

ИРКУТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ  
ИНСТИТУТ ДИНАМИКИ СИСТЕМ И ТЕОРИИ УПРАВЛЕНИЯ СО РАН  
БАЙКАЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР АКАДЕМИИ ИНЖЕНЕРНЫХ НАУК РФ

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ  
КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ  
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ И НА ТРАНСПОРТЕ**

**ДВАДЦАТЬ СЕДЬМОЙ ВЫПУСК**

**ИРКУТСК 2016**

УДК 681.518.54  
ББК 32.965  
И 74

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

академик РАИН, заслуженный деятель науки РФ, д.т.н., профессор Ю.Ф. Мухопад (научный редактор); д.т.н., доцент В.Н. Сизых (зам. научного редактора); д.т.н., профессор А.В. Данеев, д.т.н., профессор М.П. Дунаев (НИ ИрГТУ); д.т.н., профессор С.К. Каргапольцев; д.т.н., проф. А.В. Крюков; д.т.н., профессор В.С. Марюхненко; д.ф.-м.н., доцент В.А. Русанов (ИДСТУ СО РАН); д.т.н., профессор О.А. Скрышник (ИФ МГТУ ГА); д.т.н., профессор А.П. Хоменко (ректор ИрГУПС).

#### **И74 Информационные системы контроля и управления**

**в промышленности и на транспорте: Сб. науч. трудов. – Иркутск: ИрГУПС, 2016. – Вып. 26. –162 с.**

**ISBN 978-5-98710-222-0**

Сборник содержит новые результаты по элементам и устройствам систем управления, контролю, диагностике и моделированию систем управления в промышленности и на транспорте. Статьи рассчитаны на специалистов, интересующихся системами контроля и управления и их применением в промышленности и на транспорте, а также будут полезны студентам и аспирантам вузов соответствующих специальностей.

**УДК 681.518.54  
ББК 32.965**

©Иркутский государственный университет  
путей сообщения, 2016

© Институт динамики систем и теории  
управления СО РАН, 2016

© Байкальский научный центр академии  
инженерных наук РФ, 2016

**ISBN 978-5-98710-222-0**

## СОДЕРЖАНИЕ

|  |           |
|--|-----------|
| <b>РАЗДЕЛ I. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ</b>  | <b>5</b>  |
| <i>Круглов С.П., Шорников К.А.</i> Система помощи водителю автомобиля с прицепом при движении задним ходом . . . . .   | 5         |
| <i>Баканов М.В., Елизарьев К.И., Сизых В.Н.</i> Исследование модального способа построения Simulink-моделей ПИД-регуляторов для динамических систем первого порядка с транспортным запаздыванием . . | 10        |
| <i>Беляев Е.Ю., Диль В.Ф.</i> Синтез алгоритма нелинейного пилотажного контура воздушного судна методом обратных задач динамики . . . . .  | 16        |
| <b>РАЗДЕЛ II. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ</b>   | <b>24</b> |
| <i>Алексеев С.В., Круглов С.П.</i> Цифровой регулятор дизель-генератора путевого машинного гайковерта . . . . .  | 24        |
| <i>Баканов М.В., Сизых В.Н., Хоровенько А.С.</i> Алгоритмическое обеспечение адаптивной системы управления мобильным роботом. . . . .  | 31        |
| <i>Закарякин В.П., Крюков А.В., Лэ Ван Тхао</i> Моделирование неполнофазных режимов четырехфазных линий электропередачи. . . . .   | 45        |
| <i>Лэ Ван Тхао</i> Моделирование неполнофазных режимов двенадцати-фазных линий электропередачи. . . . .  | 49        |
| <b>РАЗДЕЛ III. ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ</b>  | <b>54</b> |
| <i>Байбеков С.А., Сизых В.Н., Шлыкова И.А.</i> Организация скользящих режимов при нейроуправлении типовым технологическим модулем в условиях параметрической неопределенности . . . . .              | 54        |
| <i>Лебедева А.Е., Оленцевич А.А.</i> Обеспечение безопасности и защиты транспортных комплексов за счет наращивания провозных способностей в ЖДТС . . . . .   | 60        |
| <b>РАЗДЕЛ IV. КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ</b>   | <b>66</b> |
| <i>Володарский В.А.</i> Оптимизация периодичности предупредительных замен приборов СЦБ . . . . .   | 66        |
| <i>Володарский В.А., Кротов А.В.</i> О надежности профилактируемых резервированных систем из элементов нестареющего типа. . . . .  | 71        |
| <i>Володарский В.А., Белов В.Г.</i> О влиянии надежности переключателя на надежность работы дублированной системы. . . . .   | 75        |
| <i>Володарский В.А., Ставер А.А.</i> Расчет показателей надежности систем из элементов нестареющего типа. . . . .  | 81        |
| <i>Марюхненко В.С., Золбоот Т.</i> Анализ влияния железнодорожных си-  |           |

стем автоматике и телемеханике на безопасность и своевременность перевозок на Улан-Баторской железной дороге. . . 91

**РАЗДЕЛ V. ИНФОРМАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА И  
ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ** 98

*Александров А.А.*, Параметрическая идентификация математической модели нагрева (охлаждения) при термической обработке. . . . . 98

*Антошкин С.Б.* Вопросы ориентации специализированных транспортных роботов . . . . . 103

**РАЗДЕЛ VI. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ** 108

*Александров И.М.* Система контроля кислорода в дымовых газах печи установки для регенерации фенола . . . . . 108

*Буторин Д.В., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В.* Управление механическими и электрофизическими свойствами изделий из полимерных материалов. . . . . 114

*Буторин Д.В., Филиппенко Н.Г., Лившиц А.В.* Автоматизация процесса управления механическими и электрофизическими свойствами изделий из полимерных материалов. . . . . 124

*Филиппенко Н.Г., Буторин Д.В., Солодов Г.С.* Автоматизированное самовосстановление термопластов высокочастотным электрическим полем. . . . . 135

*Ковыршин С.В., Ковалева Н.С.* Алгоритм передвижения кран-балки на складе магнетита в процессе изготовления магнетитовой суспензии . . . . . 143

**РАЗДЕЛ VII. ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ** 147

*Мухомад А.Ю.* Структурно-автоматное программирование. . . . . 147

*Пунсык-Намжилов Д.Ц.* Концептуальный анализ процессов с динамической мерой. . . . . 151

**ПРИЛОЖЕНИЕ**

Сведения об авторах . . . . .  
Требования к оформлению научных статей в сборник «Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте» . . . . .

## РАЗДЕЛ I. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 629.073; 681.513.3

С.П. Круглов, К.А.Шорников

### СИСТЕМА ПОМОЩИ ВОДИТЕЛЮ АВТОМОБИЛЯ С ПРИЦЕПОМ ПРИ ДВИЖЕНИИ ЗАДНИМ ХОДОМ

*Рассматривается математическая модель движения автомобиля с прицепом при движении как в прямом, так и обратном направлении. Синтезируется закон автоматической системы управления, отклоняющей рулевые колеса автомобиля для достижения требуемого направления движения прицепа при движении назад.*

Ключевые слова: динамика движения автомобиля с прицепом, математическая модель, закон управления

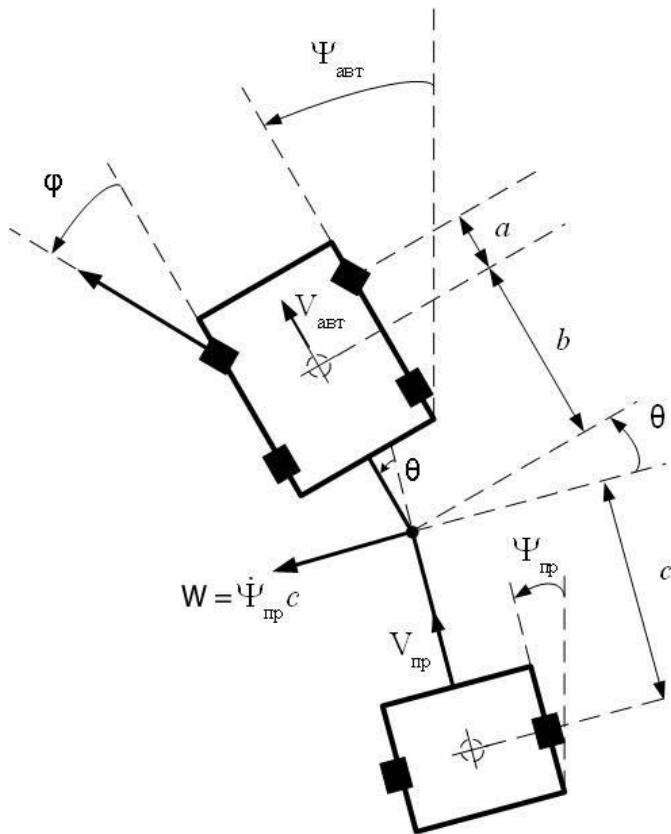
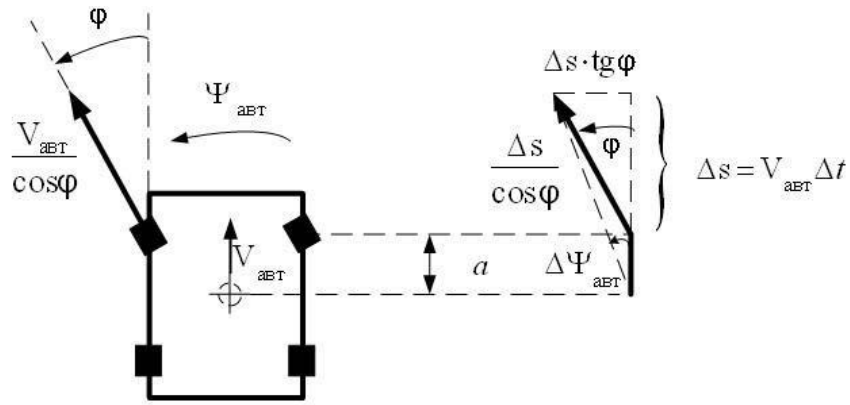
**Введение.** В настоящее время довольно распространенной является автомобильная система «легковой автомобиль + прицеп»: она увеличивает грузоподъемность автомобиля, позволяет перевозить негабаритные грузы и имеет другие достоинства. Но существует проблема управления такой системой при движении обратным ходом – при выполнении парковки, въезде в ограниченное пространство (гараж, бокс), маневрировании при выезде задним ходом со двора и пр. Дело в том, что при движении в прямом направлении рассматриваемая система является устойчивой, а при движении назад – неустойчивой (см. выводы ниже). Движением автомобиля назад с прицепом могут управлять только очень опытные водители, обладающие определенным навыком.

Такая же проблема имеют место и в грузовом автотранспорте.

В связи с этим возникает актуальная задача – построить автоматическую систему управления, которая бы помогала автомобилисту управлять автомобилем с прицепом при движении обратным ходом. В этой системе от автомобилиста требуется задание скорости движения и направления движения прицепа, а система должна формировать заданное отклонение рулевых колес автомобиля и отрабатывать их для реализации целевого движения прицепа.

Подобные системы за рубежом уже разработаны и эксплуатируются, например [1-3]. В России таких систем, по нашим данным, до сих пор нет. Исходя из этого, с учетом общегосударственной установки на импортозамещение, а также с точки зрения дальнейшего совершенствования систем помощи водителю, указанная задача рассматривается в настоящей статье.

**Математическая модель движения системы «автомобиль + прицеп».** Примем, что автомобиль имеет задние ведущие колеса и рулевые – передние. Основные кинематические параметры автономного движения автомобиля и системы «автомобиль + прицеп» при движении автомобиля вперед представлены на рис.1.



**Рис.1. Основные кинематические соотношения системы «автомобиль + прицеп»**

На рисунке и в дальнейших рассуждениях приняты следующие обозначения:

$\varphi$  – угол отклонения рулевых колес автомобиля, в обычном режиме управления автомобилем он пропорционален отклонению руля водителя;

$\theta$  – угол отклонения продольной оси прицепа от продольной оси автомобиля, примем, что  $|\theta| \leq 90^\circ$ ;

$\Psi_{авт}, \Psi_{пр}$  – угол поворота автомобиля и прицепа (соответственно) от какого-то первоначального направления;

$V_{авт}, V_{пр}$  – скорость автомобиля и прицепа, соответственно;

$a, b, c$  – линейные параметры связи автомобиля с прицепом, соответственно: расстояние от оси рулевых колес до центра вращения автомобиля (на рисунке показана кружочком), от центра вращения автомобиля до точки стыковки автомобиля с прицепом, от точки стыковки автомобиля с прицепом до оси вращения прицепа;

$\Delta s$  – элемент пройденного пути автомобилем в исходном направлении за бесконечно малый промежуток времени  $\Delta t$ ;

$W = \dot{\Psi}_{\text{пр}} c$  – вектор линейной скорости точки соприкосновения прицепа с автомобилем, перпендикулярный продольной оси прицепа и определяющий угловую скорость последнего.

Из рисунка следует, что элемент угла поворота автомобиля ( $\Delta\Psi_{\text{авт}}$ ), соответствующий  $\Delta t$ , имеет зависимость:

$$\Delta\Psi_{\text{авт}} = \text{arctg} \frac{\Delta s \cdot \text{tg}\varphi}{\Delta s + a},$$

или в общем случае скорость поворота автомобиля описывается как

$$\dot{\Psi}_{\text{авт}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\Psi_{\text{авт}}}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\text{arctg} \frac{V_{\text{авт}} \Delta t \cdot \text{tg}\varphi}{V_{\text{авт}} \Delta t + a}}{\Delta t} = \frac{V_{\text{авт}}}{a} \text{tg}\varphi. \quad (1)$$

Очевидно, что

$$\Psi_{\text{авт}} = \Psi_{\text{пр}} + \theta, \quad \text{или} \quad \Psi_{\text{пр}} = \Psi_{\text{авт}} - \theta. \quad (2)$$

Далее определим скорость прицепа. Из кинематической схемы на рис.1 следует, что

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{авт}} \cos\theta + \dot{\Psi}_{\text{авт}} b \cdot \sin\theta,$$

где первое слагаемое в правой части определяется поступательным движением (когда  $\dot{\Psi}_{\text{авт}} \equiv 0$ ), а второе – вращательным движением автомобиля (когда  $V_{\text{авт}} \equiv 0$ ). Подставляя в полученное (1), получим

$$V_{\text{пр}} = V_{\text{авт}} \left( \cos\theta + \frac{b}{a} \text{tg}\varphi \cdot \sin\theta \right). \quad (3)$$

Аналогично находится скорость изменения угла  $\theta$ . Первая ее составляющая ( $\dot{\theta}_1$ ), формируемая поступательным движением автомобиля, определяется

из следующих соотношений. Здесь из рисунка следует, что  $W = \dot{\Psi}_{\text{пр}} c = V_{\text{авт}} \sin \theta$ , а поскольку по (2)  $\dot{\Psi}_{\text{пр}} = \dot{\theta}_1$ , отсюда следует  $\dot{\theta}_1 = -(V_{\text{авт}}/c) \sin \theta$ .

Вторая составляющая искомой величины ( $\dot{\theta}_2$ ) соответствует вращательному движению автомобиля. По рисунку Тангенциальная скорость точки соприкосновения прицепа с автомобилем при вращательном движении (показана на рис.1) равна величине  $\dot{\Psi}_{\text{пр}} c$ . Со стороны автомобиля эта величина равна:  $W = \dot{\Psi}_{\text{пр}} c = -\dot{\psi}_{\text{авт}} b \cdot \cos \theta$ . Отсюда с учетом (2) можно найти искомую составляющую:  $\dot{\theta}_2 = \dot{\Psi}_{\text{авт}} (1 + (b/c) \cdot \cos \theta)$ .

Складывая полученные части, и используя для упрощения (1), окончательно найдем

$$\dot{\theta} = -\frac{V_{\text{авт}}}{c} \left( \sin \theta - \frac{c + b \cos \theta}{a} \text{tg} \varphi \right). \quad (4)$$

Для завершения математического описания, подставим в продифференцированное равенство (2) полученное равенство и (1). После упрощения получим описание динамики углового движения прицепа:

$$\dot{\Psi}_{\text{пр}} = -\frac{V_{\text{авт}}}{c} \left( \sin \theta + \frac{b}{a} \cos \theta \text{tg} \varphi \right) \quad (5)$$

Уравнения (1) – (5) описывают динамику движения системы «автомобиль + прицеп». Далее проанализируем ее свойства.

Из выражения (4) следует, что при  $\varphi \equiv 0$  динамика угла  $\theta$  описывается как

$$\dot{\theta} = -\frac{V_{\text{авт}}}{\underbrace{c}_{<0}} \sin \theta. \quad (6)$$

Следовательно, при любом положительном значении угла  $\theta$  его производная является строго отрицательной и наоборот. А это значит, что при движении вперед ( $V_{\text{авт}} > 0$ ) система «автомобиль + прицеп» является асимптотически устойчивой, т.е. при любом исходном состоянии с течением времени  $\theta \rightarrow 0$ , а в силу (3) и (2):  $V_{\text{пр}} \rightarrow V_{\text{авт}}$ ,  $\Psi_{\text{пр}} \rightarrow \Psi_{\text{авт}}$ .

Полученное свойство системы обусловлено тем, что выделенный фигурной скобкой член в (6) является строго отрицательным. Если же автомобиль движется назад:  $V_{\text{авт}} < 0$  – из подобных рассуждений следует, что система точно неустойчива, чем объясняются все проблемы управления таким движением.

Если обозначить скорость движения автомобиля назад как  $V_{\text{авт, наз}}$ , то при движении обратным ходом динамика изменения  $\theta$  вместо (4) будем описывать неустойчивым дифференциальным уравнением:



$$\dot{\theta} = \frac{V_{\text{авт, наз}}}{c} \left( \sin \theta - \frac{c + b \cos \theta}{a} \operatorname{tg} \varphi \right). \quad (7)$$

В остальных уравнениях (1) – (3), (5) нужно также поменять переменную  $V_{\text{авт}}$  на  $(-V_{\text{авт, наз}})$ .

**Синтез закона управления.** Требуемый закон управления – это заданное изменение угла  $\varphi$ . Из равенства (7) выберем этот угол таким, чтобы движение назад соответствовало движению вперед – уравнению (4), где вместо  $V_{\text{авт}}$  используется скорость  $V_{\text{авт, наз}}$ , а вместо  $\varphi$  используется  $\varphi_{\text{зад}}$  – управление от водителя (в виде дополнительного управляющего органа), задающее нужную скорость поворота прицепа. Для этого нужно приравнять правые части равенств (7) и (4) с соответствующими изменениями:

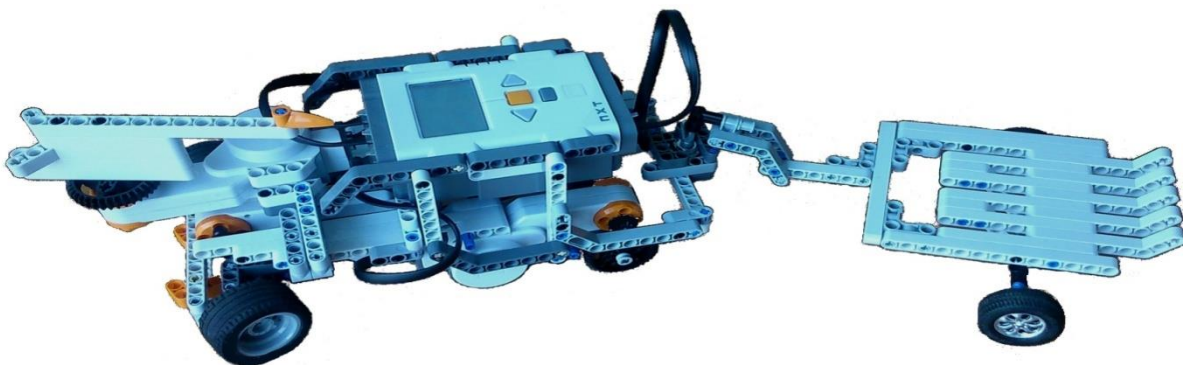
$$\frac{V_{\text{авт, наз}}}{c} \left( \sin \theta - \frac{c + b \cos \theta}{a} \operatorname{tg} \varphi \right) = -k_{3y} \frac{V_{\text{авт, наз}}}{c} \left( \sin \theta - \frac{c + b \cos \theta}{a} \operatorname{tg} \varphi_{\text{зад}} \right),$$

где  $k_{3y} \geq 1$  – коэффициент пропорциональности закона управления, при  $k_{3y} = 1$  динамика движения автомобиля с прицепом назад будет такой же, как динамика движения вперед (сохранение стереотипа управления), более высокие значения  $k_{3y}$  можно использовать для интенсивного маневрирования.

Упрощая полученное равенство, окончательно получим требуемый закон управления:

$$\varphi = \operatorname{arctg} \left[ (k_{3y} + 1) \frac{a \sin \theta}{c + b \cos \theta} - k_{3y} \operatorname{tg} \varphi_{\text{зад}} \right]. \quad (8)$$

**Заключение.** В рамках настоящей работы был построен макет системы «автомобиль + прицеп» с автоматической системой помощи водителю при движении назад на базе робототехнического набора LEGOMINDSTORMSNXT 2.0. Макет представлен на рис. 2. Исследования на основе макета подтвердили корректность представленных выводов.



**Рис. 2.** Макет системы «автомобиль + прицеп» с системой автоматического управления движением назад

Следует также отметить, что для синтеза закона управления нужно знать параметры  $a, b, c$  и текущее значение угла  $\theta$ . Для первых, в частности, необходимо знать точки центра вращения автомобиля и прицепа, а они в конкретных ситуациях могут меняться, отклоняясь от расчетных. Это приводит к снижению качества управления, в чем проявляется основной недостаток существующих систем.

Этот факт порождает необходимость совершенствования существующих систем помощи автомобилисту, в частности, – совершенствование закона управления (8).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент 20140249723 A1 US. Control for trailer backup assist system / Thomas Edward Pilutti, Roger Arnold Trombley, Michael Hafner, Matthew Y. Rupp, Douglas Scott Rhode, Darrel Alan Recker ; заявительпатентообладатель Ford Global Technologies, Llc. – № 14/256,427; заявл. 18.04.14; опубл. 04.09.14.
2. Ассистент парковки прицепа [Электронный ресурс]. – <http://www.zr.ru/content/news/785974-ford-pomozhet-vladelcam-pricepov-parkovatsya-pravilno>.
3. Система маневрирования с прицепом [Электронный ресурс]. – <http://systemsauto.ru/active/Trailer-Assist.html>.

УДК 681.5

М.В. Баканов, Елизарьев К.И., Сизых В.Н.

### ИССЛЕДОВАНИЕ МОДАЛЬНОГО СПОСОБА ПОСТРОЕНИЯ SIMULINK-МОДЕЛЕЙ ПИД-РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ПЕРВОГО ПОРЯДКА С ТРАНСПОРТНЫМ ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

*В статье рассматривается методика проектирования модальных ПИД-регуляторов для редуцированных динамических систем первого порядка и объектов первого порядка с транспортным запаздыванием. Приводятся результаты тестирования в программной среде Matlab/Simulink.*

Ключевые слова: *модальное управление, ПИД-регулятор, транспортное запаздывание.*

**Введение.** В работе [1] был разработан модальный метод проектирования ПИД-регуляторов для динамических систем второго и более высокого порядков. Суть модального способа ПИД-регулирования сводится к выбору параметров регулятора таким образом, чтобы его нули и полюса соответствовали полюсам аппроксимируемого полиномами первой или второй степени многомерного объекта. Доказано, что в этом случае обеспечивается наилучшее качество переходных процессов замкнутой регулятором системы.

В настоящей статье ставится задача описания и тестирования предложенного в [1] модального метода проектирования для аппроксимированных систем первого порядка и объектов первого порядка с запаздыванием.

## 1. Методика моделирования ПИД-регуляторов для динамических объектов первого порядка и систем с запаздыванием

Системы первого порядка и системы, которые могут быть аппроксимированы уравнениями первого порядка, главным образом характеризуются постоянной времени  $T$  передаточной функции

$$W(s) = \frac{1}{Ts + 1}$$

Коэффициенты ПИД-регулятора, определяемые по постоянным времени для различных систем первого порядка  $K_P$ ,  $K_I$ ,  $K_D$  и постоянные времени согласно описанной в [1] методике предлагается определять по формулам:

$T_I = \frac{K_P}{K_I} = \frac{T}{T} = 1$ ,  $T_D = \frac{K_D}{K_P} = \frac{T}{T} = 1$ , в которых дифференциальная составляющая  $K_D$  и интегральная составляющая  $K_I$  корректируются, как показали исследования [1], с поправочными коэффициентами  $\alpha = [0.1, 3]$  и  $\varepsilon = [0.1, 2]$  соответственно (табл. 1),  $N$  – коэффициент коррекции постоянной времени фильтра высоких частот.

Таблица 1.

Предлагаемые формулы для расчетов коэффициентов ПИД-регуляторов для систем первого порядка

| Объект              | Параметры ПИД-регулятора |                                  |  |  |  |        |
|---------------------|--------------------------|----------------------------------|--|--|--|--------|
|                     | $K_P$                    | $K_I$                            | $K_D$                                      | $T_D$                                    | $T_I$                                    | $N$    |
| $T$                 | $T$                      | $\alpha T$                       | $\varepsilon T$                            | 1  | 1  | 2...20 |
| Пределы ограничений | $T$                      | $\alpha T$<br>$\alpha = 0.1...3$ | $\varepsilon T$<br>$\varepsilon = 0.1...2$ | $\varepsilon$<br>$\varepsilon = 0.1...2$ | $\frac{1}{\alpha}$<br>$\alpha = 0.1...3$ |        |

Большое число промышленных объектов (например, бортовая инерциальная навигационная система самолета [2]) может быть приближенно смоделировано системами первого порядка с запаздыванием (*FOPDT*-моделями [2]).

*FOPDT*-модели являются комбинацией моделей систем первого порядка со звеном постоянного транспортного запаздывания. Их передаточная функция задается формулой

$$W(s) = \frac{k}{Ts + 1} e^{-Ls}$$

и представляется  $s$ -образной кривой на рис. 1. Она характеризуется двумя константами: временем задержки (постоянной транспортного запаздывания)  $L$  и постоянной времени  $T$  объекта первого порядка.

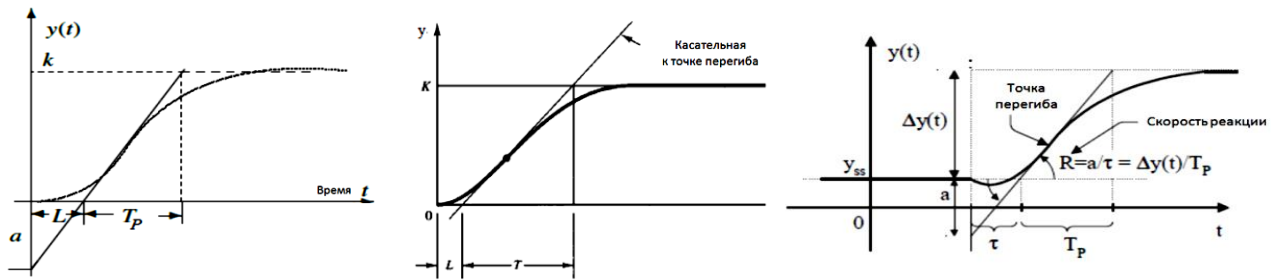


Рис. 1. S-образная кривая реакции системы с запаздыванием

Для расчета коэффициентов ПИД-регуляторов в этом случае предлагается использовать формулы, приведенные в табл. 2.

Таблица 2.

Предлагаемые формулы для расчетов коэффициентов ПИД-регуляторов для систем первого порядка с запаздыванием

| Объект              | Параметры ПИД-регулятора |                                  |  |  |  |        |
|---------------------|--------------------------|----------------------------------|--|--|--|--------|
|                     | $K_P$                    | $K_I$                            | $K_D$                                      | $T_D$                                    | $T_I$                                    | $N$    |
| $T$                 | $T$                      | $\alpha T$                       | $\varepsilon T$                            | 1  | 1  | 2...20 |
| Пределы ограничений | $T$                      | $\alpha T$<br>$\alpha = 0.1...3$ | $\varepsilon T$<br>$\varepsilon = 0.1...2$ | $\varepsilon$<br>$\varepsilon = 0.1...2$ | $\frac{1}{\alpha}$<br>$\alpha = 0.1...3$ |        |

Для проверки предложенного метода проектирования ПИД-регуляторов, создадим Simulink-модель, изображенную на рис. 2, с четырьмя различными аппроксимированными системами, три из которых являются системами первого порядка, а четвертая – описывает процесс первого порядка с транспортным запаздыванием.

