТРАНИЦАМ ЖУРНАЛОВ

Сопротивление усталости винтов резьбовых соединений погружных центробежных насосов при их нагружении круговым опрокидывающим моментом. *Вестник машиностроения*. 2015. № 7

Предложен расчёт сопротивления усталости винтов резьбовых соединений погружных центробежных насосов при действии кругового опрокидывающего момента с учётом контактной податливости витков резьбы и стягиваемых фланцев. Показано, что повышение чистоты обработки контактирующих поверхностей фланцев и повторная затяжка винтов повышают надёжность насосов.

Течение и релаксация магнитореологической жидкости в дроссельных каналах гидроопор. *Вестник машиностроения*. 2015. № 7

Исследовано время релаксации магнитореологических жидкостей (МРЖ) в результате снятия ортогональных магнитных полей. Рассмотрена динамика течения МРЖ в дроссельных каналах гидравлических виброопор в зависимости от внешнего магнитного поля и гистерезисных эффектов в ферромагнитных сердечниках магнитореологических трансформаторов**.**

Новейшая валидация: общая методология, развитие инноваций. *Наноинженерия*. 2015. № 7

Представлен новый научно-практический взгляд на общий подход, базовые аспекты, современную методологию, терминологию и путь эффективной практики выполнения задачи новейшей валидации применительно к жизненному циклу создания и эксплуатации инновационной космической техники или иной высокотехнологичной продукции. Даны полные научно-инженерные представления всех системных аспектов новейшей валидации — цели, задачи, базис информационного пространства, объекты, критерии, пределы и границы, система оценок, система планирования, коммуникации, система инженерных ассоциаций, критические ошибки. Разобран пример новейшей валидации гипотетического требования по созданию для инновационного автоматического космического аппарата системы бортового управления максимального срока активного существования на основе технологии ММАСФТ и электронных компонент СнК.

Комплексное исследование физико-механических свойств и наноструктуры твёрдых сплавов после объёмного импульсно-лазерного упрочнения. *Наноинженерия*. 2015. № 7

Представлен метод объёмного импульсного лазерного упрочнения (ОИЛУ) и его влияние на физико-механические свойства твёрдых сплавов. Установлено с помощью рентгеноструктурного анализа, что вследствие ОИЛУ происходит изменение наноструктуры твёрдых сплавов, которое коррелируется с повышением механических свойств образцов, прошедших упрочнение.

Определение технологических условий механической обработки, обеспечивающих заданные эксплуатационные свойства деталей авиационных двигателей. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2015. № 7

Изложены методики определения технологических условий обработки лезвийным инструментом, обеспечивающих заданные техническими условиями на изготовление детали эксплуатационные свойства: усталостную прочность, контактную жёсткость, износостойкость.

Метод оценки конструкции изделия. *Наукоёмкие технологии в машиностроении*. 2015. № 7

Изложен метод оценки конструкции изделия, включающий её представление совокупностью модулей, построение трёх графов, отражающих структуру конструкции, и её оценка последовательно характеристиками графов и их узлов.

Сборка с применением автоматизированной базы данных в атомном машиностроении. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2015. № 7

Описанный способ индивидуальной сборки изделий с применением автоматизированных баз данных проиллюстрирован примерами из патентного фонда решения задачи сборки твэл (тепловыделяющих элементов) ядерного реактора.

Применение компьютерного моделирования для оптимизации размерно-геометрических и массовых характеристик деталей. *Сборка в машиностроении, приборостроении*. 2015. № 7

Рассматриваются методы оптимизации размерно-геометрических и массовых характеристик, проектируемых средствами САПР изделий. Приводится анализ существующего программного обеспечения для параметрической и непараметрической оптимизации. Описываются некоторые приёмы геометрической оптимизации деталей.