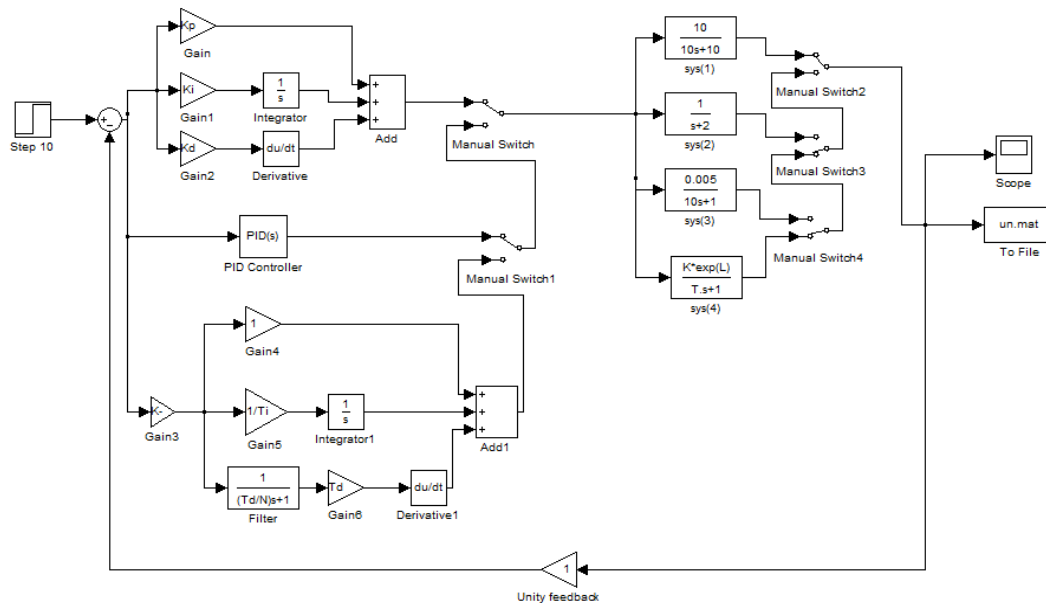


Рис. 2. Simulink-модель для тестирования предложенного способа ПИД-регулирования

## 2. Результаты моделирования в среде Matlab/ Simulink

При тестировании в среде Matlab предложенного метода проектирования ПИД-регуляторов [1] для систем первого порядка и объекта первого порядка с запаздыванием, необходимо применить формулы, приведенные в табл. 2, в виде функции, обозначаемой «PID\_method». Значения законов ПИД-регулирования, вычисленные по предложенным формулам, а также величины коэффициентов настройки  $K_D$  и  $K_I$ , ускоряющие реакцию системы и снижающие перерегулирование, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Вычисленные значения коэффициентов ПИД-регуляторов.

| № | Параметры ПИД |     |     |       |       |       |       |       |     |
|---|---------------|-----|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-----|
|   | $T$           | $K$ | $L$ | $K_P$ | $K_I$ | $K_D$ | $T_D$ | $T_I$ | $N$ |
| 1 | 1             | 1   | 1   | 1     | 1     | 1     | 1     | 1     | 2   |
| 2 | 1             | 1   | 0.3 | 1     | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 3.333 | 2   |

При подстановке вычисленных коэффициентов ПИД в Simulink-модель для наблюдения реакции конкретной системы необходимо производить действия с переключателями Manual Switch. При этом для каждой системы результаты реакции отображаются при помощи блока Scope в виде графиков, изображенных на рис. 3 и 4.

На рис. 3 изображена реакция системы 1 (sys1) при следующем положении переключателей: Manual Switch – вверх, Manual Switch2 – вверх, а положение Manual Switch1 произвольно; и значениях коэффициентов, вычисленных в табл. 3 в первом случае. Таким образом, наблюдается воздействие обычного ПИД-регулятора на систему 1 (sys1) по методу Николса - Циглера [1].

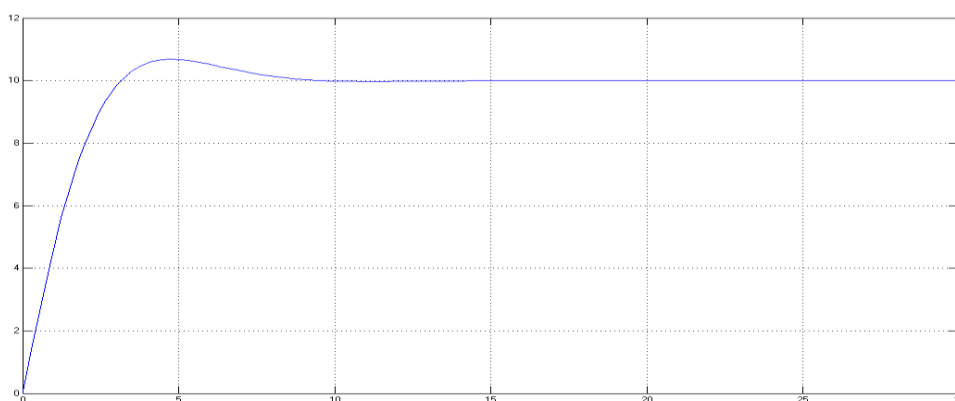
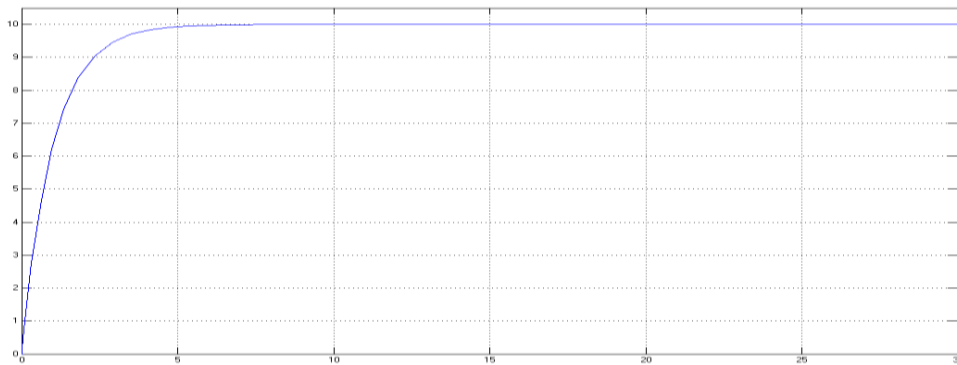
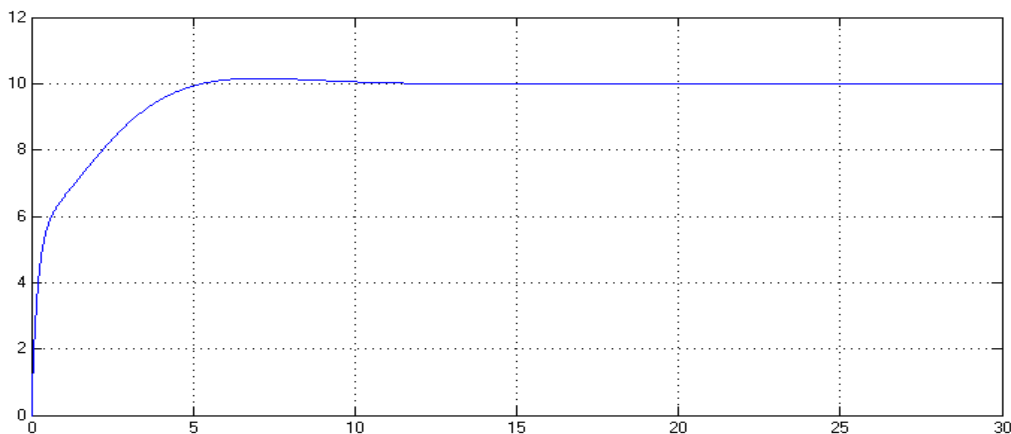


Рис. 3.

На рис. 4 изображена реакция системы 1 (sys1) при следующем положении переключателей: Manual Switch – вниз, Manual Switch1 – вверх, Manual Switch2 – вверх; и значениях коэффициентов, вычисленных в таблице 3 в первом случае. Таким образом, наблюдается воздействие встроенного ПИД-контроллера Simulink на систему 1 (sys1).



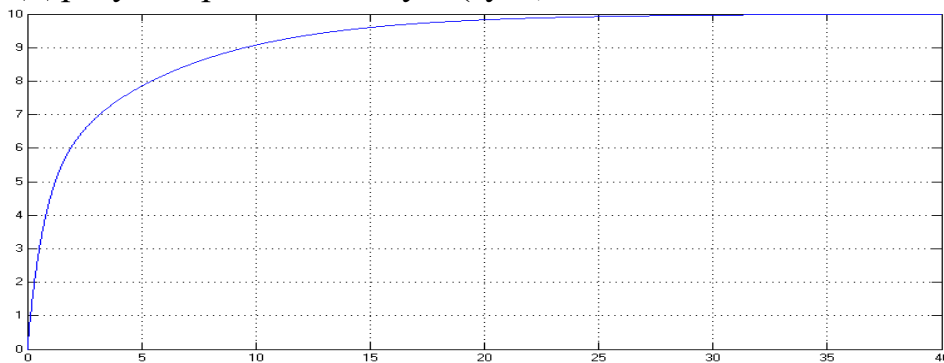
**Рис. 4.**



**Рис. 5.**

На рис. 5 изображена реакция системы 1 (sys1) при следующем положении переключателей: Manual Switch – вниз, Manual Switch1 – вниз, Manual Switch2 – вверх; и значениях коэффициентов, вычисленных в таблице 3 в первом случае. Таким образом, наблюдается воздействие ПИД-регулятора, смоделированного с учетом фильтра низких частот, на систему 1 (sys1).

На рис. 6 изображена реакция системы 1 (sys1) при следующем положении переключателей: Manual Switch – вверх, Manual Switch2 – вверх, а положение остальных переключателей – произвольно; и значениях коэффициентов, вычисленных в табл. 3 во втором случае. Таким образом, наблюдается воздействие обычного ПИД-регулятора на систему 1 (sys1).



**Рис. 6.**

На рис. 7 изображена реакция системы 2 (sys2) при следующем положении переключателей: Manual Switch – вверх, Manual Switch2 – вниз, Manual Switch3 – вверх, а положение остальных переключателей - произвольно; и зна-

чениях коэффициентов, вычисленных в табл. 3 во втором случае. Таким образом, наблюдается воздействие обычного ПИД-регулятора на систему 2 (sys2).

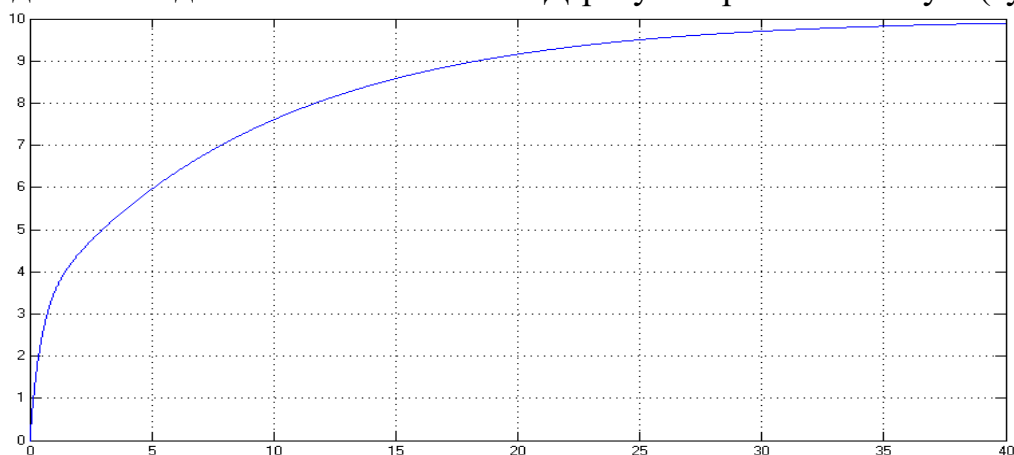


Рис. 7.

На рис. 8 изображена реакция системы 2 (sys2) при следующем положении переключателей: Manual Switch – вниз, Manual Switch1 – вниз, Manual Switch2 – вниз, Manual Switch3 – вверх, а положение остальных переключателей - произвольно; и значениях коэффициентов, вычисленных в табл. 3 во втором случае. Таким образом, наблюдается воздействие ПИД-регулятора, смоделированного с учетом фильтра низких частот, на систему 2 (sys2).

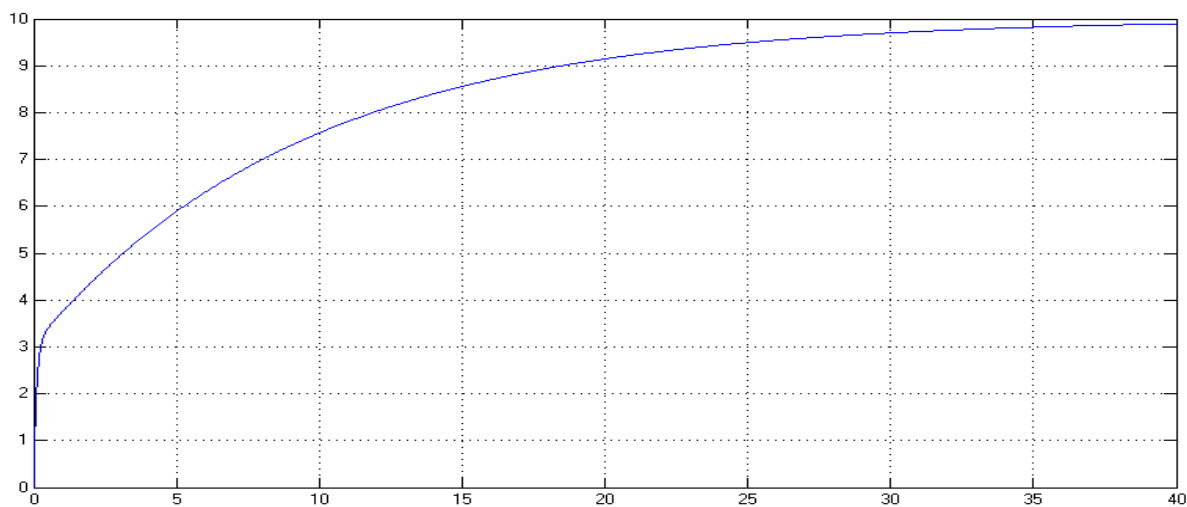


Рис. 8.

**Заключение.** В статье представлены результаты исследований на основе простой и эффективной методики проектирования ПИД-регуляторов, основанной на знании параметров свободного движения объектов. Предложенная модель была протестирована на различных динамических системах, включая системы первого, второго, третьего и четвертого порядков, а также объектов первого порядка с запаздыванием. Приведены результаты численного моделирования: зависимости реакций систем на ступенчатый входной сигнал  $10 \cdot 1(t)$ .

Анализ результатов тестирования показывает, что важным компромиссом моделирования является компромисс между средней быстротой сглаживания выходного сигнала и приемлемым перерегулированием. Это позволяет полу-

читать требуемые показатели качества переходных процессов: апериодичность выходного сигнала и минимальное время регулирования, а также определить величину критического транспортного запаздывания, при котором объект управления становится неустойчивым.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сизых В.Н., Лайков М.И., Палатов Д.А. Модальный способ определения параметров ПИД-регулятора редуцированной модели линейного объекта // В сб. «Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте». Иркутск: Изд-во ИРГУПС, 2015. Вып. 26. – С. 5-18.
2. Булгаков В.В., Кулабухов В.С. Сравнительный анализ формализованных методов синтеза регулятора следящей системы. // Приборы. 2013. № 1 (151). – С. 39-44.
3. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7 / И.Е. Ануфриев, А.Б. Смирнов, Е.Н. Смирнова. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – С. 386-403.
4. Лазарев Ю.Н. Моделирование процессов и систем в MATLAB / Ю.Н. Лазарев. Учебный курс. – СПб.: Питер, 2005. – 512 с.

УДК 681.5

*Е.Ю. Беляев, В.Ф. Диль*

### СИНТЕЗ АЛГОРИТМА НЕЛИНЕЙНОГО ПИЛОТАЖНОГО КОНТУРА ВОЗДУШНОГО СУДНА МЕТОДОМ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧ ДИНАМИКИ

*В статье рассматривается методика синтеза алгоритмов нелинейных систем управления траекторным движением воздушного судна методом обратных задач динамики и возможности совмещения его с решением прямых задач на пилотажном уровне. Рассматриваемая методика базируется на исследовании свойств пилотажного контура по динамическим уравнениям Эйлера.*

*Ключевые слова: пространственное движение воздушного судна, нелинейная система автоматического управления, метод обратных задач динамики.*

**Введение.** Управление воздушным судном (ВС) в пространстве условно разделено на два взаимосвязанных уровня - пилотажный и траекторный. Задачей пилотажного уровня является выдерживание углового положения ВС путем изменения моментов управления. В основу формирования управлений положены исследования динамических уравнений Эйлера, описывающие вращательное движение ВС. Задачей траекторного уровня является управление положением центра масс ВС через изменение действующих на ВС сил. В основе этого движения лежат динамические уравнения поступательного движения. Очевидно, что организация оптимальности управления на одном из уровней влечет за собой оптимальность управления на другом уровне. Рассмотрим вариант синтеза управления на траекторном уровне методом обратных задач



динамики (ОЗД) с последующим решением прямых задач на пилотажном уровне.

### 1. Решение обратной задачи динамики для траекторного контура

Пусть объект управления описывается уравнениями линейных скоростей для траекторного контура [2]

$$\dot{V}_K = \Omega V_K + gn - g\varepsilon_2, \quad (1)$$

где  $V_K$  — вектор земных скоростей ЛА,  $\Omega$  — кососимметрическая матрица угловых скоростей специального вида,  $n$  — вектор перегрузок,  $\varepsilon_2$  — второй столбец матрицы направляющих косинусов.

Обозначим “новый” вектор входных воздействий  $n^* = n - \varepsilon_2$ .

Тогда уравнения (1) принимают вид

$$\dot{V}_K = \Omega V_K + gn^* \quad (2)$$

или в развернутой форме запишутся как

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{kx} \\ \dot{V}_{ky} \\ \dot{V}_{kz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_2 & -\omega_y \\ -\omega_2 & 0 & \omega_x \\ \omega_y & -\omega_x & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{kx} \\ V_{ky} \\ V_{kz} \end{bmatrix} + g \begin{bmatrix} n_x^* \\ n_y^* \\ n_z^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

В последней формуле введем обозначения:  $x \rightarrow 1, y \rightarrow 2, z \rightarrow 3$

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{k1} \\ \dot{V}_{k2} \\ \dot{V}_{k3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_3 & -\omega_2 \\ -\omega_3 & 0 & \omega_1 \\ \omega_2 & -\omega_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{k1} \\ V_{k2} \\ V_{k3} \end{bmatrix} + g \begin{bmatrix} n_x^* \\ n_y^* \\ n_z^* \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Полагаем, что на интервале оптимизации  $\Delta t \in T, T = [t_0, t_k], \omega_s = const, s = 1..3, t_0 = 0, t_k$  — нефиксированный момент времени.

Пусть в начальный момент времени  $t = t_0 = 0$  состояния объекта (1) характеризуются значениями линейных скоростей  $V_{ks}(0) = V_{ks0}$  и требуется найти такие управляющие воздействия  $\delta_i$  ( $i = \alpha, n, v$ ), при которых (1) переходит из состояния  $V_{ks}(0)$  в новое состояние  $V_{ks}^0$  и находится в этом состоянии бесконечно долго. Если  $V_{ks}^0 = V_{ks}^0(t)$ , то линейные скорости определяют требуемый профиль полёта (пространственную траекторию движения ЛА). При этом необходимо, чтобы линейные скорости управляемого движения по каждой степени свободы с требуемой точностью следовали за скоростями, определяемыми эталонной моделью

$$\ddot{V}_{ks}^* + \chi_{s1} \dot{V}_{ks}^* + \chi_{s0} V_{ks}^* = \chi_{s0} V_{ks}^0, \quad (5)$$

где  $\chi_{s1}, \chi_{s0}$ , коэффициенты эталонной модели,  $V_{ks}^*(t) \rightarrow V_{ks}^0$  при  $t \rightarrow \infty$ .

Численные значения коэффициентов эталонной модели получают идентификацией аэродинамических объектов методом синхронного детектирования [7] на основе пробных воздействий рулей на модель ВС

Степень приближения управляемого процесса к эталонному движению  $V_{kS}^*(t) \rightarrow V_{kS}^0$  определяется функционалом

$$G(n^*) = \frac{1}{2} \sum_1^3 [\dot{V}_{kS}^* - \dot{V}_{kS}(t, n^*(\delta_i))]^2 \quad (6)$$

который характеризует энергию ускорения поступательного движения в окрестности фазовых траекторий эталонных моделей.

Если в качестве управляющих функций выбрать не отклонения рулей  $\delta_i$  ВС, а управляющие силы  $F_S$  и эквивалентные им перегрузки  $n^* (n = \frac{F_S}{G})$ , то задача синтеза уравнений может быть решена поэтапно.

На первом этапе синтезируются управляющие воздействия  $n_s^*(V_k)$ , а затем, из силовых характеристик ЛА и формул:

$$\begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_1^* \\ n_2^* \\ n_3^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{21} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{23} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} n_1 - \frac{P}{G} \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix} = \frac{qS}{G} D_{c\delta}^c \begin{bmatrix} c_{1a} \\ c_{2a} \\ c_{3a} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\begin{aligned} c_{1a} &= c_{10}(\alpha, M) + A_H c_{2a}^2 + c_1^{\delta\delta}(\alpha) \delta_\delta + c_1^{\delta\delta}(\alpha) \delta_\delta, \\ c_{2a} &= c_{20}(\alpha, M) + c_2^{\delta\delta}(\alpha) \delta_\delta + c_2^\varphi(\alpha) \varphi + c_2^{\delta\delta}(\alpha) \delta_\delta + c_2^{\delta\mu\mu}(\alpha) \delta_{\mu\mu} + c_2^{\delta\nu\nu}(\alpha) \delta_{\nu\nu}, \\ c_{3a} &= c_3^{\delta H}(\alpha, \beta) \delta_H + c_3^\beta(\alpha, \beta) \beta + c_3^{\delta\delta}(\alpha) \delta_\delta, \end{aligned} \quad (9)$$

определяются законы управления рулями  $\delta_i$ ,  $i = \delta, \varepsilon, H$

Законы управления  $n_s^*(V_k)$  по каждой степени свободы получаем, используя метод простого градиента

$$\frac{dn_s^*(V_k)}{dt} = - \sum_{j=1}^3 \tilde{r}_{sj} \frac{\partial G(n^*)}{\partial n_j^*}, \tilde{r}_{sj} = const. \quad (10)$$

Согласно (4), (6) компоненты градиента (10) равны

$$\frac{\partial G(n^*)}{\partial n_j^*} = g(\dot{V}_{kj}^* - \dot{V}_{kj}) \quad (11)$$

Отсюда следует, что

$$\dot{n}_s^*(V_k) = g \sum_{j=1}^3 \tilde{r}_{sj} (\dot{V}_{kS}^* - \dot{V}_{kS}) \quad (12)$$

или после интегрирования обеих частей

$$n_s^*(V_k) = \sum_{j=1}^3 r_{sj} (V_{ks}^* - V_{ks}) \quad (13)$$

где  $r_{sj} = g\tilde{r}_{sj}$ , требуемые значения  $V_{ks}^*$  вычисляются из (5).

Структура матрицы  $R = \|r_{sj}\|$  определяется характером перекрёстных связей по управляющим воздействиям в (9)

$$R = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} & 0 \\ r_{21} & 0 & 0 \\ 0 & r_{32} & r_{33} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} c_1^{\delta_6}(\alpha) & c_1^{\delta_3}(\alpha) & 0 \\ c_2^{\delta_6}(\alpha) & 0 & 0 \\ 0 & c_3^{\delta_3}(\alpha) & c_3^{\delta_H}(\alpha, \beta) \end{vmatrix}. \quad (14)$$

Управляющие воздействия  $\delta_i$  определяется из уравнений (7), (8) и (9). С одной стороны, из уравнений (8) вычисляем коэффициенты аэродинамических сил

$$\frac{mg}{qS} (D_{ce}^c)^{-1} \begin{bmatrix} -\frac{P}{G} + n_1^* + \varepsilon_{21} \\ n_2^* + \varepsilon_{22} \\ n_3^* + \varepsilon_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{1a} \\ c_{2a} \\ c_{3a} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

где

$$D_{ce}^c = \begin{bmatrix} \cos \alpha \cos \beta & -\sin \alpha \cos \beta & \sin \beta \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ -\cos \alpha \sin \beta & \sin \alpha \sin \beta & \cos \beta \end{bmatrix}^T, \quad \alpha = -\arctg\left(\frac{V_2}{V_1}\right), \quad \beta = \arcsin\left(\frac{V_3}{V}\right),$$

$$V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2}, \quad \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{k1} \\ V_{k2} \\ V_{k3} \end{bmatrix} - (D_H^{ce})^T \begin{bmatrix} \Delta W_1 \\ \Delta W_2 \\ \Delta W_3 \end{bmatrix},$$

$[\Delta W_1 \quad \Delta W_2 \quad \Delta W_3]^T$  - компоненты вектора скорости, вычисленные в нормальной СК,

$$\varepsilon = D_H^{ce} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \mathcal{G} & \sin \gamma \sin \phi - \cos \gamma \cos \phi \sin \mathcal{G} & \cos \gamma \sin \phi + \sin \gamma \cos \phi \sin \mathcal{G} \\ \sin \mathcal{G} & \cos \gamma \cos \mathcal{G} & -\sin \gamma \cos \mathcal{G} \\ -\sin \phi \cos \mathcal{G} & \sin \gamma \cos \phi + \cos \gamma \sin \phi \sin \mathcal{G} & \cos \gamma \cos \phi - \sin \gamma \sin \phi \sin \mathcal{G} \end{bmatrix}$$

- направляющие косинусы скоростной СК относительно и нормальной СК.

С другой стороны, выписываются уравнения (9), в которых неизвестными являются отклонения рулей  $\delta_i$ . Следовательно, через вычисленные значения ко-

эффицентов аэродинамических сил можно получить следующую систему алгебраических уравнений

$$\begin{aligned} c_1^{\delta_6}(\alpha)\delta_6 + c_1^{\delta_9}(\alpha)\delta_9 &= c_{1a} - c_{10}(\alpha, M) - A_H c_{2a}^2, \\ c_2^{\delta_6}(\alpha)\delta_6 &= c_{2a} - c_{20}(\alpha, M) - c_2^\varphi(\alpha)\varphi - c_2^{\delta_3}(\alpha)\delta_3 - c_2^{\delta_{миц}}(\alpha)\delta_{миц} - c_2^{\delta_{np}}(\alpha)\delta_{np}, \\ c_3^{\delta_H}(\alpha, \beta)\delta_H + c_3^{\delta_9}(\alpha)\delta_9 &= c_{3a} - c_3^\beta(\alpha, \beta)\beta \end{aligned} \quad (16)$$

или после преобразования

$$\begin{aligned} \delta_6 &= \frac{c_{2a} - c_{20}(\alpha, M) - c_2^\varphi(\alpha)\varphi - c_2^{\delta_3}(\alpha)\delta_3 - c_2^{\delta_{миц}}(\alpha)\delta_{миц} - c_2^{\delta_{np}}(\alpha)\delta_{np}}{c_2^{\delta_6}(\alpha)}, \\ \delta_9 &= \frac{c_{1a} - c_{10}(\alpha, M) - A_H c_{2a}^2 - c_1^{\delta_6}(\alpha)\delta_6}{c_1^{\delta_9}(\alpha)}, \\ \delta_H &= \frac{c_{3a} - c_3^\beta(\alpha, \beta)\beta - c_3^{\delta_9}(\alpha)\delta_9}{c_3^{\delta_H}(\alpha, \beta)}, \end{aligned} \quad (17)$$

Синтезированные ЗУ (17) формируются как функции, зависящие от перегрузок, то есть  $\delta_6 = \delta_6(n_y), \delta_9 = \delta_9(n_x, n_y), \delta_H = \delta_H(n_y, n_z)$  или, другими словами, как зависимости от управляющих сил  $F_i (i = x, y, z)$ .

## 2. Решение прямой задачи динамики для пилотажного контура

Синтезированные законы управления (17) позволяют определить управляющие аэродинамические моменты  $M_i (i=1,2,3 \rightarrow x,y,z)$

$$M_i = qSlm_i, M_2 = qSb_a m_3, \quad (18)$$

как функции от угловых скоростей:  $M_1 = M_1(\omega_1, \omega_2), M_2 = M_2(\omega_1, \omega_2), M_3 = M_3(\omega_3)$ , где

$$\begin{aligned} m_1 &= m_1^{\bar{\omega}_1}(\alpha)\bar{\omega}_1 + m_1^{\bar{\omega}_2}(\alpha)\bar{\omega}_2 + m_1^\beta(\alpha)\beta + m_1^{\delta_H}(\alpha)\delta_H + m_1^{\delta_9}(\alpha)\delta_9, \bar{\omega}_1 = \frac{l\omega_2}{2V}; \\ m_2 &= m_2^{\bar{\omega}_1}(\alpha)\bar{\omega}_1 + m_2^{\bar{\omega}_2}(\alpha)\bar{\omega}_2 + m_2^\beta(\alpha)\beta + m_2^{\delta_H}(\alpha)\delta_H + m_2^{\delta_9}(\alpha)\delta_9, \bar{\omega}_2 = \frac{l\omega_2}{2V}; \\ m_3 &= m_{30}(\alpha) + m_3^\alpha(\alpha)\alpha + m_3^{\bar{\omega}_3}(\alpha)\bar{\omega}_3 + m_3^{\delta_6}(\alpha)\delta_6 + m_3^\varphi(\alpha)\varphi, \bar{\omega}_3 = \frac{b_a\omega_3}{V}; \\ \alpha &= -\arctg\left(\frac{V_3}{V}\right), \beta = \arcsin\left(\frac{V_3}{V}\right), V = \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2} \end{aligned}$$

Вращательное движение ЛА описывается динамическими уравнениями Эйлера

$$\begin{bmatrix} I_1 \dot{\omega}_1 \\ I_2 \dot{\omega}_2 \\ I_2 \dot{\omega}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (I_3 - I_2)\omega_2\omega_3 \\ (I_1 - I_2)\omega_1\omega_3 \\ (I_2 - I_1)\omega_1\omega_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1(\omega) + M_1 \\ m_2(\omega) + M_2 \\ m_3(\omega) + M_3 \end{bmatrix} \quad (19)$$

где  $m_1(\omega) = 0, m_2(\omega) = -c_2\omega_2 - K_{дв}\omega_3, m_3(\omega) = -c_3\omega_3 + K_{дв}\omega_2, m_s(\omega)$  – моменты, характеризующие изменение кинетической энергии вращающихся частей АД и влияние диссипативных сил ( $s=1..3$ ).

Прямая задача динамики формулируется следующим образом.

Известна математическая модель вращательного движения ЛА (19) и её состояние в начальный момент времени

$$\omega_s(0) = \omega_{s0}, \dot{\omega}_s(0) = \dot{\omega}_{s0}, s = 1..3. \quad (20)$$

Заданы управляющие моменты  $M_s$  как функции от  $\omega_s$ . Требуется найти угловые скорости  $\omega_s = \omega_s(t), t \in [t_0, t_k]$ .

Решение сформулированной задачи сводится к интегрированию замкнутой регулятором (18) системы (19) с начальными условиями (20).

На основе полученного решения  $\omega_s = \omega_s(t)$  аналитически или численно интегрируются уравнения Пуассона

$$\begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_{11} & \dot{\varepsilon}_{21} & \dot{\varepsilon}_{31} \\ \dot{\varepsilon}_{12} & \dot{\varepsilon}_{22} & \dot{\varepsilon}_{32} \\ \dot{\varepsilon}_{13} & \dot{\varepsilon}_{23} & \dot{\varepsilon}_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_3 & -\omega_2 \\ -\omega_3 & 0 & \omega_1 \\ \omega_2 & -\omega_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{21} & \varepsilon_{31} \\ \varepsilon_{12} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{32} \\ \varepsilon_{13} & \varepsilon_{23} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (21)$$

с начальными условиями  $\varepsilon_{ij}(0)$ , определяемых балансировочными значениями углов Эйлера:  $\mathcal{G}(0) = \mathcal{G}_{гп}, \gamma(0), \psi(0)$ .

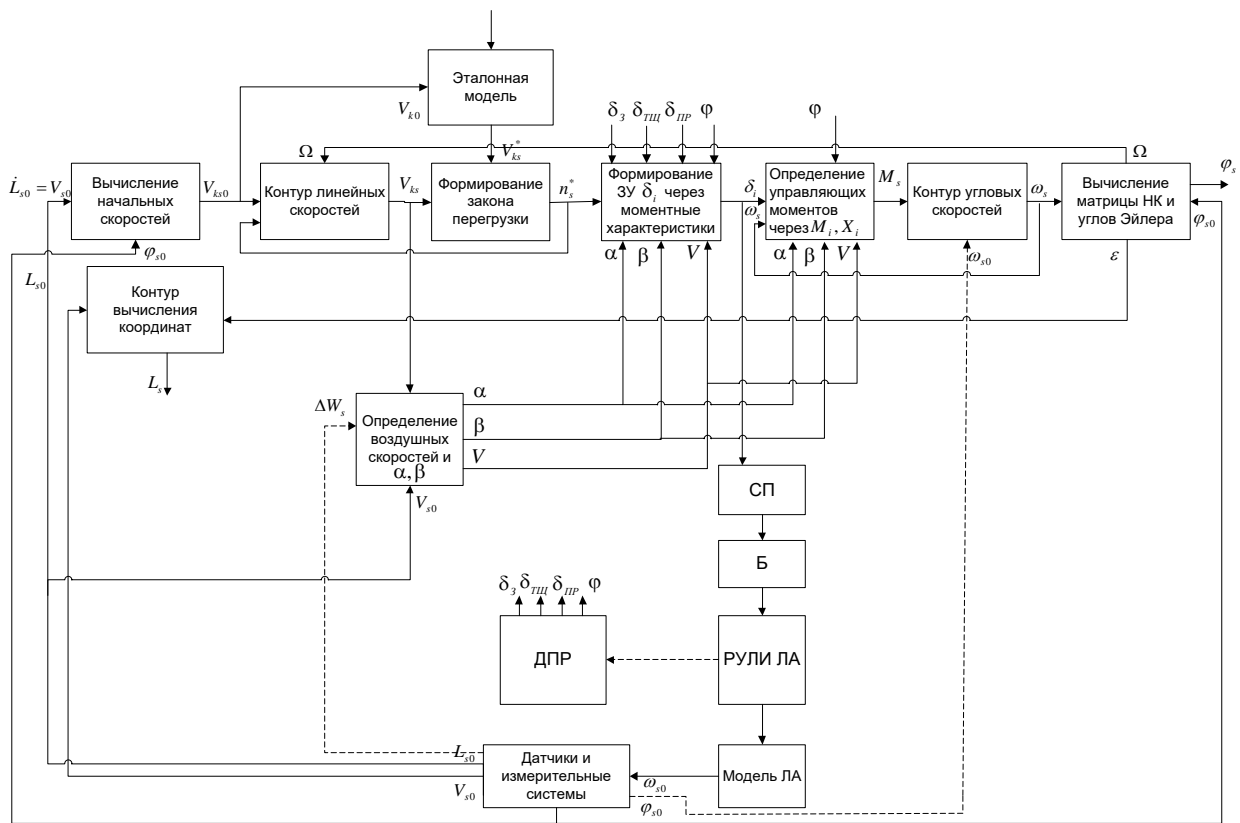
Для определения текущих углов Эйлера достаточно использовать 3 элемента матрицы направляющих косинусов, например:

$$\varepsilon_{21} = \sin \mathcal{G}, \varepsilon_{22} = \cos \gamma \cos \mathcal{G}, \varepsilon_{11} = \cos \phi \cos \mathcal{G}.$$

Тогда углы Эйлера определяются по формулам

$$\mathcal{G} = \arcsin \varepsilon_{21}, \gamma = \arccos \left( \frac{\varepsilon_{22}}{\cos \mathcal{G}} \right); \psi = \arccos \left( \frac{\varepsilon_{11}}{\cos \mathcal{G}} \right). \quad (22)$$

Характерным свойством плоскосимметричного ЛА является зеркальность геометрических преобразований и преобразований энергии движения. С учётом сказанного на основе формул, приведенных выше, а также математических зависимостей, определяющих оптимизацию траекторного контура, может быть построена функциональная схема, определяющая архитектурный облик перспективной нелинейной САУ самолётов (рис. 1).



**Рис. 1. Функциональная схема контура управления ВС, построенного через оптимизацию методом ОЗД линейных скоростей**

В сравнении с контуром управления через оптимизацию вращательного движения методом ОЗД, приведенного в [8], данный контур построен через оптимизацию методом ОЗД линейных скоростей. Очевидно, что при их построении нужно учитывать специфику решаемых задач пилотирования. В таких режимах полёта как выполнение различных виражей, а также в режимах стабилизации горизонтального полёта, приведения к горизонту и др. целесообразно оптимизировать контур угловых скоростей. В режимах траекторного управления (полёт по маршруту и др.) необходимо использовать оптимизацию контура линейных скоростей.

Таким образом, применение концепций обратных задач динамики в сочетании с организацией контуров управления по принципу симметрии (содержание обратной и прямой задачи динамики обратимо относительно синтезируемых управлений по силовым и моментным характеристикам) позволяет научно обосновано решить важную техническую проблему построения нелинейных САУ ВС.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- 1 Буков В. Н., Сизых В. Н. Метод и алгоритмы решения сингулярно-вырожденных задач аналитического конструирования регуляторов // Изв. АН. Теория и системы управления. М.: 2001, №5. – С.43-61.
- 2 Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование. М.: Наука, 1973. – 240 с.
- 3 Бюшгенс Г.С. Студнев Р.В. Динамика продольного и бокового движения. – М:

Машиностроение, 1979. – 350с.

4 *Ефремов А.В., Захарченко В.Ф., Овчаренко В.Н. и др.* Динамика полета/ Под ред. Г.С. Бюшгенса – М.: Машиностроение, 2011. – 776 с.

5 *Крутько П.Д.* Обратные задачи динамики управляемых систем. Нелинейные модели. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 328 с.

6 *Крутько П.Д.* Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. М.: Машиностроение, 2004. – 576 с.

7 *Красовский А.А.* Динамика непрерывных самонастраивающихся систем. – М.: Физматгиз, 1963. – 467 с.

8 *Диль В.Ф., Сизых В.Н.* Методика синтеза нелинейных систем автоматического управления пространственного движения воздушного судна. Сб. науч. ст. по материалам докл. II Всероссийской НПК «АВИАТОР» (11-13 февраля 2015 г.): В 2-х т. Т. 2. – Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2015. – 200 с.

## РАЗДЕЛ II. МОДЕЛИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ

УДК 621.865(075.8)

С.В. Алексеенко, С.П. Круглов

### ЦИФРОВОЙ РЕГУЛЯТОР ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРА ПУТЕВОГО МАШИННОГО ГАЙКОВЕРТА

*Рассматривается описание математической модели штатной системы управления дизель-генератора путевого машинного гайковерта, широко используемого на железной дороге для обслуживания железнодорожного полотна. Анализируются недостатки, предлагается доработка системы управления на основе построения дополнительного контура управления.*

Ключевые слова: путевой машинный гайковерт, дизель-генератор, ПИД-регулятор.

Наиболее трудоемкими работами в путевом хозяйстве железных дорог являются укладка и текущее содержание бесстыкового пути. При этих работах приходится завинчивать и отвинчивать большое количество гаек клеммных и закладных болтов (около 8000 на 1 км пути). Для разрядки температурных напряжений такие работы предусмотрено выполнять два раза в год.

До сравнительно недавнего времени эти работы производились вручную или при помощи механизированного инструмента. В последние годы промышленностью освоен выпуск специальных машин непрерывного действия – путевых моторных гайковертов (ПМГ) – на основе принципа, предложенного известным изобретателем и рационализатором Д.Д. Матвиенко [1]. Эта путевая машина (рис.1) предназначена для отвинчивания, смазки и завинчивания гаек, клеммных и закладных болтов при различных видах ремонта пути, а также при разрядке температурных напряжений.



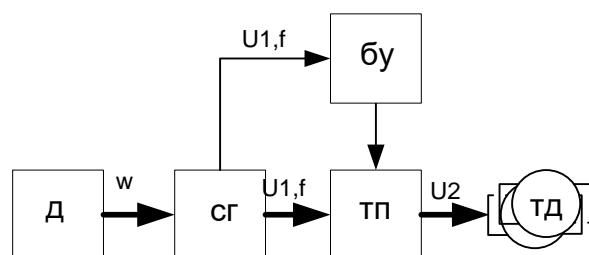
**Рис. 1. Машина для закрепления и смазки клеммных и закладных болтов непрерывного действия**

Машина имеет два режима работы: транспортный и рабочий. В транспортном режиме путевая машина самоходным образом перемещается к месту рабо-



ты, при этом скорость развивается до 100 км/ч. В рабочем режиме: процесс ослабления – затягивания гаек крепления рельсов – скорость составляет: 0,6-1 км/ч. Скорость стабилизируется автоматикой. Машина приводится в движение двумя электродвигателями постоянного тока (двигатели). Во всех режимах работы тяговые двигатели питаются выпрямленным с помощью тиристорного преобразователя током, управление которым осуществляется с помощью микропроцессорного блока управления. Источником электроэнергии для тяговых двигателей является трехфазный синхронный генератор ГС-200 (ГСФ-200), привод которого осуществляется дизельным двигателем типа Д-12. Выходное номинальное напряжение генератора 400 В, частота 50 Гц.

На рис. 2 представлена структурная схема рассматриваемой путевой машины в транспортном режиме.



**Рис. 2. Структурная схема машины ПМГ в транспортном режиме: Д – дизельный двигатель, СГ – синхронный генератор, БУ – блок управления, ТП – тиристорный преобразователь, ТД – тяговые двигатели.**

Для нормальной работы микропроцессорного блока управления предъявляются определенные требования к качеству источника питания. Это связано, например, с тем, что при уходе частоты питающего напряжения от номинального значения более, чем на 5 Гц происходит “сбой фаз”, после чего необходима перезагрузка микроконтроллера.

Поэтому к источнику электроэнергии путевой машины – синхронному генератору предъявляются требование по обеспечению стабильности частоты напряжения. А поскольку валы генератора и приводного двигателя соединены между собой жестко, – требуется стабилизация оборотов дизеля.

Как правило, на пути движения машины имеются неровности в виде подъемов и спусков, а также возникают другие факторы, меняющие нагрузку двигателя, в следствии чего частота генератора “плавает”. Задача сводится к тому, чтобы поддерживать обороты дизеля на уровне 1500 об/мин.

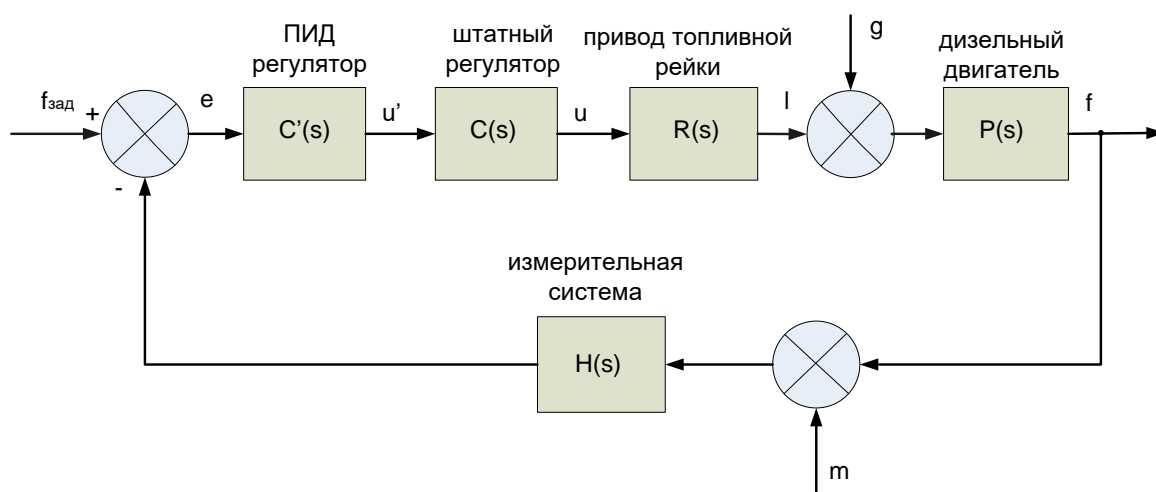
Для решения этой задачи имеется штатная система регулирования оборотов дизеля, построенная на механическом способе поддержания давления в топливном насосе высокого давления системы питания дизеля. Однако она не обеспечивает требуемой точности из-за малого диапазона регулировок. Поэтому кроме указанной имеется также штатная электронная система регулирования частоты, которая основана на увеличении (уменьшении) подачи количества топлива в систему питания дизеля. Так как эта система иностранного производства

–алгоритм работы представляет коммерческую тайну, поэтому она является не ремонтпригодной.

Помимо этого, в процессе эксплуатации (или после ремонта) происходят изменения параметров объекта управления (изменяются коэффициенты передачи, появляются люфты в системе управления и пр.), что ведет к тому, что штатная система управления не справляется с возложенной на нее задачей.

При постоянной эксплуатации ПМГ и периодических его ремонтах очень важным является устранение указанного недостатка. Для этого предлагается создать дополнительную систему регулирования оборотов генератора, которая бы поддерживала заданное число его оборотов–  $50 \pm 5$  Гц независимо от загрузки дизеля и изменившихся параметров системы управления после ремонтных работ. Задача системы управления состоит в том, что бы подавить действие внешнего возмущения (из-за подъемов/ спусков) и обеспечить быстрые и качественные переходные процессы с учетом штатной системы управления. Для качественного управления время переходного процесса системы не должно превышать 3 сек.

В качестве такой системы предлагается построить дополнительный контур управления с пропорционально-интегрально-дифференцирующим регулятором (ПИД-регулятором), включенным перед объектом, как показано на рис.3 [2].



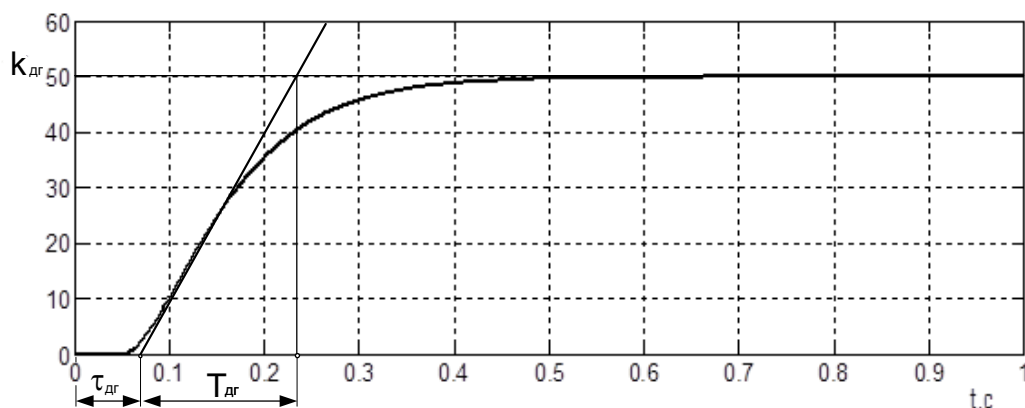
**Рис. 3. Структурная схема системы управления дизелем**

Сигналы и функции системы управления:  $f_{зад}$  – заданная частота генератора;  $f$  – фактическая частота генератора;  $g$  – внешнее возмущение (влияние спусков/ подъемов);  $m$  – шум измерений частоты;  $C(s)$  – передаточная функция штатного регулятора;  $C'(s)$  – передаточная функция ПИД - регулятора;  $R(s)$  – передаточная функция привода системы управления;  $P(s)$  – передаточная функция дизельного двигателя (объекта управления);  $H(s)$  – передаточная измерительной системы;  $s$  – переменная преобразования Лапласа.

Для качественного синтеза указанной системы управления необходима математическая модель всей системы управления.

Для управления дизель-генератором используется топливная рейка, которая имеет максимальное линейное перемещение 0,12 м, при номинальных оборотах перемещение составляет 0,1 м. При максимальной нагрузке изменение частоты не превышает 10 Гц, что соответствует линейному перемещению топливной рейки 0,02 м.

Результаты исследования дизель-генератора как динамического звена при его реакции на единичное ступенчатое воздействие со стороны топливной рейки, показаны на рис. 4.



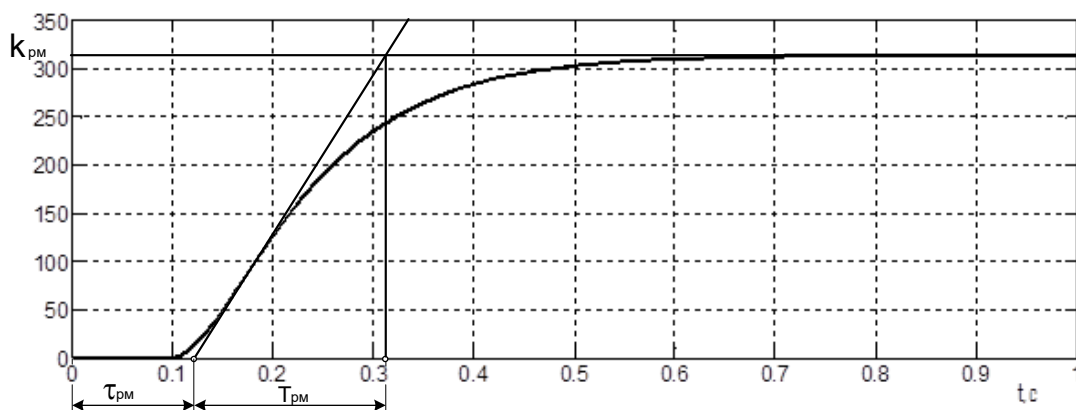
**Рис. 4. График переходной характеристики дизель-генератора: зависимость изменения частоты вращения (Гц) от текущего времени (с)**

Из графика несложно определить, что дизель-генератор может быть описан в виде апериодического звена с транспортной задержкой:

$$W_{дг}(s) = \frac{k_{дг}}{T_{дг}s+1} e^{-\tau_{дг}s}, \quad (1)$$

где:  $T_{дг} = 0,18$  с. – постоянная времени дизель-генератора;  $k_{дг} = 500 \frac{\text{Гц}}{\text{м}}$ . – коэффициент усиления дизель-генератора;  $\tau_{дг} = 0,06$  с. – временная задержка.

Аналогичные исследования реечного механизма, перемещающего топливную рейку дизель-генератора и построенного на двигателе постоянного тока (номинальное напряжение питания +24 В) с управлением от штатной системы представлены на рис. 5.



**Рис. 5. График переходной характеристики реечного механизма: зависимость перемещения топливной рейки (м) от питающего напряжения (В)**

Реечный механизм описывается аналогичным звеном, только со своими параметрами:

$$W_{pm}(s) = \frac{k_{pm}}{T_{pm}s+1} e^{-\tau_{pm}s}, \quad (2)$$

где:  $T_{pm}=0,19$  с. – постоянная времени реечного механизма;  $k_{pm}= 13,09 \frac{м}{В}$ ; – коэффициент усиления реечного механизма;  $\tau_{pm} = 0,12$  с. – временная задержка.

Между двигателем перемещения топливной рейки и непосредственно рейкой находится червячный редуктор для преобразования вращательного движения двигателя ( $w, \frac{рад}{с}$ ; ) в поступательное топливной рейки ( $l, м$ ). Коэффициент передачи редуктора:  $k = \frac{l}{w} = \frac{0,4}{314,16} = 0,00127 \frac{м \cdot с}{рад}$ . Непосредственно на редукторе физически реализованы ограничители перемещения. Максимальное перемещение  $l=0,12$  м. Червячный механизм и реечный механизм имеют люфты: 31,4 рад и 0.005 м соответственно.

ПИД-регулятор имеет передаточную функцию в виде

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s, \quad (3)$$

где  $K_p, K_i, K_d$  – коэффициенты пропорциональной, интегральной и дифференциальной части регулятора.

Для создания и исследования системы управления объектом была построена модель этого объекта с учетом (1), (2) в программной среде Matlab+Simulink [3]. Она представлена на рис 6.

Входным сигналом системы управления является заданная частота вращения дизель-генератора (50 Гц), выход – текущая частота дизель-генератора. Воздействие внешних факторов симитировано звеном “внешняя нагрузка”. Отметим, что в модели после двигателя постоянного тока включен блок интегратора для получения имитации линейного перемещения топливной рейки.

Полная система управления с ПИД-регулятором (3) представлена на рис 7. Здесь рассмотрены два варианта реализации цифрового ПИД-регулятора:

1 – управление двигателем перемещения топливной рейки непрерывным сигналом посредством широтно-импульсной модуляцией (ШИМ);

2 - с релейным принципом управления.

Первый вариант управления реализован с помощью блока PWM2 на верхней части рис. 7, второй – с помощью блока Relay1, на нижней части рис. 7.

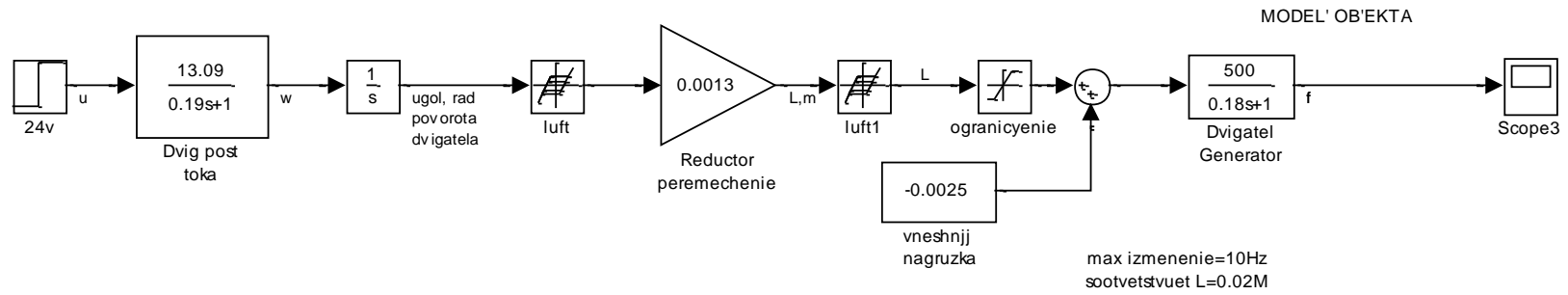


Рис. 6. Имитационная модель объекта

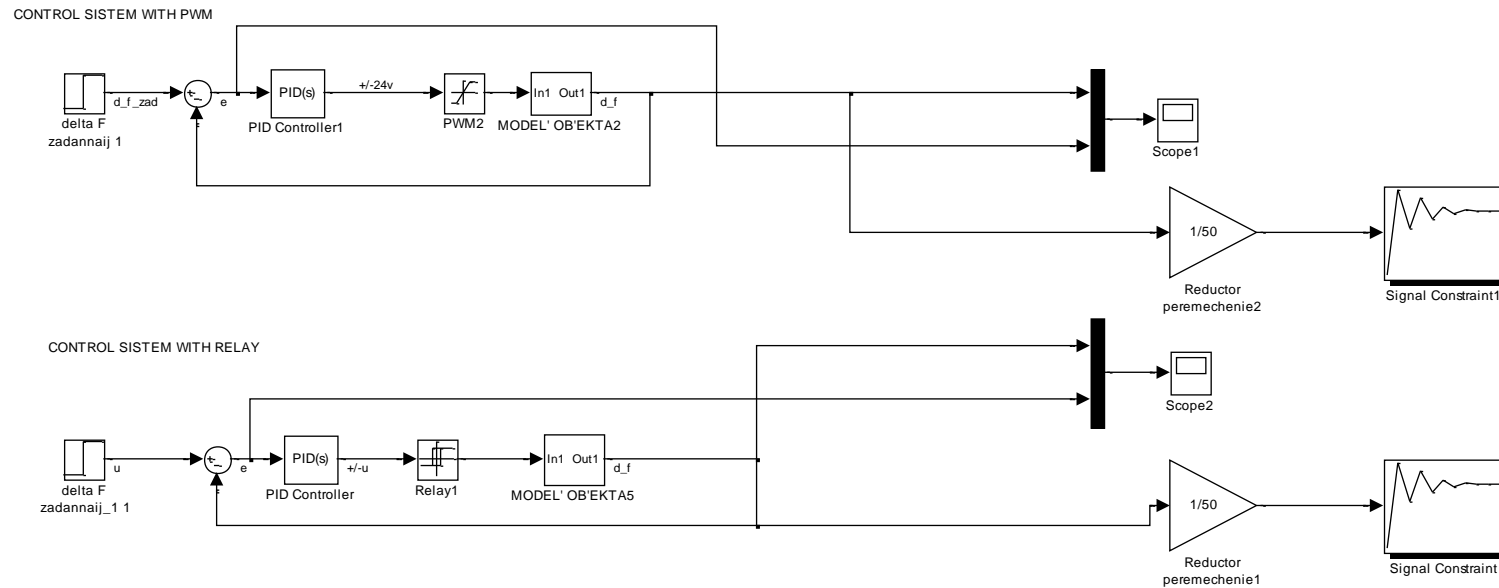
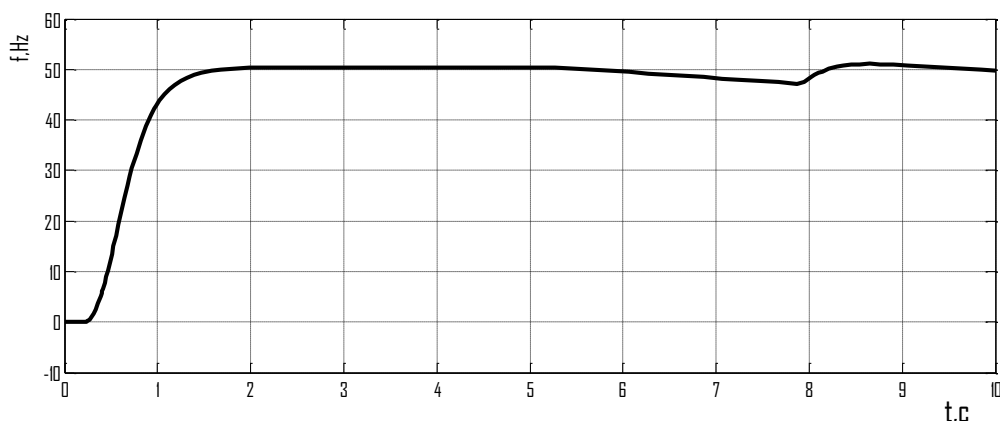


Рис. 7. Имитационная модель системы управления объектом

Для поиска коэффициентов ПИД-регулятора была использована процедура автоматизированной настройки с использованием блока “SignalConstraint” из меню “SimulinkDesignOptimization”. Найденные коэффициенты, удовлетворяющие указанным выше требованиям, имеют значения:  $K_p=1,12$ ;  $K_i=0,01$ ;  $K_d=0,32$ .

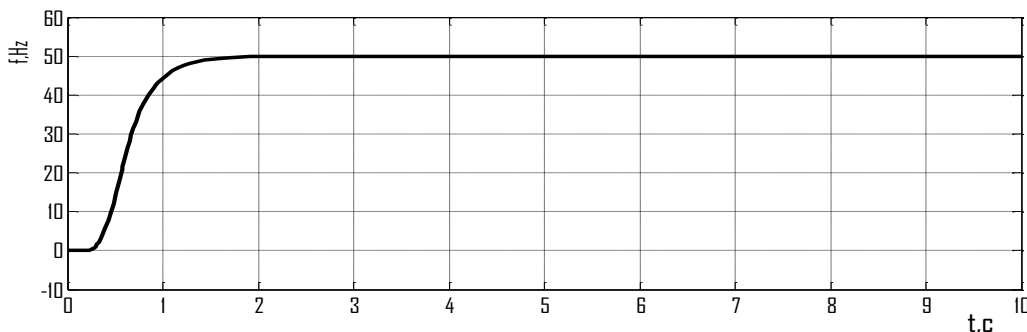
Смоделируем нагрузку и проверим расчетные данные. Из практики замечено, что уход частоты на наиболее крутых склонах (на перегоне Иркутск-Слюдянка) составляет 4 Гц на 100 метров (т.е. 0,04 Гц на 1 м). Исходя из конструктивных особенностей реечного механизма изменение положения рейки на 2,5 мм влечет изменение частоты генератора на 1 Гц. Поэтому внешнюю нагрузку смоделируем в виде дополнительного линейного перемещения топливной рейки и сумматора рис 3.

При найденных значениях коэффициентов ПИД - регулятора и внешней нагрузке (уход частоты генератора на 1 Гц) работа системы управления с ШИМ регулятором соответствует графику, представленному на рис 8. Максимальные всплески не превышают 5 Гц, что соответствует заданию, далее система стабилизируется.



**Рис. 8. График изменения выходного сигнала при ШИМ регулировании**

При тех же значениях коэффициентов ПИД - регулятора и внешней нагрузке (уход частоты генератора на 1 Гц) работа системы управления с релейным регулятором соответствует графику, представленному на рис 9.



**Рис. 9. График изменения выходного сигнала при релейном регулировании**

Из графиков, представленных на рис. 8 и 9, можно сделать вывод, что при релейном регулировании выходная частота более стабильна, однако при практической реализации у каждого варианта есть как положительные качества, так и отрицательные. Так, у релейной схемы появляются дополнительные, менее износостойкие механические элементы (реле), а реализация системы управления с ШИМ – более дорогая и сложная.

Также общим недостатком рассмотренного решения является построение системы управления для конкретной (конкретных параметров системы управления). При их смене, нужно перестраивать коэффициенты ПИД-регулятора. Поэтому перспективным направлением является создание самонастраивающейся или, даже, адаптивной системы управления.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Теклин Н.Б., Рискин Н.Б. Путьевой моторный гайковерт. Учебное пособие для технических школ – М.: МПС РФ, 1996. – 40 с.
2. Поляков К.Ю., Теория автоматического управления – СПб.: 2008. – 305с.
3. Дьяконов В. П. Самоучитель Simulink 5/6/7. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 781 с.

УДК 681.5

*М.В. Баканов, В.Н. Сизых, А.С. Хоровенько*

### АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АДАПТИВНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ

*В статье разработаны математические модели трехколесного мобильного робота на основе аппарата переменных состояния и в операторном виде, на основе которых осуществляется синтез его адаптивной системы управления по методике построения модальных ПИД-регуляторов и по методу обратных задач динамики.*

*Ключевые слова: автономный мобильный робот, математические модели в пространстве состояний и в операторном виде, модальный ПИД-регулятор, метод обратных задач динамики.*

**Введение.** Для описания поведения мобильного робота необходимо разработать его математическую модель. Это позволит без аппаратной реализации мобильного робота проанализировать работу создаваемой системы управления и при необходимости внести необходимые коррекции. Математическая модель мобильного робота состоит из кинематической и динамической моделей. Кинематическая модель является простейшим описанием поведения мобильного робота и допускает исследование его свойств. Динамическая модель является более подробным описанием мобильного робота и учитывает силовые воздействия, произведённые исполнительными механизмами.

Приводимое математическое описание движения мобильного робота справедливо для случая движения робота по горизонтальной плоскости.

Для того чтобы математически описать мобильный робот, необходимо ввести ряд условий, сформулированных в виде следующих допущений [1]:

- 1) будем рассматривать мобильный робот при условии, что его механизм является жёстко связанным;
- 2) колёса являются недеформируемыми и находятся в точечном контакте с поверхностью;
- 3) движение робота осуществляется без проскальзывания;
- 4) платформа рассматривается как твёрдое тело, на котором закреплена колёсная система.

### 1. Кинематическая модель мобильного робота

Поскольку движение робота осуществляется в горизонтальной плоскости, то достаточно рассмотреть плоский случай. На рис. 1 изображен мобильный робот с соответствующими системами координат. В точках  $L$  и  $R$  расположены колёса, оси вращения которых совпадают с отрезком  $LR$  длины  $l$ . Свяжем с роботом систему координат  $O_0X_0Y_0$ , расположив точку  $O_0$  посередине отрезка  $LR$  и направив ось  $X_0$  перпендикулярно  $LR$  в направлении движения. Тогда положение основания робота как твердого тела задается тройкой чисел  $\varphi, x, y$ , где  $\varphi$  – угол между осями  $X$  и  $X_0$ ;  $x, y$  – координаты точки  $O_0$  в абсолютной системе координат  $OXY$ .

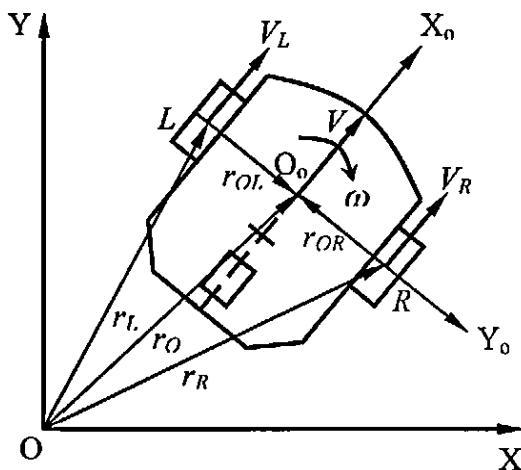


Рис.1 – Кинематическая схема мобильного робота

Положение точек робота  $O_0, L$  и  $R$  в абсолютной системе соответствует радиус-векторам  $r_O, r_L$  и  $r_R$ . При этом, также, положение точки  $O_0$  может быть получено из следующих выражений

$$\begin{aligned} r_O &= r_R + r_{OR}, \\ r_O &= r_L + r_{OL}. \end{aligned} \quad (1)$$



Из кинематики плоского движения известно, что скорость движения любой точки некоторого твёрдого тела может быть представлена в виде

$$V_A = V_O + \omega \times r_{OA}, \quad (2)$$

где  $V_A$  – скорость поступательного движения произвольной точки  $A$ ;

$V_O$  – скорость поступательного движения полюса твёрдого тела;

$\omega$  – скорость вращательного движения твёрдого тела относительно полюса  $O$ ;

$r_{OA}$  – радиус-вектор, определяющий положение точки  $A$  относительно полюса  $O$ .

Таким образом, в соответствии с рис. 1 скорость движения правого и левого колес мобильного робота может быть получена из следующих выражений:

$$\begin{cases} V = V_R + \omega \times r_{OR} \\ V = V_L + \omega \times r_{OL} \end{cases}, \quad (3)$$

Раскрывая векторное произведение в выражениях (3), при условии  $r_{OR} = r_{OL}$  получим следующую систему уравнений

$$\begin{cases} \omega = \frac{1}{l} (V_R - V_L) \\ V = \frac{1}{2} (V_R + V_L) \end{cases}, \quad (4)$$

где  $l$  – длина оси между колесами.

Введем в рассмотрение декартову прямоугольную систему координат  $x, y, \varphi$ . Тогда

$$\begin{cases} \dot{x} = V * \cos\varphi, \\ \dot{y} = V * \sin\varphi, \\ \dot{\varphi} = \omega. \end{cases} \quad (5)$$

Подставляя уравнения (4) в выражения (5), окончательно получим

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{1}{2} (V_R + V_L) \cos\varphi, \\ \dot{y} = \frac{1}{2} (V_R + V_L) \sin\varphi, \\ \dot{\varphi} = \frac{1}{l} (V_R - V_L). \end{cases} \quad (6)$$

Здесь  $x, y$  – координаты платформы робота на плоскости,  $\varphi$  – угол поворота платформы.

Соотношения (6) представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений третьего порядка относительно фазового вектора с компонентами  $(x, y, \varphi)$ . Скаляры  $V_R$  и  $V_L$ , заданные тем или иным образом (как функции времени или фазовых координат), определяют движение платформы. Таким образом, соотношения (6) можно рассматривать как кинематическую модель мобильного трехколесного робота. Линейная и угловая скорости робота определяются из выражения (4).

## 2. Динамическая модель мобильного робота

Прежде чем перейти к выводу уравнений движения, рассмотрим более детально связи, наложенные на перемещение робота.

Мобильный робот осуществляет движение по плоскому рельефу, имея два ведущих колеса радиуса  $\rho$ . Колеса вращаются без проскальзывания, и оси их вращения совпадают с линией  $LR$  (рис. 2). Это условие устанавливает ограничения на координаты и скорости, и представляет собой одно из уравнений связи, геометрическая интерпретация которого состоит в том, что вектор скорости  $V=(x',y')^T$  перпендикулярен орту  $y_0$ . Таким образом, налагаемая связь является неголономной.

Рассмотрим теперь условия непроскальзывания. Мы рассматриваем робот как систему трех твердых тел, включающую платформу и два ведущих колеса. Положение этой системы задается следующим набором параметров:  $x, y, \varphi$  – координаты положения платформы;  $q_L, q_R$  – углы поворота правого и левого колеса соответственно.

Условия непроскальзывания получим, воспользовавшись соотношениями (6), а также тем обстоятельством, что

$$\begin{aligned} V_R &= \rho \dot{q}_R, \\ V_L &= \rho \dot{q}_L. \end{aligned} \quad (7)$$

Последнее уравнение в соотношениях (6) интегрируется

$$\varphi = \frac{\rho}{l} (\dot{q}_R - \dot{q}_L) + C, \quad (8)$$

где  $C$  – некоторая постоянная.

Таким образом, окончательно уравнения связи (6) принимают вид

$$\begin{cases} \dot{x} = \frac{\rho}{2} (\dot{q}_R + \dot{q}_L) \cos \varphi, \\ \dot{y} = \frac{\rho}{2} (\dot{q}_R + \dot{q}_L) \sin \varphi, \\ \varphi = \frac{\rho}{l} (q_R - q_L) + C. \end{cases} \quad (9)$$

Таким образом, рассматриваемая система имеет три обобщенные координаты  $(x, y, \varphi)$  и две степени свободы.

При составлении динамической модели будем пренебрегать моментами инерции колёс и других вращающихся частей привода, так как они значительно меньше соответствующих моментов платформы, приведённых к валу электрического двигателя.

Теперь перейдём к выводу уравнения движения.

Для вывода уравнений движения, воспользуемся уравнением Лагранжа II рода:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial E_k}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial E_k}{\partial q_i} = Q_i, \quad i=1,2,\dots,n, \quad (10)$$

где  $n$  – число обобщенных координат;  $E_k$  – кинетическая энергия;  $q_i$  – обобщенные координаты;  $Q_i$  – обобщенные силы.

Рассматриваемый мобильный робот имеет два независимых ведущих колеса. Поскольку колёса находятся в точечном контакте и осуществляют движение без проскальзывания, то вращающий момент  $\tau_i$

может быть представлен в виде силы  $F_i = \tau_i / \rho$ , приложенной к оси этого ведущего колеса.

Таким образом, наша система может быть представлена в виде твёрдого тела, осуществляющего плоскопараллельное движение под воздействием системы сил (рис. 2).

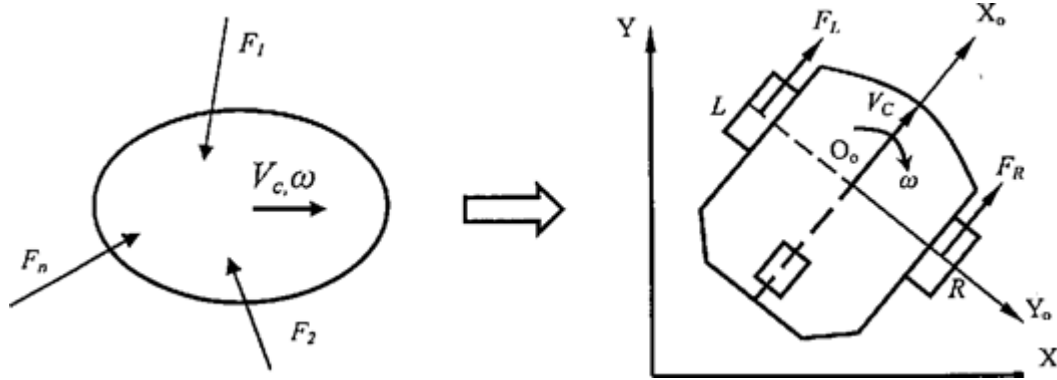


Рис. 2. Движение мобильного робота под воздействием системы сил

Уравнение кинетической энергии платформы как твёрдого тела имеет вид

$$E_k = \frac{mV_c^2}{2} + \frac{J_c\omega^2}{2}, \quad (11)$$

где  $m$  – масса платформы;  $V_c$  – скорость центра масс платформы;  $J_c$  – момент инерции платформы относительно центра масс;  $\omega$  – угловая скорость платформы.

Запишем уравнение кинетической энергии платформы с учётом обобщённых координат  $(x, y, \varphi)$

$$E_k = \frac{m}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + \frac{J_c}{2}\dot{\varphi}^2. \quad (12)$$

В соответствии с уравнением Лагранжа II рода, выполнив ряд преобразований, получим систему уравнений вида

$$\begin{cases} m\dot{x} = (F_R + F_L)\cos\varphi, \\ m\dot{y} = (F_R + F_L)\sin\varphi, \\ J\ddot{\varphi} = \frac{l}{2}(F_R - F_L). \end{cases} \quad (13)$$

Система дифференциальных уравнений (13), описывающая движение платформы в абсолютной системе координат  $XOY$  под воздействием сил  $F_R$  и  $F_L$ , соответствует уравнениям плоскопараллельного движения, описывающим перемещение центра масс твёрдого тела под воздействием системы внешних сил.

Возводя в квадрат и складывая правые и левые части первых двух уравнений системы (13) с учетом выражений для управляющих моментов правого и левого колес робота ( $\tau_R = F_R\rho$ ,  $\tau_L = F_L\rho$ ,  $V = \sqrt{\dot{x}^2 + \dot{y}^2}$ ,  $\omega = \dot{\varphi}$ ), окончательно получим

$$\begin{cases} \dot{V} = \frac{1}{\rho m} (\tau_R + \tau_L), \\ \dot{\omega} = \frac{l}{2\rho J_c} (\tau_R - \tau_L). \end{cases} \quad (14)$$

Соотношения (14) представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений относительно фазового вектора с компонентами  $(V, \omega)^T$ , а  $\tau_R, \tau_L$  - компоненты вектора управления, порождающие движение системы.

Таким образом, нелинейная математическая модель автономного мобильного робота может быть описана системой дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos \varphi, \\ \dot{y} = V \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} = \omega, \\ \dot{V} = \frac{1}{\rho m} (\tau_R + \tau_L), \\ \dot{\omega} = \frac{l}{2\rho J_c} (\tau_R - \tau_L). \end{cases} \quad (15)$$

Далее рассмотрим уравнения движения мобильного робота с учетом динамики следящих приводов.

Рассмотрим случай, когда колёса платформы через редукторы управляются непосредственно двигателями постоянного тока с независимым возбуждением (рис.3).

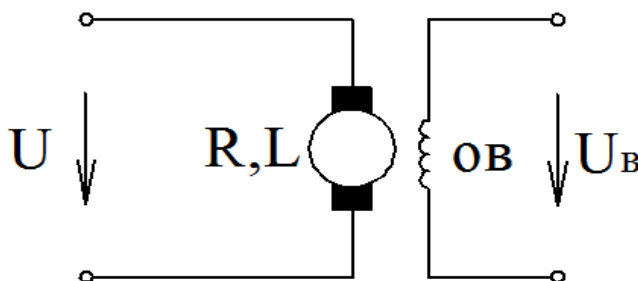


Рис. 3. Схема замещения электродвигателя

Покажем, что учёт наличия следящих приводов не влечёт принципиальных сложностей.

Известно, что составленное по II закону Кирхгофа уравнение баланса напряжений одного электродвигателя (ЭД) постоянного тока имеет вид

$$L\dot{I} + RI + K_w \omega_w = U, \quad (16)$$

где  $L$  - индуктивность цепи якоря;  $I$  - ток, протекающий в обмотке якоря;

$R$  - активное сопротивление обмотки якоря;  $\omega_w$  - угловая скорость вращения вала ЭД;  $U$  - напряжение питания обмотки якоря.

Угловые скорости вращения вала ЭД  $\omega_m$  и колес связаны соотношением

$$\omega_m = \omega_w i_p, \quad (17)$$

где  $i_p$  – передаточные отношения редукторов.

Выражение для момента  $\tau$ , развиваемого ЭД, имеет вид

$$\tau = K_M I. \quad (18)$$

Здесь  $K_M$ ,  $K_w$  – приведенные конструктивные постоянные ЭД по электромагнитному моменту и угловой скорости его вращения.

Тогда, учитывая соотношения (17)-(18), представим уравнение (16) в виде

$$\tau = -\frac{R}{L}\tau - \frac{K_M K_W i}{L}\omega_w + \frac{K_M}{L}U. \quad (19)$$

Так как для правого и левого колес отдельно используются два ЭД постоянного тока, то имеем

$$\begin{cases} \dot{\tau}_L = -\frac{R}{L}\tau_L - \frac{K_M K_W i}{L}\omega_L + \frac{K_M}{L}U_L, \\ \dot{\tau}_R = -\frac{R}{L}\tau_R - \frac{K_M K_W i}{L}\omega_R + \frac{K_M}{L}U_R. \end{cases} \quad (20)$$

Формулы (20) записаны в предположении, что характеристики правого и левого ЭД одинаковы, что на практике совсем не обязательно.

Выразим теперь угловые скорости вращения колес  $\omega_L$  и  $\omega_R$  через фазовые координаты. Для этого воспользуемся соотношениями (4) с учетом того, что  $V_L = \omega_L \rho$  и  $V_R = \omega_R \rho$ :

$$\begin{aligned} \omega_R &= \frac{1}{\rho} \left( V + \frac{\omega l}{2} \right), \\ \omega_L &= \frac{1}{\rho} \left( V - \frac{\omega l}{2} \right). \end{aligned} \quad (21)$$

Подставим уравнения (21) в соотношения (20) и дополним систему уравнений (15). В результате получим полную математическую модель динамики мобильного робота с учетом следящих приводов

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos \varphi, \\ \dot{y} = V \sin \varphi, \\ \dot{\varphi} = \omega, \\ \dot{V} = \frac{1}{\rho m} (\tau_R + \tau_L), \\ \dot{\omega} = \frac{l}{2\rho J_c} (\tau_R - \tau_L), \\ \dot{\tau}_L = -\frac{R}{L}\tau_L - \frac{K_M K_W i}{\rho L} \left( V - \frac{\omega l}{2} \right) + \frac{K_M}{L}U_L, \\ \dot{\tau}_R = -\frac{R}{L}\tau_R - \frac{K_M K_W i}{\rho L} \left( V + \frac{\omega l}{2} \right) + \frac{K_M}{L}U_R. \end{cases} \quad (22)$$

Модель динамики (22) представляет собой систему нелинейных дифференциальных уравнений седьмого порядка с фазовым вектором  $(x, y, V, \varphi, \omega, \tau_L, \tau_R)^T$  и вектором управления  $(U_L, U_R)^T$  и может быть непосредственно использована при моделировании на любом алгоритмическом языке программирования. Однако для синтеза законов управления роботом необходимы другие формы представления его математической модели.

### 3. Синтез алгоритмов управления движением мобильного робота по методу обратных задач динамики

Заметим, что в системе уравнений (22) только четыре последние уравнения являются зависимыми между собой, а три первые уравнения представляют собой уравнения связи.

Продифференцируем шестое и седьмое уравнения в системе (22) и с учетом подстановки в них четвертого и пятого уравнений получим

$$\begin{cases} \ddot{\tau}_L + a_{11}\dot{\tau}_L + \left(a_{12}\frac{1}{\rho m} - \frac{l^2}{4\rho J_c}\right)\tau_R + \left(a_{12}\frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c}\right)\tau_L = b_{11}\dot{U}_L, \\ \ddot{\tau}_R + a_{11}\dot{\tau}_R + \left(a_{12}\frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c}\right)\tau_R + \left(a_{12}\frac{1}{\rho m} - \frac{l^2}{4\rho J_c}\right)\tau_L = b_{11}\dot{U}_R, \end{cases} \quad (23)$$

где обозначено:  $a_{11} = \frac{R}{L}$ ,  $a_{12} = \frac{K_M \cdot K_W \cdot i_p}{\rho L}$ ,  $b_{11} = \frac{K_M}{L}$ ,

$\tau_L, \tau_R$  – моменты, развиваемые соответственно левым и правым колесом робота (переменные состояния);  $\dot{U}_L, \dot{U}_R$  – скорости изменения напряжения питания (управляющий параметр).

Конструктивные параметры трехколесного автономного мобильного робота (рис. 4) представлены в табл. 1.

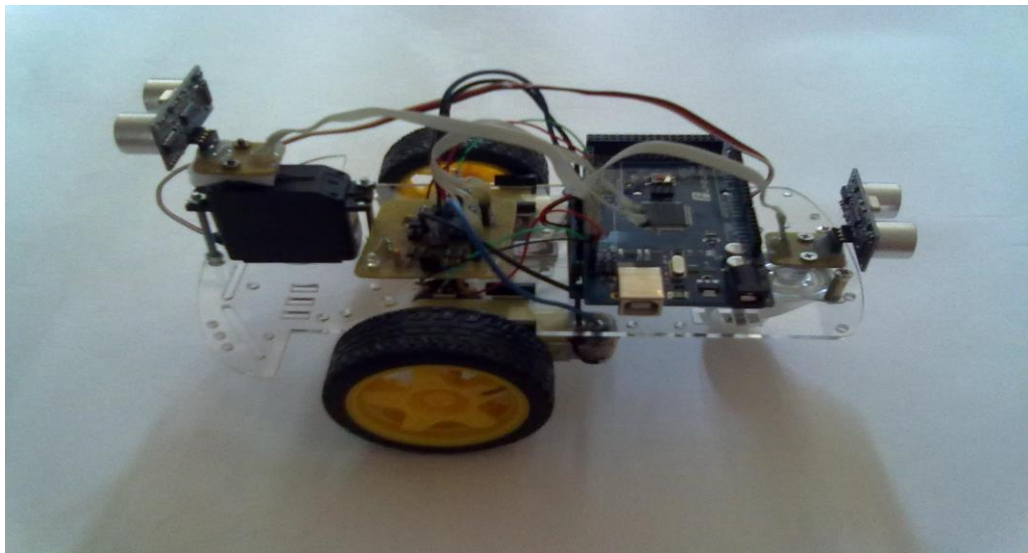


Рис.4. Внешний вид робота

Таблица 1.

Конструктивные параметры мобильного робота

| Параметры         | $m$ ,<br>кг | $J_c$ ,<br>кг·см <sup>2</sup> | $\rho$ ,<br>м | $l$ ,<br>м | $K_W$ , | $R$ ,<br>Ом | $L$ ,<br>Гн           | $i_p$ |
|-------------------|-------------|-------------------------------|---------------|------------|---------|-------------|-----------------------|-------|
| Числовые значения | 1           | $2,25 \times 10^{-4}$         | 0,0325        | 0,135      | 0,0209  | 0,36        | $1,23 \times 10^{-3}$ | 55,74 |

В табл. 4 обозначены:  $R, L$  – активное сопротивление и индуктивность обмотки якоря ЭД постоянного тока;  $l$  – длина оси;  $\rho$  – радиус колес;  $m$  – масса платформы;  $i_p$  – передаточное число редуктора;

$J_c$  – момент инерции платформы относительно центра масс.

При синтезе законов управления по методу обратных задач динамики [2] математическая модель робота (23) принимается за объект управления.

В матричном виде система уравнений (23) имеет вид

$$\ddot{X} + C\dot{X} + DX = Bu, \quad (24)$$

где  $X = (\tau_L, \tau_R)$  – вектор состояния системы;

$u = (\dot{U}_L, \dot{U}_R)$  – вектор управления;

$C = \begin{bmatrix} a_{11} & 0 \\ 0 & a_{11} \end{bmatrix} = \text{diag}\{a_{11}, a_{11}\}$  – диагональная матрица;

$D = \begin{bmatrix} a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_C} & a_{12} \frac{1}{\rho m} - \frac{l^2}{4\rho J_C} \\ a_{12} \frac{1}{\rho m} - \frac{l^2}{4\rho J_C} & a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_C} \end{bmatrix}$  – симметричная матрица ( $D^{-1} = D^T$ );

$B = \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & b_{11} \end{bmatrix} = \text{diag}\{b_{11}, b_{11}\}$  – диагональная матрица эффективности управления.

Таким образом, в этом случае мобильный робот как объект управления является многосвязной (число входов  $m=2$ ), многомерной ( $n=2$ ) системой.

Сформулируем теперь задачу синтеза управлений стабилизации (гашения) угловых скоростей мобильного робота на интервале времени  $[t_0, t_k]$ , полагая  $t_0 = 0$ , а момент  $t_k$  нефиксированной величиной.

Пусть в текущий момент времени  $t = t_0 = 0$  состояние управляемой по моментам  $\tau_1 = \tau_L, \tau_2 = \tau_R$  системы (22) или (23) характеризуется значениями  $\tau_i(0) = \tau_{i0}$  ( $i = 1, 2$ ).

Требуется найти такие управляющие воздействия  $\dot{U}_i$  ( $\dot{U}_1 = \dot{U}_L, \dot{U}_2 = \dot{U}_R$ ), при которых система (24) переходит из исходного состояния  $\tau_{i0}$  в новое состояние  $\tau_{i\text{зад}}$  (в общем случае  $\tau_{i\text{зад}} = \tau_{i\text{зад}}(t)$  определяет задаваемые моменты вращения колёс мобильного робота во времени) и находится в этом состоянии бесконечно долго. При этом необходимо, чтобы моменты вращения управляемого движения по каждой степени свободы с требуемой точностью следовали за моментами, определяемыми эталонной моделью

$$\ddot{X}_{\text{ЭТ}i} + C_i \dot{X}_{\text{ЭТ}i} + D_i X_{\text{ЭТ}i} = D_i \tau_{i\text{зад}}, \quad (25)$$

где коэффициенты  $C_i, D_i$  определялись ранее.

Заданное эталонное движение определяется из условия заданного изменения напряжения питания на зажимах обмотки якоря правого и левого ЭД

$$B_i \dot{U}_{i\text{зад}} = D_i \tau_{i\text{зад}}, \quad i = 1, 2 \quad (26)$$

Изменение напряжения питания осуществляется с помощью ШИМ путем изменения скважности импульсов.

Считается, что эталонное движение устойчиво  $X_{\text{ЭТ}i} \rightarrow \tau_{i\text{зад}}$  при  $t \rightarrow \infty$ .

Степень приближения управляемого процесса к эталонной модели  $X_{ЭТi}(t) \rightarrow \tau_{изад}$  оценивается функционалом

$$G(\dot{U}) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^2 [\ddot{X}_{ЭТi} - \dot{X}_i(t, \dot{U}_i)]^2, \quad (27)$$

который характеризует изменение момента вращения колёс мобильного робота в окрестности изменения эталонного момента вращения.

Законы управления  $\dot{U}_i(X)$  по каждой степени свободы вращения колёс определяем по схеме простого градиента

$$\frac{\partial \dot{U}_i(X)}{\partial t} = - \sum_{j=1}^2 r_{ij} \frac{\partial G(\dot{U})}{\partial \dot{U}_j}, \quad r_{ij} = const \quad (28)$$

Согласно формул (24), (27) компоненты градиента в (28) равны

$$\frac{\partial G(\dot{U})}{\partial \dot{U}_j} = -b_{11} (\ddot{X}_{ЭТj} - \ddot{X}_j), \quad j = 1, 2; \quad (29)$$

Отсюда следует, что

$$\ddot{U}_i(X) = \sum_{j=1}^2 r_{ij} b_{11} (\ddot{X}_{ЭТj} - \ddot{X}_j). \quad (30)$$

Интегрируя по времени обе части последнего выражения, окончательно получим требуемый закон управления (регулирования), питающего цепь якоря электродвигателей, напряжения

$$U_i = \sum_{j=1}^2 r_{ij} b_{11} (X_{ЭТj} - X_j), \quad i = 1, 2; \quad (31)$$

где требуемые значения моментов  $X_{ЭТj}$  вычисляются по формуле (25).

Структура матрицы  $R = \|r_{ij}\|$  определяется характером перекрёстных связей по переменной  $X_j$  в формуле (22) или (23)

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{bmatrix}, \quad \text{причём} \quad r_{12} = r_{21}.$$

Принимается  $R = R^T > 0$ . Тогда  $G(\dot{U}) < 0$  и замкнутая регулятором (31) система (22) асимптотически устойчива по Ляпунову:  $\ddot{X}_{ЭТj} \rightarrow \ddot{X}_j$  при  $t \rightarrow \infty$ .

### 3. Управление движением мобильного робота по методике модального ПИД-регулирования

Для применения методики синтеза модального ПИД-регулятора и построения Simulink-моделей в среде программирования Matlab необходимо привести математическую модель робота (23) к операторному виду.

а) Частный случай операторной модели робота

Пусть в исходной модели (23) выполняется условие синхронизации движения колёс:  $\tau_R = \tau_L$ . Тогда задается угловая скорость  $\omega = \omega_{Зад} = const$ , а угол поворота колёс равен  $\varphi = \omega t$ . Это условие выполняется, если в уравнениях (23) модели робота положить

$$d_{12} = a_{12} \frac{1}{\rho t} - \frac{l^2}{4\rho J_c} = 0.$$

При конструировании робота здесь возможны два подхода:



- 1) Используются стандартные ЭД постоянного тока. Тогда из условия синхронизации целесообразно выбрать длину оси передних ведущих колес робота

$$l = \sqrt{\frac{4K_M^2 i_p J_c}{\rho L m}}.$$

- 2) Длина оси передних ведущих колес  $l$  жестко задана и требуется выбрать характеристики ЭД постоянного тока. Тогда из условия синхронизации выбираются обмоточный коэффициент и конструктивные параметры ЭД

$$K_M = K_W = \frac{l^2}{4i_p J_c}.$$

В обоих случаях уравнения в модели (23) могут быть рассмотрены независимо ( $\tau = \tau_R = \tau_L$ )

$$\ddot{\tau} + a_{11}\dot{\tau} + \left( a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c} \right) \tau = b_{11} \dot{U}.$$

где  $\dot{U}_R = \dot{U}_L = \dot{U}$ .

Далее последнее уравнение через замену переменных приводится к нормальной форме Коши ( $\tau = x_1, \dot{\tau} = x_2$ )

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = - \left( a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c} \right) x_1 - a_{11} x_2 + b_{11} \dot{U} \end{cases} \quad (32)$$

или в матричном виде

$$\dot{x} = Ax + Bu,$$

где  $x = (x_1, x_2)^T$ ,  $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\left( a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c} \right) & -a_{11} \end{bmatrix}$ ,  
 $B = (0, b_{11})^T$ ,  $u = \dot{U}$ .

Применим к уравнениям (32) непрерывное преобразование Лапласа:

$$A^*(p)x(p) = Bu(p),$$

где  $A^*(p) = (Ip - A) = \begin{bmatrix} p & -1 \\ a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c} & p + a_{11} \end{bmatrix}$  (33)

Решение системы алгебраических операторных уравнений определяем по формулам Крамера

$$x_{ij}(p) = \frac{\Delta_{ij}}{\Delta(p)} u_j(p), \quad i = 1, n; j = 1, m.$$

В нашем случае  $n = 2, m = 1$ . Поэтому система является многомерной ( $n = 2$ ), но односвязной ( $m = 1$ ). Её детерминант не равен нулю

$$\Delta(p) = \begin{vmatrix} p & -1 \\ a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c} & p + a_{11} \end{vmatrix} = p^2 + a_{11}p + a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c} \neq 0$$

и поэтому система имеет единственное решение (матрица  $A^*(p)$  невырожденная).

В нашем случае частные определители и передаточные функции равны:

$$\Delta_{11}(p) = \begin{vmatrix} 0 & -1 \\ b_{11} & p + a_{11} \end{vmatrix} = b_{11}, \quad \Delta_{21}(p) = \begin{vmatrix} p & 0 \\ a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c} & b_{11} \end{vmatrix} = pb_{11},$$

$$W_{11}(p) = W_{\frac{\tau}{\bar{U}}}(p) = \frac{b_{11}}{p^2 + a_{11}p + a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c}},$$

$$W_{21}(p) = W_{\frac{\tau}{\bar{U}}}(p) = pW_{11}(p) = pW_{\frac{\tau}{\bar{U}}}(p),$$

$$\dot{U} = \frac{2}{\rho m} \tau, \quad W_{\frac{\tau}{\bar{U}}}(p) = \frac{\frac{2}{\rho m} b_{11}}{p^2 + a_{11}p + a_{12} \frac{1}{\rho m} + \frac{l^2}{4\rho J_c}}.$$

б). Общий случай операторной модели робота

Аналогично частному случаю приведем матричные уравнения (24) к нормальной форме Коши через замену переменных ( $x = x_1, \dot{x} = x_2$ )

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = -Dx_1 - Cx_2 + bu. \end{cases}$$

В блочной форме последние формулы принимают вид

$$\dot{Y} = AY + Bu,$$

где  $Y = (x_1, x_2)^T$  – обобщенный вектор состояния размера (4x1);

$u = (\dot{U}_L \ \dot{U}_R)$  – вектор управления размерности 2x1;

$A = \begin{bmatrix} O_{(2 \times 2)} & I_{(2 \times 2)} \\ -D_{(2 \times 2)} & -C_{(2 \times 2)} \end{bmatrix}$  – блочная матрица при векторе состояния размера 4x4;

$B = \begin{bmatrix} O_{(2 \times 2)} \\ b_{(2 \times 2)} \end{bmatrix}$  – блочная матрица при векторе управления размера 4x2.

Преобразуем систему дифференциальных уравнений в алгебраические уравнения, используя преобразование Лапласа

$$A^{**}(p)Y(p) = Bu(p),$$

где  $A^{**}(p) = (Ip - A) = \begin{bmatrix} I_{(2 \times 2)}p & -I_{(2 \times 2)} \\ D & I_{(2 \times 2)}p + C \end{bmatrix}$ ,  $I_{(2 \times 2)}$  – единичная матрица размера 4x4.

Так как  $\Delta(p) = \det A^{**}(p) \neq 0$ , то система является невырожденной и имеет единственное решение, определяемое через наибольший общий делитель нуля [3]

$$Y_{ij}(p) = \frac{\Delta_{ij}(p) \text{НОД}_j(p)}{\Delta(p)} u_j(p), \quad i = 1, n; j = 1, m,$$

В нашем случае  $n = 4, m = 2$ . Поэтому робот как объект управления является многомерным и многосвязным (многоконтурным).

Здесь частный определитель равен  $\Delta_{ij}(p) = \det A_{ij}^*(p)$ , а матрица  $A_{ij}^*(p)$  определяется через замену в матрице  $A^{**}(p)$   $i$ -го столбца на  $j$ -ый столбец свободных членов. Общее решение при  $m$  управляющих воздействиях получается как суперпозиция частных решений

$$x_i(p) = \sum_{j=1}^m x_{ij}(p) = \sum_{j=1}^m \frac{\Delta_{ij}(p) \text{НОД}_j(p)}{\Delta(p)} u_j = \sum_{j=1}^m W_{ij}(p) u_j,$$

где  $\text{НОД}_j(p)$  наибольший общий делитель по  $j$ -ому входу управления.

Таким образом, здесь нужно говорить об обобщенном управлении  $u$  и матричных передаточных функциях числителя и знаменателя.

Передаточные функции от управляющих воздействий к моментам правого и левого колеса определяются по формулам:

$$W_{\frac{\tau_R}{\bar{u}_R}}(p) = \frac{\Delta_{11}\text{НОД}_1(p)}{\Delta(p)},$$

где  $\Delta_{11} = b_{11}$ ,

$$\text{НОД}_1(p) = \text{НОД}_L(p) = p^2 + a_{11}p + d_{11} - d_{12} = p^2 + a_{11}p + \frac{l^2}{2\rho J_C};$$

$$W_{\frac{\tau_L}{\bar{u}_L}}(p) = \frac{\Delta_{12}\text{НОД}_2(p)}{\Delta(p)},$$

где  $\Delta_{12} = b_{11}$ ,

$$\text{НОД}_2(p) = \text{НОД}_R(p) = p^2 + a_{11}p + d_{11} + d_{12} = p^2 + a_{11}p + \frac{2a_{12}}{2\rho m};$$

$$\Delta(p) = \text{НОД}_1(p) \text{НОД}_2(p) = (p^2 + a_{11}p + d_{11} + d_{12}) \times \\ \times (p^2 + a_{11}p + d_{11} - d_{12}) = \left(p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{2K_W^2 i_p}{\rho^2 L m}\right) \left(p^2 + \frac{R}{L}p + \frac{l^2}{2\rho J_C}\right).$$

$$W_{\frac{\tau_L}{\bar{u}_L}}(p) = \frac{b_{11}}{p^2 + a_{11}p + d_{11} - d_{12}} = \frac{b_{11}}{p^2 + a_{11}p + \frac{l^2}{2\rho J_C}};$$

$$W_{\frac{\tau_R}{\bar{u}_R}}(p) = \frac{b_{11}}{p^2 + a_{11}p + d_{11} + d_{12}} = \frac{b_{11}}{p^2 + a_{11}p + \frac{2K_W^2 i_p}{L\rho^2 m}}.$$

На основе математической модели (23) и полученных передаточных функций была разработана Simulink-модель управляемого мобильного робота (рис. 5) с параметрами, выбранными из табл. 1.

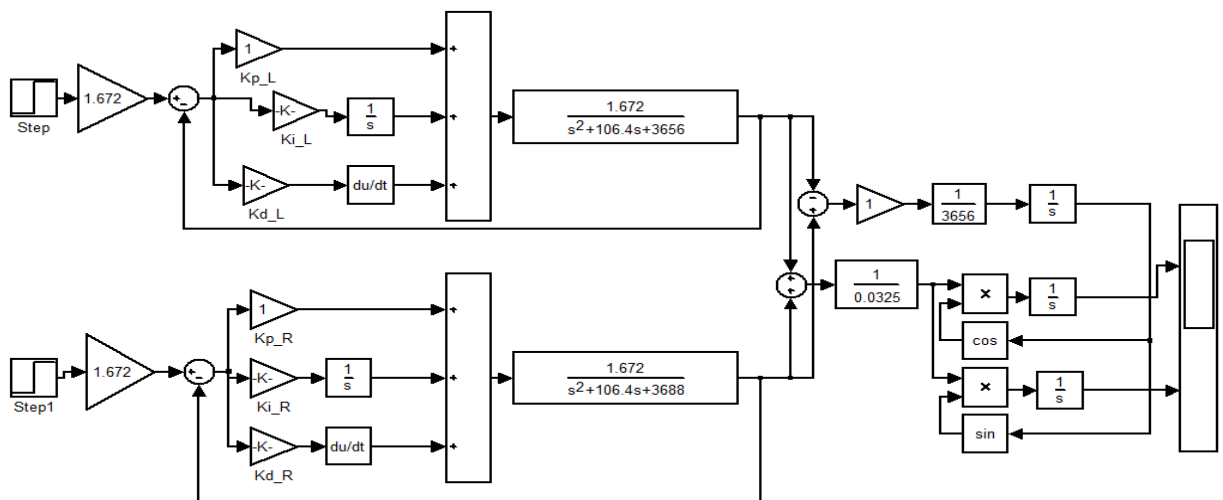


Рис. 5. Simulink-модель автономного мобильного робота

Коэффициенты модального ПИД-регулятора выбирались по методике, изложенной в работе [4]:  $K_p=1$ ,  $K_i=55.24$ ,  $K_d=0.008$  – для управления левым колесом;  $K_p=1$ ,  $K_i=39.28$ ,  $K_d=0.006$  – для управления правым колесом робота.

Графики переходных процессов управляющих моментов  $\tau_L, \tau_R$  от времени  $t$  представлены на рис. 6.

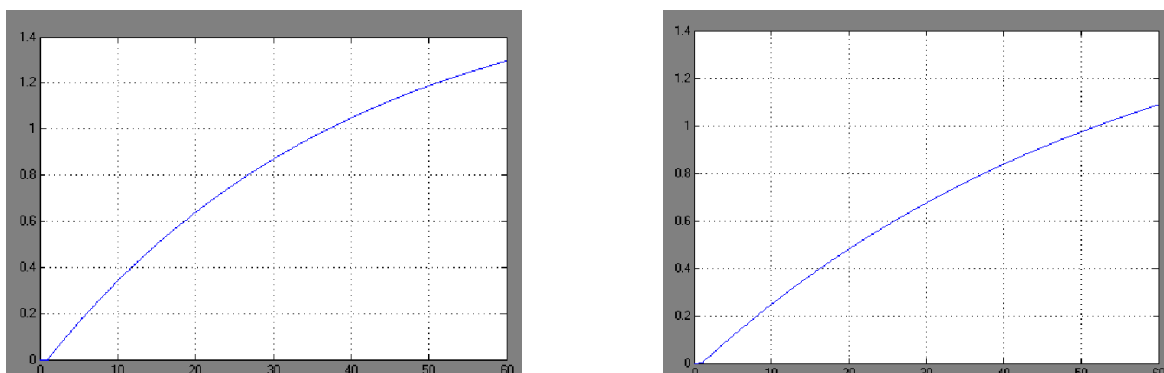


Рис. 6. Управляющие моменты колесной парой мобильного робота

**Закключение.** Таким образом, в работе получены следующие основные результаты:

1. Разработаны математические модели мобильного робота в пространстве состояний и в операторной форме.
2. Синтезирован алгоритм управления движением робота на основе метода обратных задач динамики.
3. Разработана Simulink-модель управляемого мобильного робота на основе методики модального ПИД- регулирования.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Букреев В.Г. Математическое обеспечение адаптивных систем управления электромеханическими объектами. – Томск: Изд-во ТПУ, 2002. – 132 с.
2. Крутько П.Д. Обратные задачи динамики в теории автоматического управления. – М.: Машиностроение, 2004. – 576 с.
3. Буков В.Н. Вложение систем. Аналитический подход к анализу и синтезу матричных систем. – Калуга: Изд-во научной литературы Н.Ф. Бочкаревой, 2006. – 720 с.
4. Сизых В.Н., Лайков М.И., Палатов Д.А. Модальный способ определения параметров ПИД-регулятора редуцированной модели линейного объекта// В сб. «Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте». Иркутск: Изд-во ИрГУПС, 2015. Вып. 26. –С. 5-18.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМОВ ЧЕТЫРЕХФАЗНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

*Применение четырехфазных линий электропередачи (ЧЛЭП) дает возможность увеличения пропускной способности линий электропередачи, повышения их экономической эффективности, электромагнитной безопасности и надежности.*

*На основе методов моделирования мультифазных электроэнергетических систем выполнено моделирование неполнофазных режимов ЧЛЭП напряжением 220 кВ. Показано, что при передаче одинаковой мощности потери электроэнергии в ЧЛЭП существенно меньше потерь в трехфазной системе. В неполнофазных режимах уровни несимметрии в ЧЛЭП значительно ниже аналогичных показателей для трехфазной системы.*

Ключевые слова: *четырефазные линии электропередачи, моделирование, фазные координаты.*

**Введение.** Увеличение пропускной способности линий электропередачи (ЛЭП), повышение их экономической эффективности, электромагнитной безопасности и надежности может быть достигнуто, в частности, применением четырехфазных линий электропередачи [1...4], в основе которых лежит симметричная система напряжений с фазовым сдвигом  $90^\circ$ . Преобразование трехфазной системы в четырехфазную и обратно может быть выполнено на основе схемы Скотта [3]. Для практической реализации четырехфазных ЛЭП (ЧЛЭП) необходима разработка методов моделирования режимов сложных электроэнергетических систем (ЭЭС), включающих в свой состав такие линии [5...7].

**Методика моделирования.** Разработанный на основе методов моделирования электрических систем переменного тока в фазных координатах [5] программный комплекс Fazopord позволяет проводить расчеты режимов трехфазно-четырефазных ЭЭС [5...8]. В комплексе реализованы оригинальные идеи моделирования многопроводных элементов со взаимоиндуктивными и емкостными связями с помощью решетчатых схем замещения. Применение таких методик позволяет моделировать практически любые типы многопроводных линий с большим количеством проводов и произвольным их соединением и любые типы однофазных, трехфазных трехстержневых и пятистержневых трансформаторов с различными схемами соединений обмоток. Кроме того, одновременно с расчетом режима ЭЭС могут быть определены соответствующие режиму напряженности электромагнитного поля (ЭМП) многопроводных линий электропередачи [9, 10].

Результаты исследования режимов ЧЛЭП, представленные в работах [5...7], касались только нормальных режимов работы. Однако при эксплуатации ЭЭС иногда используется длительная работа в неполнофазных режимах [11, 12], например, с отключенным проводом одной из фаз. Анализ статистических данных по повреждениям на линиях электропередачи показывает, что более 60 % устойчивых аварийных отключений приходится на однофазные замыкания. На линиях с односторонним питанием эти аварии сопровождаются значительным недоотпуском электроэнергии. Поэтому переход на работу ЛЭП в

неполнофазном режиме позволяет сократить длительность перерыва энерго-снабжения и уменьшить недоотпуск электроэнергии потребителям.

Результаты анализа неполнофазных режимов работы ЧЛЭП, полученные при развитии исследований, описанных в [5...7], представлены в настоящей статье.

**Результаты моделирования.** Для исследования неполнофазных режимов была использована схема трехфазно-четырефазной ЭЭС, показанная на рис. 1. Схема содержит трехфазный источник электроэнергии, две группы трансформаторов Скотта для преобразования трехфазной системы в четырехфазную и обратно, а также четырехфазную ЛЭП.

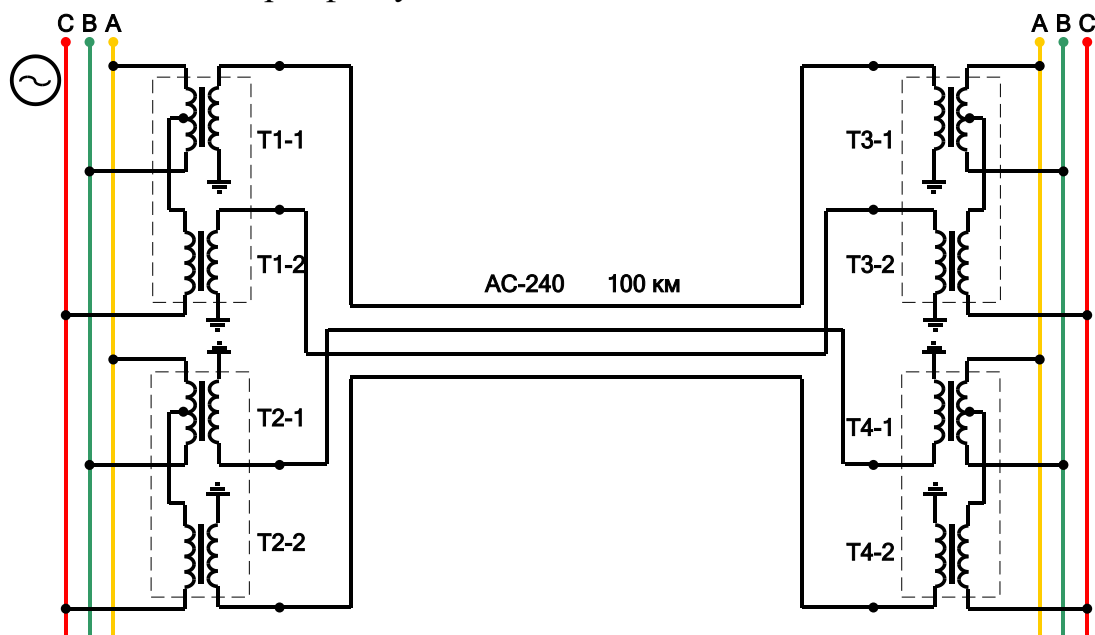


Рис. 1. Схема четырехфазной ЭЭС

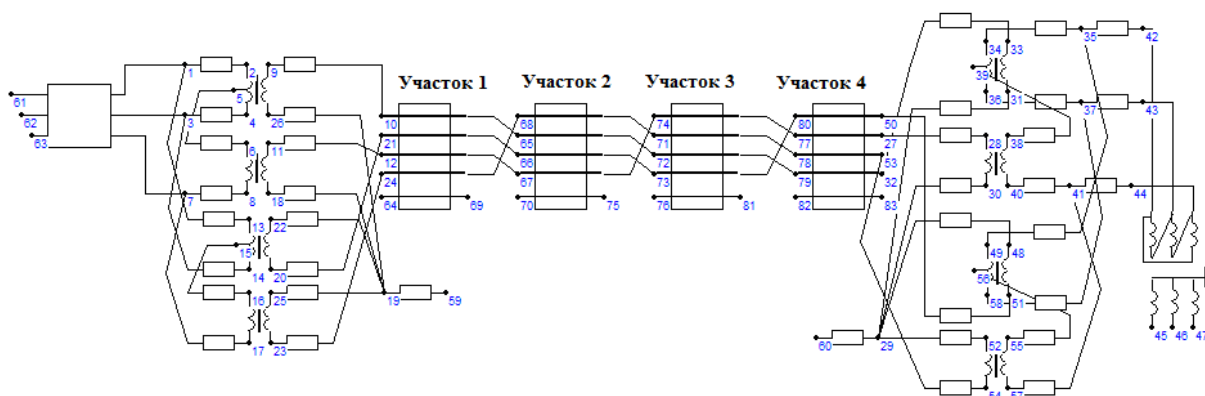


Рис. 2. Схема модели четырехфазной ЛЭП

Для сопоставления рассмотрена традиционная трехфазная ЭЭС, включающая 3-х фазную ЛЭП 220 кВ. Схемы расчетных моделей представлены на рис. 2, 3. Результаты моделирования режимов при обрыве провода в узле 50 четырехфазной системы и в узле 99 в трехфазной представлены в табл. 1 и на рис. 4...6. На рис. 4 представлены зависимости потерь в ЛЭП от величины передаваемой мощности  $P$ , а на рис. 5 – зависимости коэффициента несимметрии по обратной последовательности  $k_{2U}$  от  $P$ . На рис. 6 показаны векторные диаграммы напряжений на шинах 10 кВ приемной подстанции.

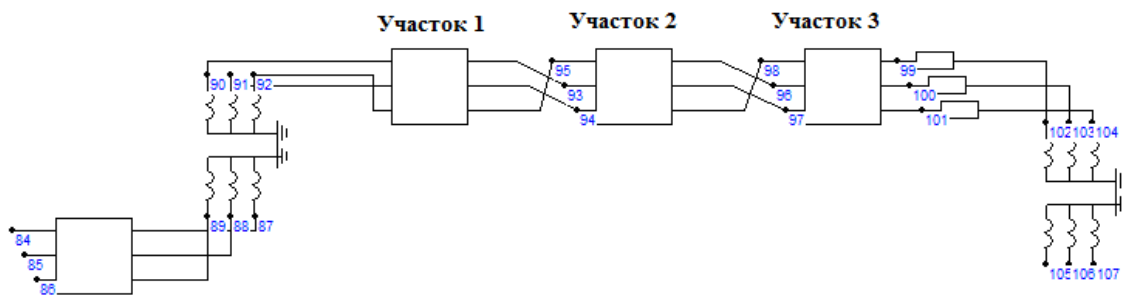


Рис. 3. Схема модели трехфазной ЛЭП

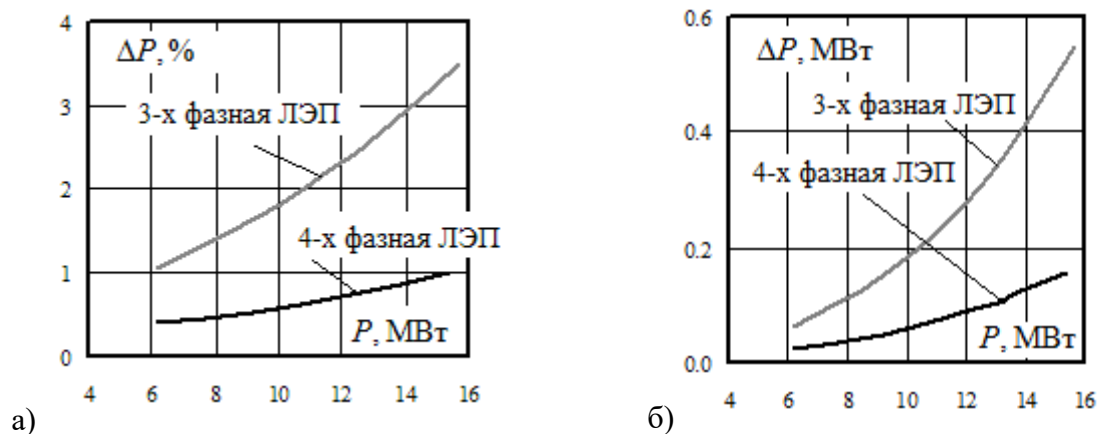


Рис. 4. Зависимости потерь от передаваемой мощности:  
а – в процентах от передаваемой мощности; б – в мегаваттах

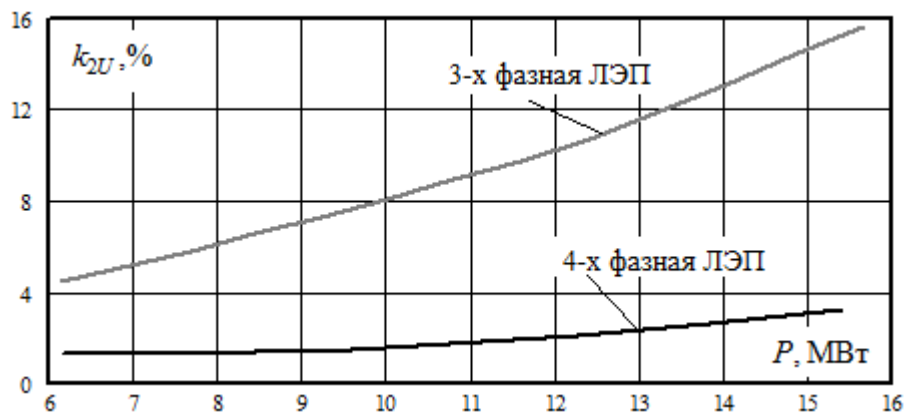
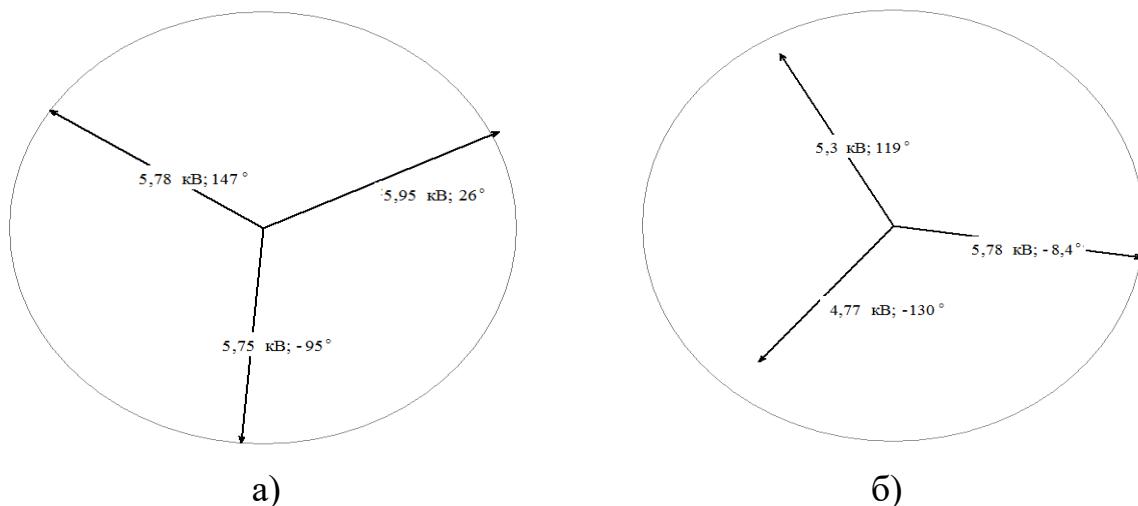


Рис. 5. Зависимость коэффициента несимметрии  $k_{2U}$  на шинах низкого напряжения подстанции потребителя от передаваемой мощности

Таблица 1

Потери в линиях и коэффициенты несимметрии на трехфазной нагрузке

| Четырехфазная ЛЭП          |              |             |           | Трехфазная ЛЭП             |              |             |           |
|----------------------------|--------------|-------------|-----------|----------------------------|--------------|-------------|-----------|
| Передаваемая мощность, МВт | $k_{2U}$ , % | Потери, МВт | Потери, % | Передаваемая мощность, МВт | $k_{2U}$ , % | Потери, МВт | Потери, % |
| 6,16                       | 1,33         | 0,025       | 0,41      | 6,14                       | 4,54         | 0,06        | 1,04      |
| 9,20                       | 1,43         | 0,050       | 0,54      | 9,23                       | 7,3          | 0,15        | 1,64      |
| 12,28                      | 2,16         | 0,092       | 0,75      | 12,39                      | 10,77        | 0,30        | 2,42      |
| 15,39                      | 3,25         | 0,155       | 1,01      | 15,66                      | 15,59        | 0,55        | 3,49      |



**Рис. 6. Векторные диаграммы напряжений на шинах 10 кВ подстанции потребителя при обрыве одной фазы и нагрузке  $12 + j12$  МВ·А**  
а – 4-х фазная ЛЭП; б – трехфазная ЛЭП

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Четырехфазная ЛЭП обеспечивает приемлемое качество электроэнергии в режиме обрыва одной фазы. Для трехфазной ЛЭП показатели качества электроэнергии по несимметрии и отклонениям напряжения на шинах 10 кВ не соблюдаются даже в режиме, близком к холостому ходу. Для получения нормативных значений показателей требуется применение дорогостоящих устройств, например, пофазно регулируемых источников реактивной мощности.

2. Потери мощности в неполнофазном режиме у четырехфазной ЛЭП значительно (в 2,5...3,5 раза) ниже, чем у 3-х фазной линии.

**Заключение.** Предложена методика моделирования неполнофазных режимов 4-х фазных линий электропередачи. На основе компьютерного моделирования показано, что 4-х фазные ЛЭП могут более эффективно работать в режимах с отключенной фазой, чем традиционные трехфазные линии.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самородов Г.И. Четырехфазные электропередачи. // Изв. РАН «Энергетика». 1995. № 6.
2. Бушуев В.В., Красильникова Т.Г., Самородов Г.И. Дальние электропередачи переменного и постоянного тока и их сравнительный анализ. // Электро. № 2. 2012. С. 2-7.
3. Красильникова Т.Г., Манусов В.З. Фазопреобразующий трансформатор для четырехфазных электропередач. // Научный вестник НГТУ. 2010. № 3(40). С. 143-151.
4. Красильникова Т.Г., Манусов В.З. Обоснование схемы транспозиции четырехфазной линии электропередачи. // Сборник научных трудов НГТУ. 2005. № 4. С. 79-84.
5. V.P. Zakaryukin and A.V. Kryukov. Simulation of power systems with four-phase power transmission lines // Power Technology and Engineering. Vol. 48, No. 1, 2014. P. 57-61.
6. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование энергосистем с четырёхфазной линией электропередачи // Электрические станции. № 11. 2013. С. 32-37.
7. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Моделирование трехфазно-четырёхфазных электроэнергетических систем // Вестник ИрГТУ. № 5. 2013. С. 141-147.
8. Закарюкин В.П., Крюков А.В. Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.



9. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В. Электромагнитная обстановка на объектах железнодорожного транспорта. Иркутск: ИрГУПС, 2011. 130 с.
10. Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В. Управление электромагнитной обстановкой в тяговых сетях железных дорог: монография. Ангарск: АГТА, 2014. 158 с.
11. Александров Г.Н. Режимы работы воздушных линий электропередачи. СПб.: Центр подготовки кадров энергетики, 2006. 139 с.
12. Мисриханов М.Ш., Рагозин А.А., Попов В.А. и др. Экспериментальное исследование неполнофазных режимов работы оборудования. Иваново: Вестник ИГЭУ. Вып. 3, 2003. С. 69-81.

УДК 621.311:621.331

Лэ Ван Тхао

## МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕПОЛНОФАЗНЫХ РЕЖИМОВ ДВЕНАДЦАТИФАЗНЫХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

*Применение двенадцатифазных линий электропередачи (ДФ ЛЭП) дает возможность увеличения пропускной способности линий электропередачи, повышения их экономической эффективности, электромагнитной безопасности и надежности.*

*На основе методов моделирования мультифазных электроэнергетических систем выполнено моделирование неполнофазных режимов ДФ ЛЭП напряжением 220 кВ. Показано, что при передаче одинаковой мощности потери электроэнергии в ДФ ЛЭП существенно меньше потерь в трехфазной системе. В неполнофазных режимах уровни несимметрии в ДФ ЛЭП значительно ниже аналогичных показателей для трехфазной системы.*

*Ключевые слова: двенадцатифазные линии электропередачи, моделирование, фазные координаты.*

**Введение.** Увеличение пропускной способности линий электропередачи (ЛЭП), повышение их экономической эффективности, электромагнитной безопасности и надежности может быть достигнуто, в частности, применением двенадцатифазных линий электропередачи [1...7], в основе которых лежит симметричная система напряжений с фазовым сдвигом  $30^\circ$ . Для практической реализации двенадцатифазных ЛЭП (ДФ ЛЭП) необходима разработка методов моделирования режимов сложных электроэнергетических систем (ЭЭС), включающих в свой состав такие линии [4].

**Методика моделирования.** Разработанный на основе методов моделирования электрических систем переменного тока в фазных координатах [7] программный комплекс Fazonord позволяет проводить расчеты режимов трехфазно-двенадцатифазных ЭЭС. В комплексе реализованы оригинальные идеи моделирования многопроводных элементов со взаимоиндуктивными и емкостными связями с помощью решетчатых схем замещения. Применение таких методик позволяет моделировать практически любые типы многопроводных линий с большим количеством проводов и произвольным их соединением и любые типы однофазных, трехфазных трехстержневых и пятистержневых трансформаторов с различными схемами соединений обмоток. Кроме того, одновременно с расчетом режима ЭЭС могут быть определены соответствующие режиму напряженности электромагнитного поля (ЭМП) многопроводных линий электропередачи [9...12].

Результаты исследования режимов ДФ ЛЭП, представленные в работах [5...7], касались только нормальных режимов работы. Однако при эксплуатации ЭЭС иногда используется длительная работа в неполнофазных режимах [13, 14], например, с отключенным проводом одной из фаз. Анализ статистических данных по повреждениям на линиях электропередачи показывает, что более 60 % устойчивых аварийных отключений приходится на однофазные замыкания. На линиях с односторонним питанием эти аварии сопровождаются значительным недоотпуском электроэнергии. Поэтому переход на работу ЛЭП в неполнофазном режиме позволяет сократить длительность перерыва энергообеспечения и уменьшить недоотпуск электроэнергии потребителям.

Результаты анализа неполнофазных режимов работы ДФ ЛЭП, полученные при развитии исследований, описанных в [5...7], представлены в настоящей статье.

**Результаты моделирования.** Для исследования неполнофазных режимов была использована схема трехфазно-двенадцатифазной ЭЭС, показанная на рис. 1. Схема содержит трехфазный источник электроэнергии, две группы трансформаторов для преобразования трехфазной системы в двенадцатифазную и обратно, а также ДФ ЛЭП.

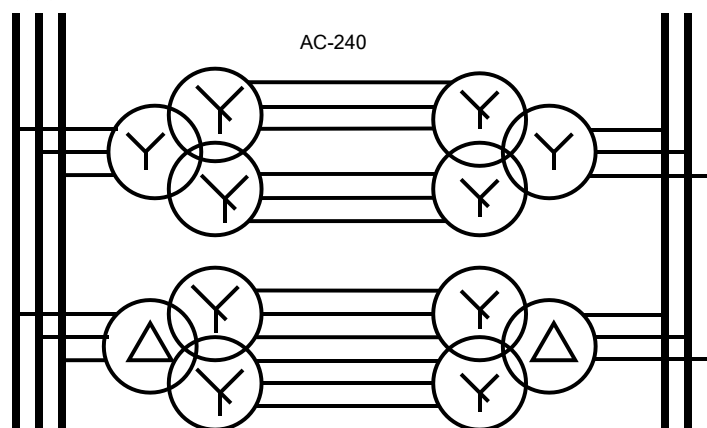


Рис. 1. Схема двенадцатифазной ЭЭС

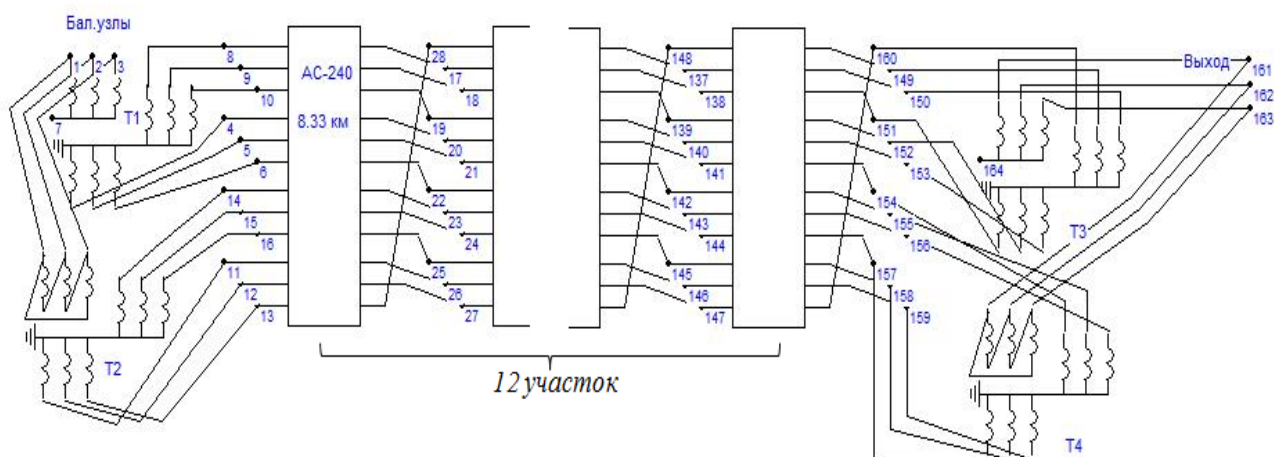


Рис. 2. Схема модели двенадцатифазной ЛЭП

Для сопоставления рассмотрена традиционная трехфазная ЭЭС, включающая 3-х фазную двухцепную ЛЭП 220 кВ. Схемы расчетных моделей представлены на рис. 2, 3. Результаты моделирования режимов при обрыве провода в узле 152 двенадцатифазной системы и в узле 79 в трехфазной двухцепной представлены в табл. 1 и на рис. 4...6. На рис. 4 представлены зависимости потерь в ЛЭП от величины передаваемой мощности  $P$ , а на рис. 5 – зависимости коэффициента несимметрии по обратной последовательности  $k_{2U}$  и по нулевой последовательности  $k_{0U}$  от  $P$ . На рис. 6 показаны векторные диаграммы напряжений на шинах 10 кВ приемной подстанции

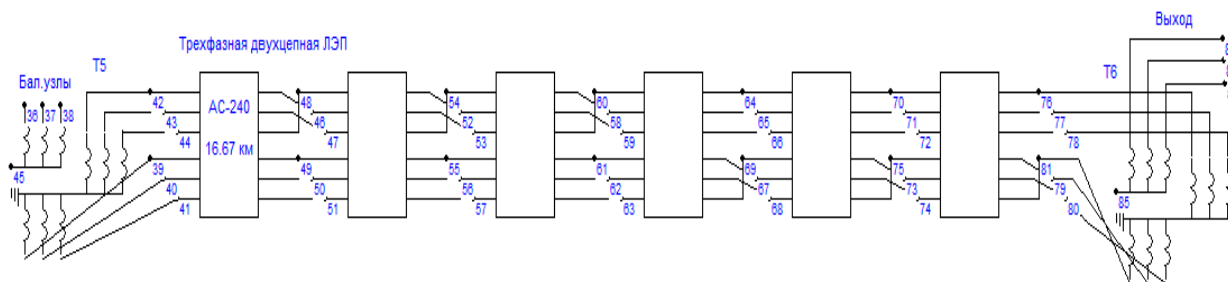


Рис. 3. Схема модели трехфазной двухцепной ЛЭП

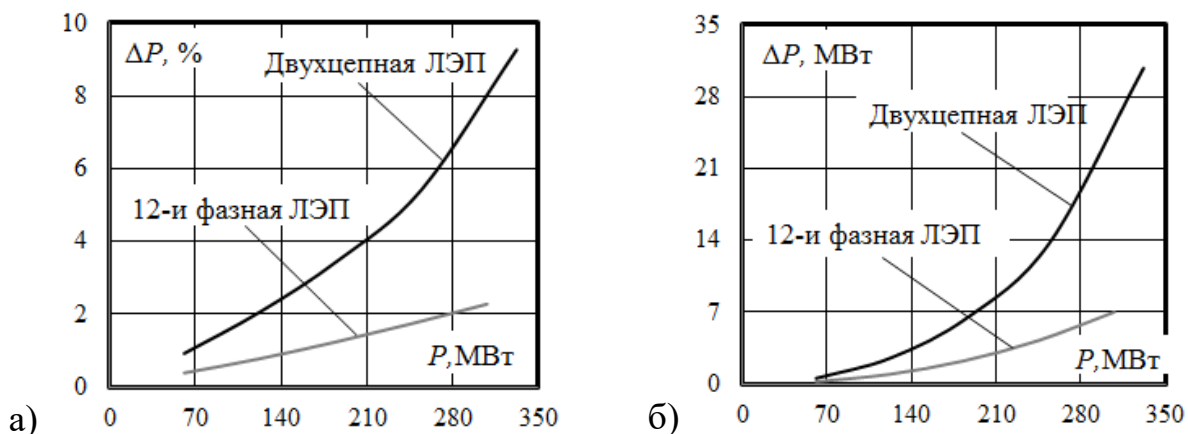


Рис. 4. Зависимости потерь от передаваемой мощности: а – в процентах от передаваемой мощности; б – в мегаваттах

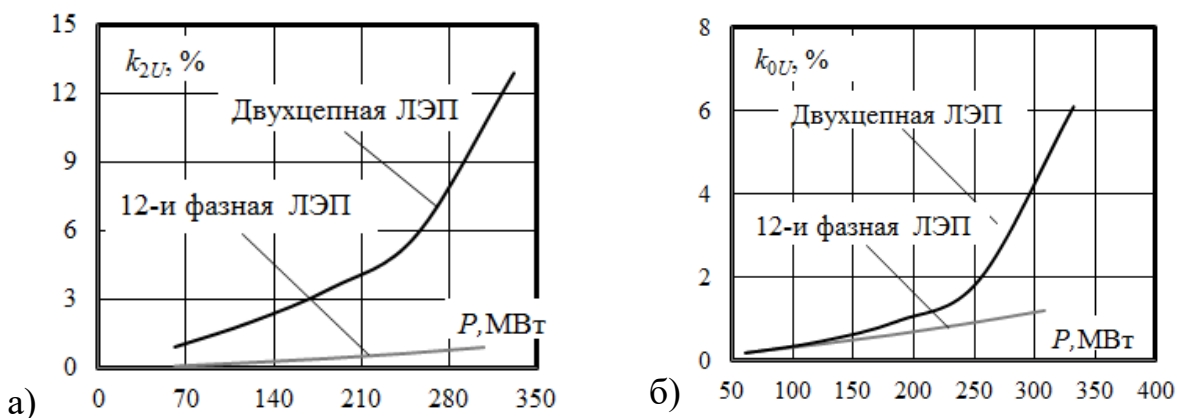


Рис. 5. Зависимость коэффициентов несимметрии а)  $k_{2U}$  и б)  $k_{0U}$  на шинах низкого напряжения подстанции потребителя от передаваемой мощности

## Потери в линиях и коэффициенты несимметрии на трехфазной нагрузке

| Нагрузка | Двухфазная ЛЭП                       |            |            |            | Трехфазная двухцепная ЛЭП            |            |            |            |
|----------|--------------------------------------|------------|------------|------------|--------------------------------------|------------|------------|------------|
|          | Передаваемая мощность $P_{ij}$ (МВт) | $k_{2U}$ % | $k_{0U}$ % | Потери МВт | Передаваемая мощность $P_{ij}$ (МВт) | $k_{2U}$ % | $k_{0U}$ % | Потери МВт |
| 20+j10   | 61,08                                | 0,05       | 0,2        | 0,24       | 60,98                                | 0,9        | 0,19       | 0,56       |
| 40+j20   | 121,78                               | 0,21       | 0,4        | 0,941      | 122,98                               | 2,01       | 0,47       | 2,54       |
| 60+j30   | 183,11                               | 0,39       | 0,63       | 2,25       | 187,06                               | 3,5        | 0,96       | 6,53       |
| 80+j40   | 245,13                               | 0,61       | 0,9        | 4,24       | 254,49                               | 5,82       | 1,96       | 13,78      |
| 100+j50  | 307,96                               | 0,88       | 1,21       | 7,010      | 332,08                               | 12,9       | 6,1        | 30,76      |

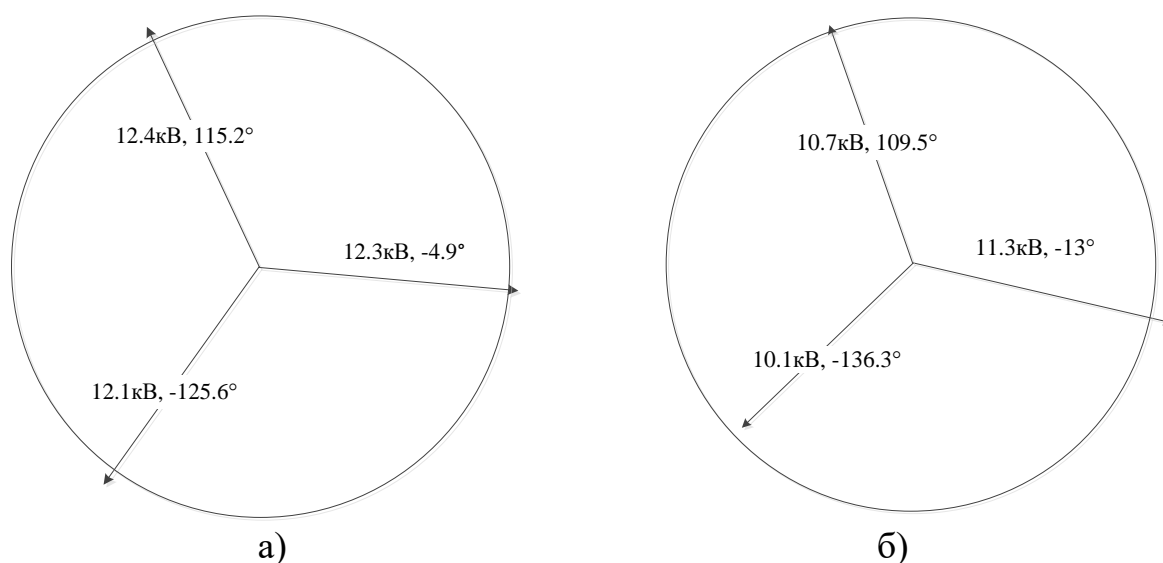


Рис. 6. Векторные диаграммы напряжений на шинах 10 кВ подстанции потребителя при обрыве одной фазы и нагрузке  $14 + j14$  МВ·А  
а – двенадцатифазная ЛЭП; б – трехфазная двухцепная ЛЭП

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Двенадцатифазная ЛЭП обеспечивает приемлемое качество электроэнергии в режиме обрыва одной фазы. Для трехфазной двухцепной ЛЭП показатели качества электроэнергии по несимметрии и отклонениям напряжения на шинах 10 кВ не соблюдаются даже в режиме, близком к холостому ходу и для получения нормативных значений показателей требуется применение дорогостоящих устройств, например, пофазно регулируемых источников реактивной мощности.

2. Потери мощности в неполнофазном режиме у двенадцатифазной ЛЭП ниже (в 2...4 раза), чем у 3-х фазной линии.

**Заключение.** Предложена методика моделирования неполнофазных режимов 12-и фазных линий электропередачи. На основе компьютерного моделирования показано, что 12-и фазные ЛЭП могут более эффективно работать в режимах с отключенной фазой, чем традиционные трехфазные линии.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Barthold L.O., Barnes H.S.* High phase order power transmission. *Electra*. Vol. 24. 1972. P. 139–153.
2. *Королев А.Н., Куликов К.В.* Экология многофазных ЛЭП // Повышение эффективности энергетического оборудования. Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2011. С. 455-460.
3. *Королев А.Н., Куликов К.В., Коротков В.В.* Особенности построения многофазных ЛЭП // Повышение эффективности работы энергосистем. Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2001. С. 108–111.
4. *Закарюкин В.П., Крюков А.В.* Моделирование многофазных линий электропередачи. Иркутск: Изд-во ИргУПС, 2014. 168 с.
5. *Zakaryukin V.P., Kryukov A.V.* Simulation of power systems with four-phase power transmission lines // *Power Technology and Engineering*. Vol. 48. № 1, may. 2014. P. 57–61.
6. *Закарюкин В.П., Крюков А.В., Лэ Ван Тхао.* Моделирование электромагнитных полей, создаваемых многофазными линиями электропередачи // *Вестник ИргТУ*. № 3(110). С. 67-75 с.
7. *Закарюкин В.П., Крюков А.В., Лэ Ван Тхао.* Моделирование электромагнитной обстановки на трассах многофазных линий электропередачи // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. № 4(52). 2016. С. 209-218
8. *Закарюкин В.П., Крюков А.В.* Сложнонесимметричные режимы электрических систем. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 2005. 273 с.
9. *Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В.* Электромагнитная обстановка на объектах железнодорожного транспорта. Иркутск: ИргУПС, 2011. 130 с.
10. *Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В.* Управление электромагнитной обстановкой в тяговых сетях железных дорог: монография. Ангарск: Изд-во АГТА, 2014. 158 с.
11. *Крюков А.В., Закарюкин В.П., Буякова Н.В.* Управление электромагнитной обстановкой в тяговых сетях железных дорог: монография. Ангарск: АГТА, 2014. 158 с.
12. *Закарюкин В.П., Крюков А.В., Лэ Ван Тхао.* Учет транспозиции проводов при моделировании электромагнитных полей, создаваемых высоковольтными линиями электропередачи // *Информационные и математические технологии в науке и управлении*. № 2. 2016. С. 71-80.
13. *Александров Г.Н.* Режимы работы воздушных линий электропередачи. СПб.: Центр подготовки кадров энергетики, 2006. 139 с.
14. *Мисриханов М.Ш., Рагозин А.А., Попов В.А. и др.* Экспериментальное исследование неполнофазных режимов работы оборудования. Иваново: Вестник ИГЭУ. Вып. 3. 2003. С. 69-81.

## РАЗДЕЛ III. ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 681.5

*С.А. Байбеков, В.Н. Сизых, И.А. Шлыкова*

### ОРГАНИЗАЦИЯ СКОЛЬЗЯЩИХ РЕЖИМОВ ПРИ НЕЙРОУПРАВЛЕНИИ ТИПОВЫМ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ МОДУЛЕМ В УСЛОВИЯХ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ НЕОПРЕДЕЛЁННОСТИ

*В статье предлагается новый подход к синтезу нейроморфных структур адаптивного управления в классе абсолютно устойчивых систем в условиях параметрической неопределенности технологического модуля (агента) сложного технологического процесса.*

*Ключевые слова: нейронная система, адаптивный метод, устойчивость системы.*

**Введение.** Проведенный анализ алгоритмов адаптации в реальном времени показывает, что существующие схемы нейронного управления оказываются квазиадаптивными с настройкой вне темпа процессов управления, либо, будучи по сути адаптивными, недостаточно обоснованными из-за сложностей анализа работоспособности, устойчивости, качества и достижения целей управления [1, 2]. В связи с этим в работе предлагается подход к совмещенному синтезу (синтезу в реальном или в ускоренном времени) нейрорегуляторов технологических процессов, который направлен на преодоление этих сложностей.

#### 1. Постановка задачи нейронного управления

Рассмотрим технологический процесс (ТП), состоящий из  $l$  взаимодействующих технологических модулей (ТМ). ТМ имеют общую, известную заранее структуру и отличаются только переходами от  $j$ -го входа к  $i$ -ому выходу ТП. Полагаем, что каждый ТМ (в англоязычной литературе – агент) выполняет определенную функцию сложного ТП, и описывается последовательным соединением линейной дифференциальной системы (линеаризованной на интервале дискретизации (наблюдения) нелинейной системы обыкновенных дифференциальных уравнений) объекта и нелинейного безынерционного преобразователя (НБП) – однослойного персептрона (искусственного нейрона). Такие ТМ образуют класс абсолютно устойчивых нелинейных систем [3, 4].

Уравнения  $j$ -го ТМ ( $j = \overline{1, l}$ ) имеют вид

$$\dot{x} = Ax + B(u + \sigma(t, z, u)) + \xi, \quad (1)$$

$$z = c^T x, \quad (2)$$

$$u = L z. \quad (3)$$

Индекс  $j$  для краткости записей переменных и параметров системы уравнений (1) – (3) опускаем. В дальнейшем полагаем, что система (1) должна удовлетворять требованиям существования и единственности решения;  $n$  - вектор неконтролируемых возмущений  $\xi \equiv \vec{0}$ .

В формулах (1) – (3) обозначено:

$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  –  $n$ -мерный вектор состояния  $j$ -го ТМ,  $x \in R^n$ ;

$u$  – управление  $j$ -ым ТМ (измеряемый скалярный вход системы (1)),  $u \in U \subset C^1$ ;

$z$  – наблюдение  $j$ -ым ТМ (измеряемый скалярный выход системы (1)),  $z \in R^1$ ;

$A$  – постоянная параметрически неопределенная матрица Якоби размерности  $n \times n$ ;

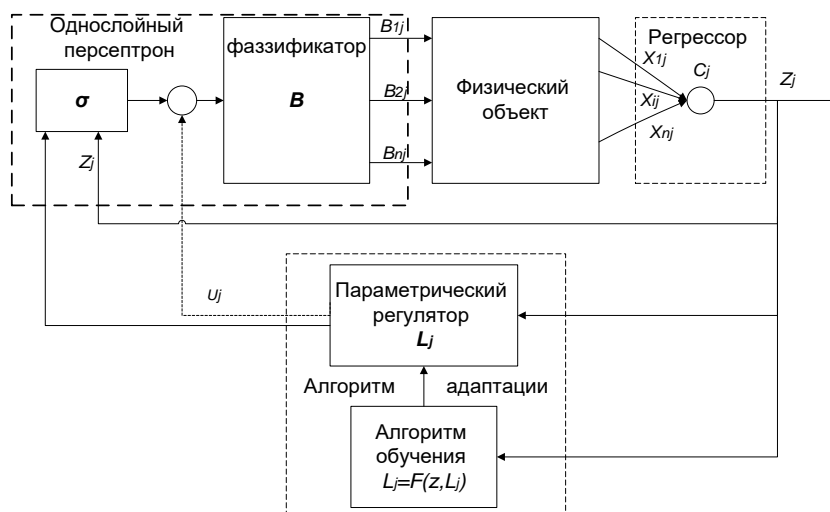
$B = (B_1, B_2, \dots, B_n)$  – постоянный вектор настраиваемых параметров НБП размерности  $n \times 1$ ;

$c = (c_1, c_2, \dots, c_n)$  – вектор-столбец задаваемых параметров наблюдения (регрессии) размерности  $1 \times n$ ;

$L$  – скалярный параметрический регулятор;

$\sigma(t, x, z)$  – скалярная функция активации (ФА) однослойного персептрона, получаемая нелинейным преобразованием  $j$ -ого управления  $u$  и  $j$ -ого наблюдения  $z$ .

Структура однослойной нейронной сети, параметрически адаптированной под  $j$ -ый ТМ, представлена на рис. 1.



**Рис. 1. Структура однослойной нейронной сети, параметрически адаптированной под  $j$ -ый ТМ**

На рис. 1 сплошными линиями обозначена структура однослойной НС с нелинейностью в «прямой цепи» (прототип – структура адаптивного регулятора (рис.16, а) работы [4, с. 351]). Предлагаемая структура отличается от традиционной схемы адаптивного регулятора (АР) наличием НБП и положительной жесткой обратной связи по скалярному выходу  $z$ . Данная структура НС добав-

лена пунктирной линией и сумматором – «цепью внутренней обратной связи» по скалярному входу  $u$  (прототип – структура адаптивного регулятора (рис.16, б) работы [4, с. 351]).

ФА определяет архитектуру НС. Однозначных рекомендаций по выбору ФА в настоящее время не существует. В режиме обучения *of-line* наиболее эффективен алгоритм обратного распространения ошибки сигнала и следующие ФА: гиперболическая тангенциальная, линейная и логическая сигмоидальная функции активации [6, 7].

В режиме *on-line* (оперативное обучение и управление), когда НС работает в реальном времени и выполняет функции адаптивного регулятора, будем полагать, что ФА удовлетворяет условиям [3]

$$0 \leq zu\sigma \leq \tilde{q}_1 \alpha z^2 + \tilde{q}_2 \beta u^2, \quad (4)$$

где  $z \in (-\infty; \infty)$ ,  $\tilde{q}_2 \in [0, 1]$ ,  $\tilde{q}_1 = 1 - \tilde{q}_2$ ,  $\alpha \in ]0, \alpha]$ ,  $\beta \in [0, \beta]$ ;  $\tilde{q}_1, \tilde{q}_2$  – корректируемые на интервалах наблюдения нечеткие коэффициенты, определяющие перераспределение сигналов от входа к выходу и от выхода к входу (режим работы НС);  $\alpha, \beta$  – весовые коэффициенты соответствующей физической размерности (ед.) при переменных в правой части ограничений на  $\sigma$ . БНП  $\sigma(\cdot)$  определяется правой частью выражения (4)

$$\sigma(t, z, u) = \tilde{q}_1 \alpha \frac{z}{u} + \tilde{q}_2 \beta \frac{z}{u} \quad (5)$$

Функция (5) имеет две особые точки  $z=0$ ;  $u=0$ . Предварительно будем считать их изолированными [8] Так как наблюдение  $z$  и уравнение  $u$  – скалярные функции, с учетом (3) БНП (5) можно представить в виде:

$$\sigma(t, z, u) = \sigma(L) = \tilde{q}_1 \frac{\alpha}{L} + \tilde{q}_2 \beta L \quad (6)$$

Зависимость  $\sigma(\cdot) = \sigma(L)$  при фиксированных  $\tilde{q}_1, \tilde{q}_2$  на рис. 2.

Исследуя свойства функции  $\sigma(\cdot)$  (формулы (5), (6)) можно заметить, что функция  $\sigma(\cdot)$  знакоопределенная:

1)  $\sigma(\cdot) > 0$  при  $zu > 0$  ( $z < 0, u < 0$  или  $z > 0, u > 0$ ),  
 $\sigma(\cdot) < 0$  при  $zu < 0$  ( $z > 0, u < 0$  или  $z < 0, u > 0$ );

2) имеет особую точку  $z = 0, L = 0$ , в которой происходит разрыв  
 $\lim_{L \rightarrow 0^-} \sigma(L) = -\infty, \lim_{L \rightarrow 0^+} \sigma(L) = \infty$  или  $\lim_{z \rightarrow 0^-} \sigma(t, z, u) = -\infty, \lim_{z \rightarrow 0^+} \sigma(t, z, u) = \infty$ ;

3) имеет две точки экстремума: точку максимума  $L = L^- = -\sqrt{\frac{\tilde{q}_1 \alpha}{\tilde{q}_2 \beta}}$  и точку

минимума  $L = L^+ = \sqrt{\frac{\tilde{q}_1 \alpha}{\tilde{q}_2 \beta}}$ . В точках экстремума функция  $\sigma$  принимает значения

$$\sigma_{\max} = \sigma^- = -2\sqrt{\tilde{q}_1 \tilde{q}_2 \alpha \beta}, \quad \sigma_{\min} = \sigma^+ = 2\sqrt{\tilde{q}_1 \tilde{q}_2 \alpha \beta};$$

4) функция  $\sigma(\cdot)$  имеет точно-симметрическую форму:  $L\sigma > 0$  при  $L \neq 0$ . Действительно, функция изменяет знак при условии  $zu \neq 0$ . При  $L < 0$  ( $zu < 0$ ) функция  $\sigma(\cdot)$  определяется в III квадранте рис. 2 и отрицательна  $\sigma(\cdot) < 0$ . При



$L > 0$  ФА вычисляется в I квадранте и положительна:  $\sigma(\cdot) > 0$ . Параметр  $L \neq 0$ , так как  $z = 0$ ,  $u = 0$  - особые точки.

5) при  $L > L^+$  и  $L > L^-$  функция  $\sigma(\cdot)$  близка к линейной с коэффициентами наклона прямых  $\pm \sqrt{\frac{\tilde{q}_1 \alpha}{\tilde{q}_2 \beta}}$  в I и III квадранте рис. 2.

НБП  $B(u + \sigma)$  (формула (1)) для  $j$ -го ТМ в теории НС и нечетких множеств называется однослойным персептроном с нулевым смещением или фазификатором, вектор-строка  $c^T$  – регрессором или дефазификатором [1].

При адаптивном подходе считается, что существует устойчивая внутренняя структура физического объекта [5], но неизвестны его параметры (коэффициенты матрицы  $A$ ). Относительно нелинейности указаны частичные свойства характеристики  $\sigma(\cdot)$ . Кроме того, неизвестен вектор  $B$  настраиваемых весовых коэффициентов однослойного персептрона.

Требуется осуществить оперативное управление  $j$ -ым ТМ с помощью адаптивного параметрического нейрорегулятора  $L$ .

В основу предлагаемого подхода положена параллель со схемой адаптивного управления с самонастройкой: НС настраивает параметры управления, задающие работу обычного контроллера, таким образом, чтобы выходной сигнал  $j$ -го ТМ поддерживался как можно ближе к желаемому:  $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_* = \vec{0}$ . Такое управление  $j$ -ым ТМ называется стабилизирующим [5].

Задача синтеза адаптивного параметрического нейрорегулятора решается в три этапа: исследуется выбранный класс нелинейных систем на устойчивость; синтезируется стабилизирующее управление  $u$ , обеспечивающее цель адаптации:  $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = \vec{0}$ ; по условиям устойчивости инициализируются параметры НС.

## 2. Устойчивость системы по Ляпунову

Устойчивость рассматривается как свойство свободного движения системы (1) после начального отклонения ее, вызванного какими-либо причинами. Невозмущенное движение  $x = \vec{0}$  определяется нулевым решением системы (1). Аналитическое определение понятия устойчивости по Ляпунову формулируется следующим образом [8].

*Определение 1.* Нулевое решение системы (1) устойчиво, если при заданном сколь угодно малом  $\varepsilon > 0$  существует такое  $\delta > 0$ , зависящее от  $\varepsilon$ , что при начальных условиях  $|x_i(0)| < \delta, i = \overline{1, n}$ , для решения на интервале  $0 < t < \infty$  выполняется условие  $|x_i(t)| < \varepsilon, i = \overline{1, n}$ .

Если условия определения 1 соблюдены и выполняется условие  $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_* = \vec{0}$ , то нулевое решение системы (1) асимптотически устойчиво.

Зависимость  $\sigma(\cdot) = \sigma(L)$  при фиксированных  $\tilde{q}_1, \tilde{q}_2$  представлена на рис. 2.

Зависимость сигма от L

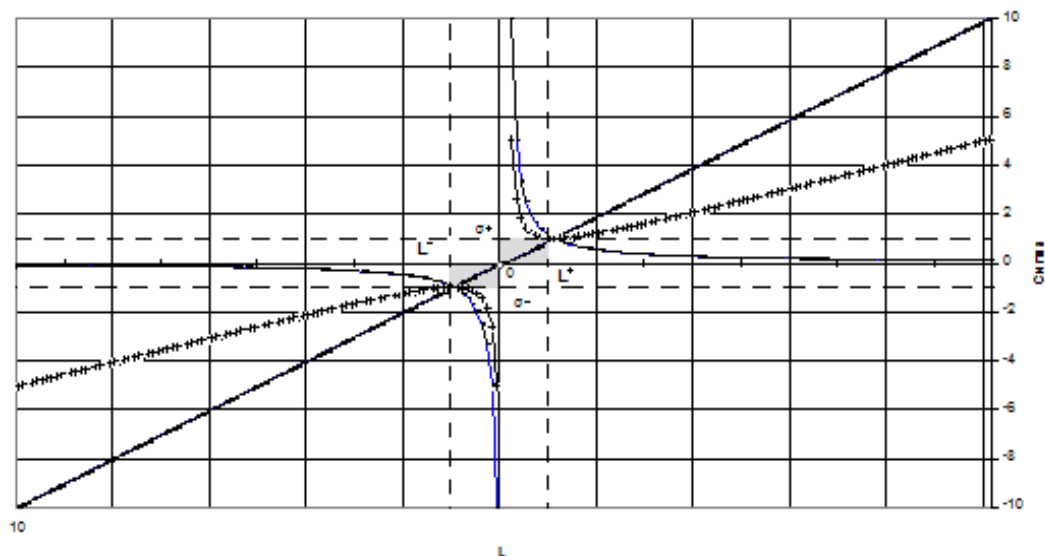


Рис. 2. – Зависимость функции активации от значений регулируемого параметра при различных  $\tilde{q}_1, \tilde{q}_2$  и  $\alpha = 1$  (ед.),  $\beta = 1$  (ед.).

**Теорема 1.** Если для системы уравнений (1)-(3) существует знакоопределяемая функция  $V(t, z, u) = \tilde{q}_1 \alpha z^2 + \tilde{q}_2 \beta u^2$ , то при НБП вида (4) производная  $\dot{V}$  от этой функции является тоже знакоопределяемой, но противоположного знака, если одновременно выполняются условия

$$z\dot{z} < 0, L\dot{L} < 0 \quad (7)$$

При этом решение системы (1) асимптотически устойчиво:  $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_* = \vec{0}$ .

Доказательство. Выбираем в качестве функции Ляпунова правую часть НБП (4):  $V(t, z, u) = \tilde{q}_1 \alpha z^2 + \tilde{q}_2 \beta u^2$ .

С учетом уравнения регулятора (3) определим функцию Ляпунова  $\dot{V}(t, z, u) = 2\tilde{q}_1 \alpha z\dot{z} + 2\tilde{q}_2 \beta u\dot{u} = 2[(\tilde{q}_1 \alpha + \tilde{q}_2 \beta L^2)z\dot{z} + \tilde{q}_2 \beta L\dot{L}]$ . Анализ последнего выражения показывает, что  $\tilde{q}_1 \alpha + \tilde{q}_2 \beta L^2 > 0$ ,  $\tilde{q}_2 \beta L^2 > 0$ . Тогда для отрицательной стороны знакоопределяемости  $\dot{V}$  обязательное выполнение условий (7) теоремы. Условия устойчивости (7) не зависят от конкретной точечно-симметрической формы НБП  $\sigma(L)$ , поэтому они одновременно являются условиям абсолютной устойчивости системы (1)-(3). В следствии того, что, функция Ляпунова будет монотонноубывающей функцией с нижним пределом  $\lim_{t \rightarrow \infty} V(t, z, u) = 0$ , следовательно, имеет место достаточное условие асимптотической устойчивости:  $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_* = \vec{0}$ .

Поскольку точки  $z = 0, u = 0$  – особые точки, то выполнение достаточного условия асимптотической устойчивости возможно приближенно в неко-

торой области, ограниченной вертикальными  $L^\pm$  и горизонтальными  $\sigma^\pm$  асимптотами функции  $\sigma(L)$  (рис.2), Которая называется областью скользящих режимов [9]. При  $L > L^+$  и  $L < L^-$  функция  $\sigma(L)$  близка к линейной, и, следовательно, параметрический регулятор  $L$  является квазилинейным.

В области скользящих режимов необходимо обеспечить выполнение условий (7) теоремы. Первое условие устойчивости в (7) на практике реализуется через измерение выходной величины  $z$  и её производной. Второе условие в (7) теоремы контролируется через процедуру параметрического синтеза стабилизирующего уравнения методом скоростного градиента. [10]

Таким образом, в отличие от традиционного адаптивного подхода, когда области устойчивых решений линейной системы (1) определяется условием  $L < 0$ , при организации нейроподобных структур областью допустимых значений параметра  $L$  регулятора является всё множество действительных чисел  $L \in R^1$ .

Анализ полученных результатов показывает, что при организации скользящих режимов в условиях параметрической неопределённости по методу скоростного градиента алгоритм работы системы сводится к следующему:

1. При  $z = 0$ ,  $\tilde{q}_1 = 1$ ,  $\tilde{q}_2 = 0$  из  $L(0) = -\alpha \frac{c_*^T B}{z(0)}$ , следует  $L(0) = 0$  - в реаль-

ном времени происходит инициализация параметров НС; сеть предварительно обучается по алгоритму обратного распространения ошибки сигнала;

2. При  $z < 0$ ,  $z > 0$ ,  $0 < \tilde{q}_2 < 1$ ,  $L \in R^1$  - в реальном времени происходит дальнейшее обучение нейронной сети и одновременно нейро - нечеткое управление параметрически неопределенного физического объекта известной структуры;

3. При  $z = 0$ ,  $\tilde{q}_1 = 0$ ,  $\tilde{q}_2 = 1$ ,  $L(0)$ :  $L(0) = -\alpha \frac{c_*^T B}{z(0)}$  - процесс обучения сети заканчивается, и НС работает как обычный адаптивный регулятор.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Терехов В.А., Ефимов Д.В., Тюкин И.Ю. Нейросетевые системы управления // Нейроконтроллеры и их применение / Под ред. А.И. Галушкина. – М.: ИПРЖР, 2002. – 480 с.
2. Hunt K.J., Sbarbaro D., Zbikowski R., Gawthrop P.J. Neural Network for Control Systems – a Survey // Automatica, 1992, Vol. 28. – Pp. 1083-1112.
3. Айзерман М.А. О сходимости процесса регулирования после больших начальных отклонений // А и Т, 1946, № 2-3. – С. 148-167.
4. Гиль М.И. Об одном классе абсолютно устойчивых систем. // А и Т, 1983, № 10. – С. 27-36.
5. Срагович В.Г. Адаптивное управление. – М.: Наука, 1981. – 384 с.
6. Управление в условиях неопределенности.// Под ред. проф. А.Е. Городецкого. – СПб.: Изд-во СПб ГТУ, 2002. – 398 с.

7. *Омату С., Халид М., Юсоф Р.* Нейроуправление и его приложения. Кн. 2 // Нейро-контроллеры и их применение / Под ред. А.И. Галушкина, В.А. Птичкина. – М.: ИПРЖР, 2000. – 272 с.

8. *Попов Е.П.* Теория нелинейных систем автоматического регулирования и управления. – М.: Наука, 1988. – 256 с.

9. *Уткин В.И.* Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974, 272 с.

10. *Фрадков А.Л.* Схема скоростного градиента и ее применение в задачах адаптивного управления. // А и Т, 1979, № 9. – С. 90-101.

УДК 656.223.2:51

*А.Е. Лебедева, А.А. Оленцевич*

### **ОБЕСПЕЧЕНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И ЗАЩИТЫ ТРАНСПОРТНЫХ КОМПЛЕКСОВ ЗА СЧЕТ НАРАЩИВАНИЯ ПРОВОЗНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ В ЖДТС**

*Приводится система математических прогнозных моделей регрессионного типа для среднесрочного прогнозирования уровня безопасности функционирования железнодорожной транспортной системы в сфере наращивания провозных способностей станций и участков.*

*Ключевые слова: безопасность перевозочного процесса, системный подход, пропускная способность, регрессионная модель, рейтинг отказов, инвентарный парк, недостаточная вместимость.*

Железнодорожная транспортная система (далее – ЖДТС) на современном этапе развития постоянно наращивает объёмы перевозок в грузовом сообщении. Основным требованием, предъявляемым к ЖДТС, является обеспечение безопасности движения, что не должно создавать опасность жизни и здоровью людей, материальным ценностям, природе и другим техническим комплексам в результате реализации перевозочного процесса на всех его стадиях. Данное свойство системы обеспечивается:

- функционированием ее в заданных пределах параметров, определяемых нормативными требованиями по недопущению нарушения безопасности движения с указанными последствиями;
- изменением своих параметров или нормативных требований в случае появления угрозы (риска) нарушения движения для недопущения ее дальнейшего развития.

Третий этап реформирования железнодорожной отрасли характеризовался постепенным снижением доли вагонов инвентарного парка в связи с созданием ряда грузовых компаний. После передачи им в оперативное управление вагонов инвентарного парка, они перешли в категорию «приватных», что сформировало конкурентный сегмент транспортного рынка страны.

В условиях перехода к работе с подвижным составом, принадлежащим разным операторам обеспечение безопасности перевозочного процесса транспортной системы является одним из приоритетных направлений по:

– повышению сохранности перевозимых грузов и сокращению расходов по возмещению грузовладельцам убытков;

– снижению непроизводительных расходов на ликвидацию нарушений безопасности движения и коммерческих браков.

К сожалению, большинство «новых» операторов оказывая услуги, не предусматривают цель обеспечения безопасности перевозочного процесса, главная их задача – получение прибыли.

Все это привело к кардинальным изменениям схемы взаимоотношений между грузовладельцами, публичным перевозчиком, компаниями-операторами подвижного состава.

На протяжении большого количества времени ЖДТС развивалась для обеспечения связей внутри страны, что привело к высокому уровню технического оснащения магистральных направлений в центральной части сети, а также железнодорожных линии, связывающие удалённые регионы с центром. При этом четко обозначена проблема – недостаточная вместимость сети железных дорог для отстоя вагонов в ожидании погрузки.

Железнодорожный промышленный транспорт обеспечивает прием, и передачу свыше 90% грузов, перевозимых по ЖДТС и сохраняет свою ведущую роль в обеспечении перевозок по предприятиям черной металлургии, угольной и химической, лесной и деревообрабатывающей промышленности. При этом его материально-техническая база реконструируется на основе пропорционального, взаимоувязанного развития всех ее элементов с учетом обеспечения согласованной работы с магистральным железнодорожным транспортом.

Избыточный парк образуется в результате следующих факторов:

– груженые вагоны в основном направляются на железнодорожные станции выгрузки, без учета их беспрепятственного приема в конечных пунктах, что приводит к образованию на подходах к ним так называемых «брошенных» поездов с груженными вагонами;

– порожние вагоны заблаговременно направляются операторами подвижного состава на станции погрузки, что вызывает их избыточное накопление на данных станциях и участках, примыкающих к данным станциям.

Согласно данных [5] избыточным вагонным парком заняты тысячи километров станционных путей ЖДТС, по различным оценкам, до 4-5 тысяч километров.

Такое состояние железнодорожных путей не позволяет в полной мере обеспечить достаточную скорость передвижения вагонов к местам погрузки-выгрузки. Недостаточная емкость путей станций для накопления вагонов и отстоя после погрузки-выгрузки, не даёт возможности увеличивать количество вагонов в подаче и само количество подач. Все это значительно сокращает пробег маневровых локомотивов, увеличивает время оборота вагонов, уменьшает время нахождения вагонов на станции, снижает безопасность функционирования ЖДТС. Возникает ряд и других проблем. Прежде всего, заключающихся в следующем: сокращаются скорости хода (минимальные радиусы, минимальные вставки, профили путей не соответствуют техническим нормам), увеличивается время простоя вагонов под различными операциями (исключается возможность

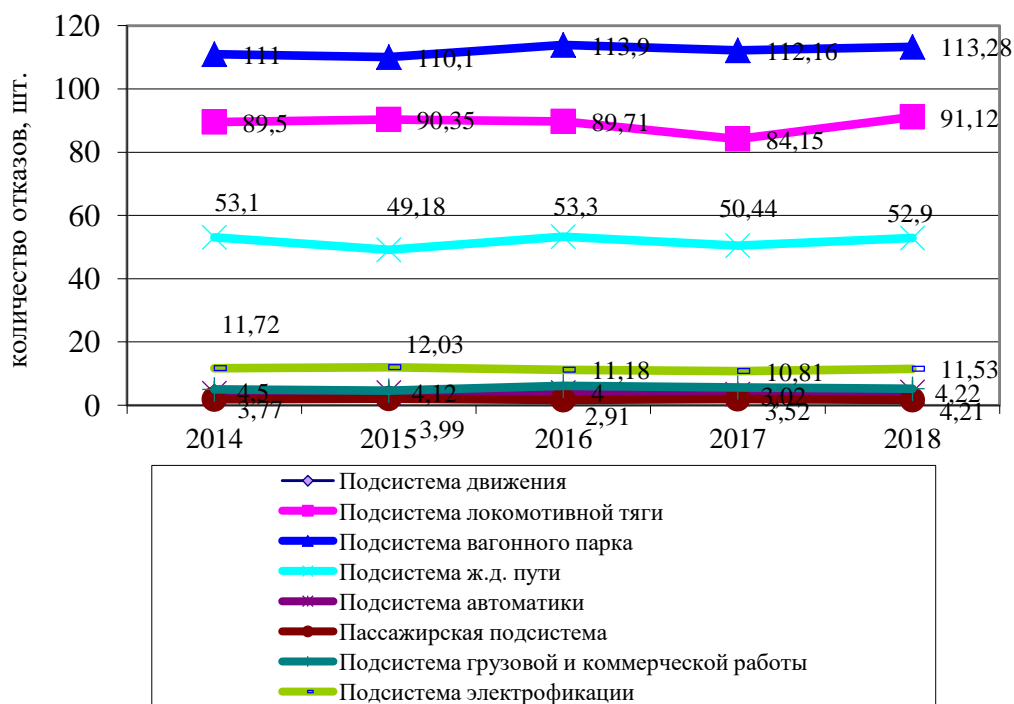
применять передовые технологии из-за стесненных условий) и что особенно важно уменьшается безопасность производства работ (все процессы производятся по минимальным допустимым нормам) [1].

На основе данных математической модели с помощью разработанного в ИрГУПС программного комплекса составлен прогноз отказов на примере Восточно-Сибирской железной дороги на период 2015-2019 гг. [2]. Результаты прогнозирования отказов представлены в таблице 1. Прогноз отказов по подсистемам ВСЖД можно отобразить графически, рис. 1.

Таблица 1

**Результаты прогнозирования отказов с указанием рейтинга**

| № | Служба                       | Год  | Прогноз отказов | № | Служба                                    | Год  | Прогноз отказов |
|---|------------------------------|------|-----------------|---|---|------|-----------------|
| 1 | Подсистема движения          | 2015 | 4,50            | 5 | Подсистема автоматики                     | 2015 | 3,77            |
|   |                              | 2016 | 4,12            |   |   | 2016 | 3,99            |
|   |                              | 2017 | 2,91            |   |   | 2017 | 4,00            |
|   |                              | 2018 | 3,02            |   |   | 2018 | 3,52            |
|   |                              | 2019 | 4,22            |   |   | 2019 | 4,21            |
| 2 | Подсистема локомотивной тяги | 2015 | 89,50           | 6 | Пассажирская подсистема                   | 2015 | 1,89            |
|   |                              | 2016 | 90,35           |   |   | 2016 | 2,09            |
|   |                              | 2017 | 89,71           |   |   | 2017 | 1,70            |
|   |                              | 2018 | 84,15           |   |   | 2018 | 1,99            |
|   |                              | 2019 | 91,12           |   |   | 2019 | 1,68            |
| 3 | Подсистема вагонного парка   | 2015 | 111,00          | 7 | Подсистема грузовой и коммерческой работы | 2015 | 5,05            |
|   |                              | 2016 | 110,10          |   |   | 2016 | 4,66            |
|   |                              | 2017 | 113,90          |   |   | 2017 | 6,12            |
|   |                              | 2018 | 112,16          |   |   | 2018 | 5,67            |
|   |                              | 2019 | 113,28          |   |   | 2019 | 5,23            |
| 4 | Подсистема пути              | 2015 | 53,10           | 8 | Подсистема электрификации                 | 2015 | 11,72           |
|   |                              | 2016 | 49,18           |   |   | 2016 | 12,03           |
|   |                              | 2017 | 53,30           |   |   | 2017 | 11,18           |
|   |                              | 2018 | 50,44           |   |   | 2018 | 10,81           |
|   |                              | 2019 | 52,90           |   |   | 2019 | 11,53           |



**Рис. 1. Прогноз отказов на период с 2015 по 2019 год для ВСЖД**

Как видно из прогноза безусловным приоритетным направлением функционирования железнодорожной транспортной системы в условиях роста объемов работ является обеспечение безопасности перевозочного процесса, что обеспечивает, в частности, необходимый уровень сохранности перевозимых грузов и сокращение расходов по возмещению возможных убытков.

Необходимость многостороннего учета различных факторов, влияющих на безопасное состояние железнодорожной транспортной системы, при разработке вероятностных сценариев регионального развития предполагает постоянное расширение и совершенствование прогнозного инструментария. Следует признать, что методики прогнозирования, используемые в настоящее время на предприятиях железнодорожного транспорта, не всегда отвечают современным требованиям и снижают эффективность принимаемых стратегических решений.

Интенсивное развитие информационных технологий позволяет на основе установленных связей между показателями моделировать и получать неограниченное количество вероятностных сценариев развития технических и технологических процессов на отдаленную перспективу, оценивать полученные результаты и определять оптимальные варианты будущего развития.

Анализ полученных прогнозных значений (таблица 1) и основных причин за предшествующие годы позволяет руководителям соответствующих подсистем выработать эффективную политику обеспечения безопасности функционирования железнодорожной транспортной системы [3].

Обобщающей характеристикой уровня безопасности функционирования ЖДТС на федеральном и на региональном уровнях примем вектор  $y = (y_1, \dots, y_8)$ , компонентами которого является количество браков в работе в деятельности соответствующих служб, произошедших по различным причинам ( $x_1 - x_{42}$ ). Уровень безопасности каждой из подсистем оценивается одним показателем – числом браков) в зоне действия соответствующей службы.

По результатам деятельности Восточно–Сибирской железной дороги построена математическая модель влияния частных показателей типов нарушений  $x_i, i = \overline{1, 42}$ , на общее состояние уровня безопасности региональной ЖДТС с ее декомпозицией на подсистемы  $y_j, j = \overline{1, 8}$ . При этом для проведения «конкурса» моделей по отношению к каждому из восьми регрессионных соотношений воспользуемся программным комплексом описанным в [2].

Для оценки адекватности моделей использованы критерии:  $R$  – множественной детерминации;  $t$  – Стьюдента;  $F$  – Фишера;  $DW$  – Дарбина-Уотсона;  $E$  – средней относительной ошибки аппроксимации.

Для построения каждой регрессионной модели для  $y_j, j = \overline{1, 8}$ , средствами упомянутого программного комплекса строилось несколько сотен (в зависимости от характера данных) ее альтернативных вариантов с последующим выбором лучшего из них, исходя их векторного критерия адекватности. При этом использовался алгоритм, описанный в работе [4]:

$$\text{Служба движения} \quad y_1 = 2.47 + 1.3x_1 + 1.48x_2 + 1.48x_3,$$

$$(3.16) \quad (11.66) \quad (3.16)$$

$$R = 0,975, F = 59,26, DW = 2,83, E = 7,85\%,$$

Описанная система математических прогнозных моделей регрессионного типа в дальнейшем использована для среднесрочного прогнозирования уровня безопасности на Восточно-Сибирской железной дороге по выделенным направлениям функционирования. Результаты проведенного анализа представлены в таблице 2.

Таблица 2

**Рейтинг отказов для подсистем ЖДТС**

| Служба          | Отказы   |
|-----------------|--|
| Служба движения | <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Сходы вагонов</li> <li>2. Недостаточная вместимость ж.д.путей для отстоя вагонов в ожидании погрузки</li> <li>3. Отправление на занятый перегон</li> </ol> |

Как показал анализ рейтинга отказов, для подсистемы движения вторая по значимости причина отказов – недостаток пропускной способности железнодорожных станций, т.е. несоответствие уровня развития сети федеральных железных дорог, законодательных основ организации процесса перевозок и парков вагонов, перемещающихся по сети. Обстановка отягощается отсутствием эффективной системы централизованного планирования перевозок, что приводит к ошибкам в управлении вагонными парками.

Ситуация на рынке оперирования подвижным составом сегодня такова, что нередко вызывает различного рода рассуждения об оптимальных размерах вагонного парка. Причем в последнее время в различных источниках все чаще звучат мнения о якобы существующем сегодня дефиците грузовых вагонов. Хотя для существующих объемов перевозок даже имеющийся подвижной состав избыточен. Необходимо принимать срочные меры по устранению проблем, связанных с управлением вагонными парками и создающих ограничения в обеспечении ритмичного и безопасного перевозочного процесса.



Эффективная эксплуатационная работа в ЖДТС будет успешной только в том случае, если она будет иметь существенные резервы инфраструктуры. Если вагонный и локомотивный парк могут использоваться практически на 100% (т.е. когда весь наличный парк в работе), то инфраструктура, в силу динамики и неравномерности перевозочной работы, должна иметь определенный резерв. Так согласно статистических данных, при заполнении пропускной способности железнодорожной линии более чем на 80 % уже начинают возникать затруднения с пропуском поездов, а участки с загрузкой пропускной способности на уровне 90 % считаются работающими на пределе своих возможностей, т.е. от развитости инфраструктуры зависят и методы эксплуатации железных дорог. Этим же обусловлены и возможности увеличения рабочего парка вагонов и эксплуатируемого парка локомотивов. Главная особенность работы российских железных дорог состоит в недостатке или отсутствии инфраструктурных резервов.

Переход на работу с частным вагонным парком негативно отразился на эффективности всей системы управления перевозками в ЖДТС. Отсутствие на инфраструктуре на подходах к портам сортировочных мощностей, ориентированных на обработку порожнего вагонопотока, практически исключает возможность формирования маршрутов из порожних вагонов, создавая дополнительную нагрузку на технические станции самых грузонапряженных участков.

Возможность увеличения пропускной и перерабатывающей способности станций во многих случаях решается, прежде всего, за счет проведения организационно-технических мероприятий, не требующих значительных средств. Реконструктивные мероприятия с капитальными вложениями на строительство и техническое оснащение устройств станции, чаще всего стараются не рассматривать. Вследствие такого подхода, решая проблему только сегодняшнего дня, ограничивают возможность наращивания объемов работы и деятельности станции в дальнейшем.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Оленцевич В.А.* Систематизация факторов влияющих на безопасность перевозок грузов на железнодорожном транспорте // Материалы третьей международной научно-практической конференции «Безопасность регионов – основа устойчивого развития». – Иркутск.: ИрГУПС, 2012. – С. 197-202.

2. *Носков С.И., Базилевский М.П.* Программный комплекс автоматизации процесса построения регрессионных моделей // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – Иркутск. 2010. № 1. – С. 93–94.

3. *Оленцевич В.А., Гозбенко В.Е.* Анализ причин нарушения безопасности работы железнодорожной транспортной системы // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – Иркутск. 2013. № 1(37). – С. 180–183.

4. *Носков С.И., Оленцевич В.А., Базилевский М.П.* Математическая модель оценки безопасности перевозочного процесса на региональном уровне // Транспортная инфраструктура сибирского региона. Материалы пятой международной научно-практической конференции Иркутск. 2015. Т. 1 с. 74-78.

5. Ресурс интернет <http://www.rzd.ru>

## РАЗДЕЛ IV. КОНТРОЛЬ, ДИАГНОСТИКА И НАДЕЖНОСТЬ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 621.3.019

В.А. Володарский

### ОПТИМИЗАЦИЯ ПЕРИОДИЧНОСТИ ПРЕДУПРЕДИТЕЛЬНЫХ ЗАМЕН ПРИБОРОВ СЦБ

*Изложен метод определения периодичности предупредительных замен приборов СЦБ по критериям минимума удельных эксплуатационных затрат и допустимого значения интенсивности отказов.*

*Ключевые слова: замена, ремонт, периодичность, удельные затраты, оптимизация, интенсивность отказов.*

Согласно инструкции [1] техническое содержание приборов СЦБ заключается в периодических заменах с последующим ремонтом и проверкой их в РТУ дистанций. В частном случае замена может проводиться не отремонтированными, а новыми приборами СЦБ.

Для выбора рациональной стратегии предупредительных замен необходимо исходить из двух критериев

минимума удельных эксплуатационных затрат  $C$ ;

допустимого значения интенсивности отказов  $\lambda_g$ .

Известно, что при ремонте приборам возвращается лишь часть исходных надежностных свойств. В соответствии с [2] глубину восстановления надежности при проведении ремонтов приборов СЦБ будем оценивать как разницу между их доремонтным и межремонтным ресурсом. Если у нового прибора нулевой «возраст», то после ремонта «возраст» прибора как бы возвращается в точку  $a$ . «Время жизни» прибора от 0 до  $a$  назовем глубиной восстановления надежности.

Рассмотрим три возможные стратегии технического содержания приборов по критерию минимума удельных эксплуатационных затрат.

**Нулевая стратегия**, при которой предупредительные замены не проводятся, а при отказах через среднюю наработку  $T$  проводятся аварийные замены новыми приборами стоимостью  $s$  с учетом ущерба от простоя поездов  $A$ . Тогда удельные эксплуатационные затраты определяются как  $C = A/T$ . Эта стратегия применяется в случаях, когда интенсивность отказов приборов со временем не возрастает или, когда стоимость предупредительной замены  $B$  и аварийной замены  $A$  равны между собой.

Нулевая стратегия является предельным случаем рассматриваемых ниже стратегий при периодичности предупредительных замен  $\tau \rightarrow \infty$ . Поэтому она принимается за базовую стратегию, а все остальные стратегии

приводятся к ней и получаются модели предупредительных замен в безразмерном виде, что удобно при их сравнении и исследовании.

**Стратегия 1** заключается в следующем. Если отказ прибора не было, то через время  $t$  проводится предупредительная замена его новым прибором стоимостью  $B$ . Если произошел отказ прибора, то проводится аварийная замена новым прибором стоимостью  $A$ , а очередная предупредительная замена переносится. Удельные эксплуатационные затраты при этой стратегии определяются из выражения [3]

$$C(\tau)_1 = (A - (A - B)P(\tau)) / \int_0^\tau P(t)dt. \quad (1)$$

При значении  $\tau \rightarrow \infty$  получаем нулевую стратегию.

**Стратегия 2** отличается от стратегии 1 тем, что вместо замен новыми приборами проводится аварийная замена стоимостью  $A_1$  или предупредительная замена стоимостью  $B_1$  приборами, отремонтированными в РТУ до возврата  $a$ . Удельные эксплуатационные затраты при этой стратегии определяются из выражения [3]

$$C(\tau)_2 = (A_1 - (A_1 - B_1)P(\tau + a)) / \int_0^\tau P(t + a)dt. \quad (2)$$

Как частный случай при  $a = 0$ , когда  $A_1 = A$  и  $B_1 = B$ , получаем стратегию 1.

Очевидно, что применение стратегии 2 будет целесообразно только, когда стоимость отремонтированных в РТУ приборов будет ниже стоимости новых приборов.

Приведем выражения (1) и (2) к безразмерному виду, разделив их на значение удельных эксплуатационных затрат при нулевой стратегии  $C$ . Тогда получим

$$y_1 = C(\tau)_1 / C = (1 - (1 - \gamma)P(x)) / \int_0^x P(u) du; \quad (1a)$$

$$y_2 = C(\tau)_2 / C = ((\beta P(a) - (\beta - \gamma_1)P(x + a)) / \int_0^x P(u + a) du, \quad (2a)$$

где  $x = \tau/T$  - периодичность предупредительных замен в единицах наработки на отказ;

$u = t/T$  - время эксплуатации в единицах наработки на отказ;

$a = a/T$  - глубина восстановления в единицах наработки на отказ;

$\gamma = B/A$  - коэффициент стоимости предупредительных замен новыми приборами;

$\beta = A_1/A$  - коэффициент стоимости аварийных замен отремонтированными приборами;

$\gamma_1 = B_1/A$ -коэффициент стоимости предупредительных замен отремонтированными приборами.

При решении задач оптимизации периодичности предупредительных замен необходимо знание, как стоимостных показателей, так и законов распределения наработки приборов на отказ. Стоимость новых и отремонтированных в РТУ приборов однозначно определяется нормативными документами. Трудности возникают при определении стоимости аварийных замен, в которые входит ущерб от сбоя движения и задержек поездов и которые носят вероятностный характер. При этом может быть использована методика расчета ущерба, изложенная в [4]. В случае неполноты исходных данных для оценки коэффициентов стоимости  $\gamma$ ,  $\gamma_1$  и  $\beta$  может быть применен метод экспертных оценок.

Особые трудности возникают с определением законов распределения наработки приборов на отказ. Как отмечается в [4], проведение для этой цели специальных испытаний требует больших затрат времени и средств, а иногда и просто невозможно. Поэтому показатели надежности приборовой определяются путем сбора и обработки информации об отказах в условиях эксплуатации. Поскольку приборы являются восстанавливаемыми изделиями, когда после каждого отказа производится их замена, то по эксплуатационным статистическим данным могут быть получены параметры потока отказов элементов  $\omega(t)$ .

Согласно определению параметр потока отказов есть отношение числа отказавших изделий за интервал времени  $n(dt)$  к числу испытываемых изделий за этот интервал  $dt$  при условии, что отказавшие изделия заменяются исправными (новыми или отремонтированными), то есть  $\omega(t) = n(dt)/Ndt$ , где  $N$  – число испытываемых изделий, которое остается постоянным. Из теории надежности известно, что параметр потока отказов при любом виде распределения стремится к стационарному значению  $\omega = 1/T$ , где  $T$  – наработка на отказ. Это и проявляется при сборе статистических данных об отказах приборов в реальных условиях эксплуатации.

Хотя численные значения параметра потока отказов приборовой представлены в [4] как постоянные величины, это не означает, что интенсивность отказов  $\lambda(t)$  этих устройств тоже постоянна, поскольку приборы являются стареющими изделиями. Согласно определению интенсивность отказов есть отношение числа отказавших изделий за интервал времени  $n(dt)$  к среднему числу изделий  $N_{cp}$ , исправно проработавших в данный интервал времени  $dt$ , то есть  $\lambda(t) = n(dt)/N_{cp}dt$ . При этом  $N_{cp}$  из-за отказов изделий с каждым интервалом уменьшается, а  $\lambda(t)$  стареющих изделий - возрастает.

В [4] подробно описаны деградационные процессы, которые вызывают износ и старение элементов ЖАТ, в том числе, приборов СЦБ. Подоб-

ные процессы приводят к постепенным отказам и описываются в теории надежности классом распределений, имеющих возрастающую функцию интенсивности отказов (ВФИ-распределения).

Для определения распределений наработки на отказ приборов СЦБ может быть применен метод[5], суть которого заключается в следующем. Когда удастся оценить только значение наработки на отказ, например, из выражения  $T = 1/\omega$ , то можно предложить следующий метод приближенного описания функции  $\omega(t)$ . Поскольку параметр потока отказов при  $t = T$  приближается к своему стационарному значению, равному  $1/T$ , предлагается аппроксимировать зависимость  $\omega(t)$  кусочно-линейной функцией вида: при  $t < T \omega(t) = t/T^2$ ; при  $t \geq T \omega(t) = 1/T$ .

Остальные показатели определяются с использованием преобразования Лапласа. Плотность распределения  $f(t)$  найдем из уравнения, связывающего ее в операторной форме с параметром потока отказов  $f(s) = \omega(s) / (1 + \omega(s))$  как  $f(t) = (1/T) \sin(t/T)$ . Тогда вероятность безотказной работы  $P(t)$  и интенсивность отказов  $\lambda(t)$  определим из выражений[5]:

$$P(t) = \cos(t/T); \lambda(t) = (1/T) \operatorname{tg}(t/T). \quad (3)$$

Аргумент  $t/T$  в формулах для определения показателей надежности измеряется в радианах. Назовем полученное распределение распределением косинуса, область определения которого лежит в интервале  $0 < t/T < \pi/2$ . Интенсивность отказов этого распределения является монотонно возрастающей функцией времени (3), а значение коэффициента вариации равно  $V = (\pi - 3)^{0,5} \approx 0,375$ [5], то есть менее единицы. Поэтому оно относится к классу ВФИ-распределений и может использоваться для описания постепенных отказов приборов СЦБ.

Подставив вероятность безотказной работы из (3) в выражения (1а) и (2а), взяв производную и приравняв ее к нулю, получим формулы для определения оптимальных относительных значений периодичности замен  $x_{o1}$  и удельных эксплуатационных затрат  $y_{o1}$  в безразмерном виде как

$$x_{o1} = \arccos(1 - \gamma); \quad y_{o1} = \sin x_{o1}. \quad (16)$$

$$1 - (\cos(x_{o2} + a) \cos a) / (1 - \sin(x_{o2} + a) \sin a) = \gamma_1 / \beta;$$

$$y_{o2} = (\beta - \gamma_1) \operatorname{tg}(x_{o2} + a). \quad (26)$$

Как видно из выражений (16) для определения  $x_{o1}$  и  $y_{o1}$  при стратегии 1 достаточно знать только значение коэффициента стоимости  $\gamma$ . Для определения  $x_{o2}$  и  $y_{o2}$  при стратегии 2 с использованием уравнений (26) достаточно знать значения коэффициентов стоимости  $\beta$ ,  $\gamma_1$  и глубины восстановления надежности  $a$ . На рисунке 1 представлены зависимости оптимальных

значений периодичности замен  $x_o$  от соотношения стоимостей  $\gamma_1 / \beta$  при разных значениях глубины восстановления  $a$ , вычисленные с использованием уравнения (2б).

Абсолютные значения оптимальной периодичности замен  $\tau_o$  и оптимальных удельных эксплуатационных затрат  $C_o$  определяются из выражений:

$$\tau_{o1} = T x_{o1}; \tau_{o2} = T x_{o2}; C_{o1} = y_{o1} A / T; C_{o2} = y_{o2} A / T.$$

Для анализа эффективности и выбора рациональной стратегии проведем сравнения стратегий 1 и 2 при естественном предположении, что в рамках каждой стратегии обслуживание приборов ведется оптимальным способом. Использование для замены отремонтированных в РТУ приборов будет эффективнее, чем использование для замены новых приборов, при выполнении условия  $y_{o2} / y_{o1} < 1$ . На рисунке 2 представлена граничная кривая зависимости соотношения стоимости отремонтированных приборов к стоимости новых приборов  $\gamma_1 / \gamma_2$  от глубины восстановления надежности  $a$ , построенная с использованием выражений (1б) и (2б). Ниже этой кривой целесообразно для замены использовать отремонтированные приборы, а выше – новых приборов СЦБ.

Определение периодичности предупредительных замен по допустимому значению интенсивности отказов  $\lambda_g$  производится из следующих выражений [6]:

при использовании новых приборов как  $x_{g1} = \arctg \lambda_g; \tau_{g1} = T x_{g1};$

при использовании отремонтированных приборов как

$$x_{g2} = \arctg \lambda_g - \alpha; \tau_{g2} = T x_{g2}.$$

Как видно из полученных результатов задача определения периодичности предупредительных замен приборов СЦБ по критериям минимума удельных эксплуатационных затрат и допустимого значения интенсивности отказов при использовании для описания отказов приборов распределения косинуса решается в аналитическом виде.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по технической эксплуатации устройств и систем сигнализации, централизации и блокировки. Утверждена распоряжением ОАО РЖД от 17.04.2014, №939р.

2. Володарский В.А. Учет глубины восстановления надежности технических средств // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. –Иркутск: ИрГУПС. – 2010. - Вып. 17. - С.119-126.
3. Володарский В.А. Математические модели оптимизации предупредительных замен и ремонтов технических устройств // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. - № 2. – С. 170 – 173.
4. Сапожников В.В., Сапожников Вл.В., Шамапов В.И. Надежность систем железнодорожной автоматики, телемеханики и связи. – М.: Маршрут, 2003. – 263 с.
5. Володарский В.А. Определение параметров распределений наработки на отказ элементов систем железнодорожной автоматики и телемеханики // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. – Иркутск: ИрГУПС. – 2006. - Вып. 14. - С.85-89.
6. Володарский В.А. Определение параметров системы предупредительных замен и ремонтов при допустимом значении интенсивности отказов// Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2012. - № 4. – С. 126 – 129.

УДК 621.3.019

*В.А. Володарский, А.В. Кротов*

### **О НАДЕЖНОСТИ ПРОФИЛАКТИРУЕМЫХ РЕЗЕРВИРОВАННЫХ СИСТЕМ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ НЕСТАРЕЮЩЕГО ТИПА**

*Предложены выражения для определения относительного повышения наработки на отказ резервированных систем при проведении периодических проверок работоспособности с заменой отказавших элементов. Изложены результаты исследований влияния периодичности проверок на значения наработки на отказ систем из элементов нестареющего типа.*

Ключевые слова: *система, элемент, профилактика, проверка, замена.*

Под элементами нестареющего типа будем понимать такие, которые подвержены только внезапным отказам с постоянной интенсивностью отказов  $\lambda = 1/T$ , где  $T$  – наработка элемента на отказ. В этом случае вероятность безотказной работы описывается экспоненциальным распределением вида [1]

$$P(t) = e^{-\lambda t}, \quad \text{где } t \text{ – время эксплуатации.}$$

Рассмотрим системы с однократным резервированием двух видов:

- 1) постоянным, когда основной и резервный элементы находятся в нагруженном режиме и одновременно выполняют одни и те же функции;
- 2) замещением, когда отказавший основной элемент заменяется с помощью переключателя резервным, находящегося до этого в ненагруженном режиме и который начинает выполнять функции основного элемента.

Примем следующие допущения:

- 1) отказы элементов независимы друг от друга, а вероятность одновременного отказа двух элементов равна нулю;
- 2) переключение на резервный элемент происходит мгновенно;
- 3) переключатель абсолютно надежен;
- 4) вероятность отказа элемента, находящегося в ненагруженном режиме, равна нулю.

Вероятность безотказной работы систем из двух элементов  $P(t)_c$  определяется по известным формулам [1]:

при постоянном резервировании как

$$P(t)_1 = 2e^{-\lambda t} - e^{-2\lambda t}, \quad (1)$$

а при резервировании замещения как

$$P(t)_2 = e^{-\lambda t}(1 + \lambda t). \quad (2)$$

Известно, что интенсивность отказов этих систем возрастает со временем эксплуатации от 0 до  $\lambda$ . Таким образом, резервированные системы из элементов нестареющего типа являются “старееющими” системами. Старение здесь проявляется в самой структуре резервирования систем. Поэтому такие системы обладают свойством профилактируемости.

Под профилакцией здесь будем понимать планируемые заранее с периодичностью  $\tau$  проверки работоспособности системы и при необходимости проведение профилактических замен (ПЗ) отказавших элементов.

Среднюю наработку на отказ при проведении профилактики систем определим из выражения [2]

$$T(\tau) = \int_0^{\tau} P(t) dt / (1 - P(\tau)), \quad (3)$$

где  $\tau$  – периодичность профилактики;

$P(t)$ ,  $P(\tau)$  - вероятность безотказной работы, соответственно, за период времени  $t$  и  $\tau$ .

Подставив значения вероятности безотказной работы из (1) и (2) в выражение (3) и проведя интегрирование, получим, соответственно, выражения для определения средних значений наработки на отказ систем: при постоянном резервировании как

$$T(\tau)_1 = \frac{T(1,5 - 2e^{-\lambda\tau} + 0,5e^{-2\lambda\tau})}{1 - 2e^{-\lambda\tau} + e^{-2\lambda\tau}}, \quad (4)$$

а при резервировании замещением как

$$T(\tau)_2 = \frac{T(2 - (2 + \lambda\tau) \cdot e^{-\lambda\tau})}{1 - (1 + \lambda\tau) \cdot e^{-\lambda\tau}}. \quad (5)$$



Приведем выражения (4) и (5) к безразмерному виду, разделив их на значение  $T$ :

$$T_1^* = \frac{1,5 - 2e^{-\lambda\tau} + 0,5e^{-2\lambda\tau}}{1 - 2e^{-\lambda\tau} + e^{-2\lambda\tau}}; \quad (4a)$$

$$T_2^* = \frac{2 - (2 + \lambda\tau) \cdot e^{-\lambda\tau}}{1 - (1 + \lambda\tau) \cdot e^{-\lambda\tau}}. \quad (5a)$$

Здесь значения  $T_1^*$  и  $T_2^*$  означают относительные повышения средней наработки на отказ резервированных систем при проведении их профилактики с периодичностью  $\tau$  по сравнению со случаем, когда резервирование и профилактика не проводятся. Очевидно, что значение  $T_1^*$  изменяется от бесконечности при  $\tau = 0$  до 1,5 при  $\tau \rightarrow \infty$ , а значение  $T_2^*$ , – соответственно, от бесконечности до 2.

С использованием выражений (4a) и (5a) проведены расчеты изменения значений  $T_1^*$  и  $T_2^*$  в зависимости от изменений значений  $\lambda\tau$ , которые сведены в таблицу 1, и представлены на рисунке 1, на котором верхняя кривая соответствует  $T_2^*(\lambda\tau)$ , а нижняя –  $T_1^*(\lambda\tau)$ .

Таблица 1

| $\lambda\tau$ | 0,1   | 0,2   | 0,3  | 0,4  | 0,5  | 0,6  | 0,7  | 0,8  | 0,9  | 1,0  |
|---------------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $T_1^*$       | 11,0  | 6,02  | 4,36 | 3,53 | 3,04 | 2,72 | 2,49 | 2,32 | 2,19 | 2,01 |
| $T_2^*$       | 21,34 | 11,34 | 8,02 | 6,36 | 5,36 | 4,70 | 4,23 | 3,88 | 3,61 | 3,39 |

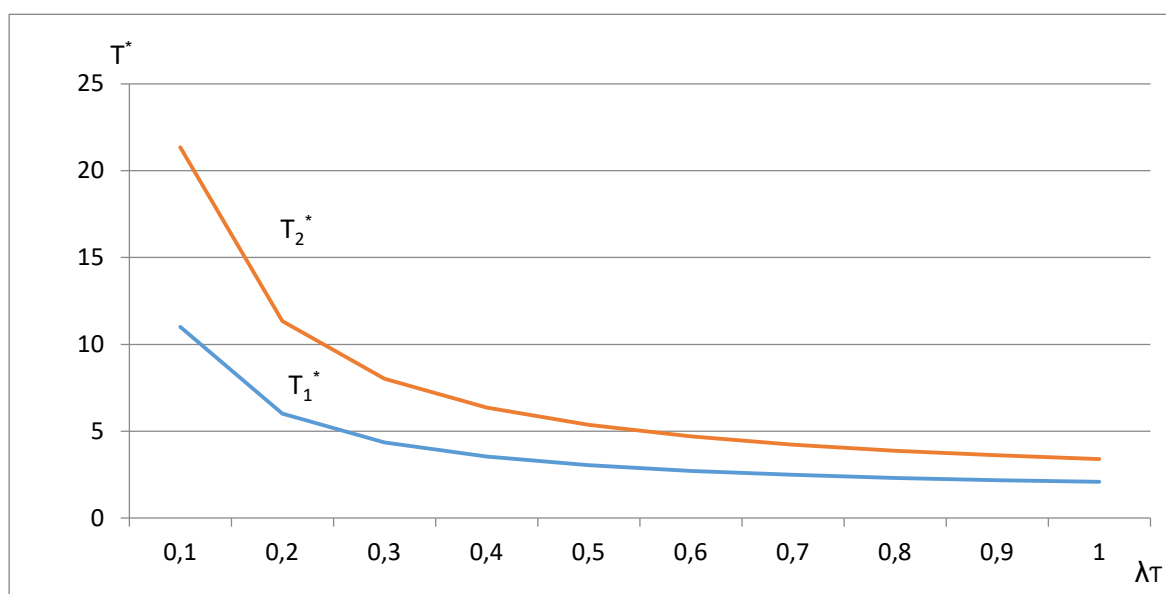


Рис 1. Изменение значений  $T_1^*$  и  $T_2^*$  от изменения  $\lambda\tau$

Как видно из рисунка 1 уже при профилактике с периодичностью  $\lambda\tau = 1$ , что означает  $\tau = T$  наработка на отказ системы при постоянном резервировании возрастает в два раза, а системы с резервированием замещением – почти в три с половиной раза, при  $\tau = 0,5T$ , соответственно, более чем в три раза и почти в пять с половиной раз, а при  $\tau = 0,1T$ , соответственно, в одиннадцать и в двадцать один раз. Отметим, что снижая периодичность профилактики, можно обеспечить сколь угодно большое заданное значение наработки на отказ резервированных систем из элементов нестареющего типа.

### Выводы

1. Профилактика резервированных систем из элементов нестареющего типа в виде периодических проверок работоспособности с заменой отказавших элементов является эффективным средством повышения их надежности.
2. Профилактика систем с резервированием элементов замещением эффективнее профилактики систем с постоянным резервированием элементов.
3. Варьируя периодичность профилактики, можно обеспечить необходимое заданное значение наработки на отказ резервированных систем из элементов нестареющего типа.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов Б. А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности. – М.: Советское радио, 1975. – 472 с.
2. Барлоу Р., Прошан Ф. Математическая теория надежности. - М.: Советское радио, 1969.- 488 с.

## О ВЛИЯНИИ НАДЕЖНОСТИ ПЕРЕКЛЮЧАТЕЛЯ НА НАДЕЖНОСТЬ РАБОТЫ ДУБЛИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ

*Изложен метод расчета показателей надежности дублированной системы в зависимости от надежности переключателя.*

Ключевые слова: система, элемент, переключатель, вероятность безотказной работы, интенсивность отказов.

Структурная схема переключателя представлена на рис. 1.

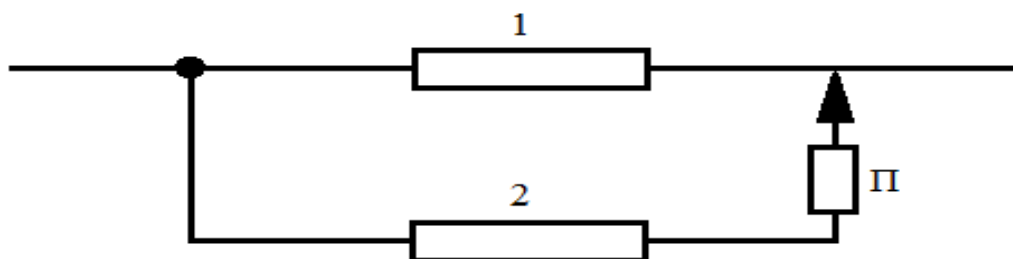


Рис. 1.

При отказе основного элемента 1 автоматически включается резервный элемент 2. Полагаем, что элемент, находящийся в резерве не отказывает, а вероятность безотказной работы переключателя ( $\Pi$ ) равна  $P_{\Pi}$ . При расчете показателей надежности системы в качестве исходных данных должны быть заданы вид и значения параметров законов распределения наработки на отказ ее элементов. Примем допущение, что элементы нестареющего типа, отказы которых описываются экспоненциальным распределением с постоянной интенсивностью отказов (ИО)  $\lambda = 1/T$ , где  $T$  – наработка элемента на отказ. Тогда вероятность безотказной работы (ВБР)  $P(t)$  за время эксплуатации  $t$  определяется по формуле

$$P(t) = \exp(-\lambda t). \quad (1)$$

Цель статьи – предложить формулы для расчета и построить зависимости показателей надежности системы от времени эксплуатации при разных значениях  $P_{\Pi}$ .

Вероятность безотказной работы дублированной системы с ненагруженным резервом и с переключателем определяется согласно [1] из выражения

$$P(t)_c = P(t) + P_n \int_0^t P(t - \tau) f(\tau) d\tau, \quad (2)$$

где  $P(t)$  – вероятность безотказной работы основного элемента за время  $t$ ;  
 $P(t - \tau)$  - вероятность безотказной работы резервного элемента в течение времени  $(t - \tau)$ ;

$f(\tau)$  – плотность распределения наработки на отказ основного элемента в момент времени  $\tau$ .

Формула (2) имеет простую вероятностную интерпретацию. Безотказность системы на интервале от 0 до  $t$  обеспечивается объединением двух событий: либо основной элемент работал безотказно на указанном интервале времени; либо основной элемент отказал в какой-то момент этого интервала, но резервный элемент, включившись в этот момент с вероятностью  $P_{\Pi}$ , работал безотказно на оставшемся отрезке времени до момента  $t$ . Когда для описания отказов элементов используется экспоненциальное распределение вида (1), имеем

$$P(t) = \exp(-\lambda t); \quad f(\tau) = \lambda \exp(-\lambda \tau); \quad P(t - \tau) = \exp(-\lambda(t - \tau)).$$

Подставив полученные значения  $P(t)$ ,  $P(t - \tau)$ ,  $f(\tau)$  в выражение (2) и проведя интегрирование, получим

$$P(t)_c = \exp(-\lambda t) (1 + P_{\Pi} \lambda t). \quad (3)$$

Частные случаи выражения (3):

при  $P_{\Pi} = 0$  (при каждом включении отказывает переключатель) имеем  $P(t)_c = \exp(-\lambda t)$ , то есть ВБР системы равна ВБР одного элемента (1);  
 при  $P_{\Pi} = 1$  (при абсолютно надежном переключателе) получим

$$P(t)_c = \exp(-\lambda t) (1 + \lambda t).$$

Интенсивность отказов системы определим из условия  $\lambda(t)_c = \frac{-[P(t)_c]'}{P(t)_c}$  как

$$\lambda(t)_c = \frac{P_{\Pi} \lambda^2 t - P_{\Pi} \lambda + \lambda}{1 + P_{\Pi} \lambda t}. \quad (4)$$

Частные случаи выражения (4):

при  $P_{\Pi} = 0$  имеем  $\lambda(t)_c = \lambda$ , то есть ИО системы такая же, как при отсутствии резервирования;

при  $P_{\Pi} = 1$  (при абсолютно надежном переключателе) получим

$$\lambda(t)_c = \lambda^2 t / (1 + \lambda t)$$

Из выражения (4) при  $t=0$  получим  $\lambda(t)_c = \lambda (1 - P_{\Pi})$ , в том числе при  $P_{\Pi} = 0$  имеем  $\lambda(t)_c = \lambda$  и при  $P_{\Pi} = 1 - \lambda(t)_c = 0$ , а при  $t \rightarrow \infty$  получим

$$\lambda(t)_c = \lambda.$$

Наработку системы на отказ определим из выражения

$$T_c = \int_0^{\infty} \exp(-\lambda t) (1 + P_n \lambda t) dt = (1 + P_n) / \lambda = (1 + P_n) T \quad (5)$$

Частные случаи выражения (5):

при  $P_n = 0$  имеем  $T_c = T$ , то есть наработка системы на отказ такая же, как при отсутствии резервирования;

при  $P_n = 1$  (при абсолютно надежном переключателе) получим  $T_c = 2T$ .

**Пример.** Нарботка на отказ силового трансформатора  $T = 7$  лет [2]. Тогда интенсивность отказов  $\lambda = 1/7 = 0,143$  1/год.

Необходимо определить зависимости показателей надежности от времени эксплуатации системы из двух трансформаторов с переключателем.

Результаты расчетов ВБР и ИО системы при разных значениях  $P_n$  по формулам (3) и (4) сведены в таблицы 1, 2 и 3.

Таблица 1.

**ВБР системы**

| $P_n t$ | 0   | 2     | 4     | 6     | 7     | 8     | 10    | 12    | 14    | 16    |
|---------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0       | 1,0 | 0,751 | 0,564 | 0,424 | 0,368 | 0,319 | 0,239 | 0,180 | 0,135 | 0,101 |
| 0,2     | 1,0 | 0,794 | 0,629 | 0,497 | 0,441 | 0,391 | 0,308 | 0,241 | 0,189 | 0,148 |
| 0,4     | 1,0 | 0,837 | 0,694 | 0,570 | 0,515 | 0,464 | 0,376 | 0,303 | 0,243 | 0,194 |
| 0,6     | 1,0 | 0,880 | 0,758 | 0,642 | 0,588 | 0,537 | 0,445 | 0,365 | 0,297 | 0,241 |
| 0,8     | 1,0 | 0,923 | 0,823 | 0,715 | 0,662 | 0,610 | 0,513 | 0,427 | 0,351 | 0,287 |
| 1,0     | 1,0 | 0,966 | 0,887 | 0,788 | 0,735 | 0,683 | 0,582 | 0,488 | 0,405 | 0,334 |

Таблица 2.

**ИО системы, 1/год**

| $P_n t$ | 0     | 2     | 4     | 6     | 7     | 8     | 10    | 12    | 14    | 16    |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 0,0     | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 | 0,143 |
| 0,2     | 0,114 | 0,116 | 0,117 | 0,118 | 0,119 | 0,120 | 0,121 | 0,122 | 0,123 | 0,124 |
| 0,4     | 0,086 | 0,092 | 0,097 | 0,100 | 0,102 | 0,104 | 0,107 | 0,109 | 0,111 | 0,113 |
| 0,6     | 0,057 | 0,070 | 0,079 | 0,086 | 0,089 | 0,092 | 0,097 | 0,101 | 0,104 | 0,107 |
| 0,8     | 0,029 | 0,050 | 0,065 | 0,075 | 0,080 | 0,083 | 0,090 | 0,095 | 0,099 | 0,103 |

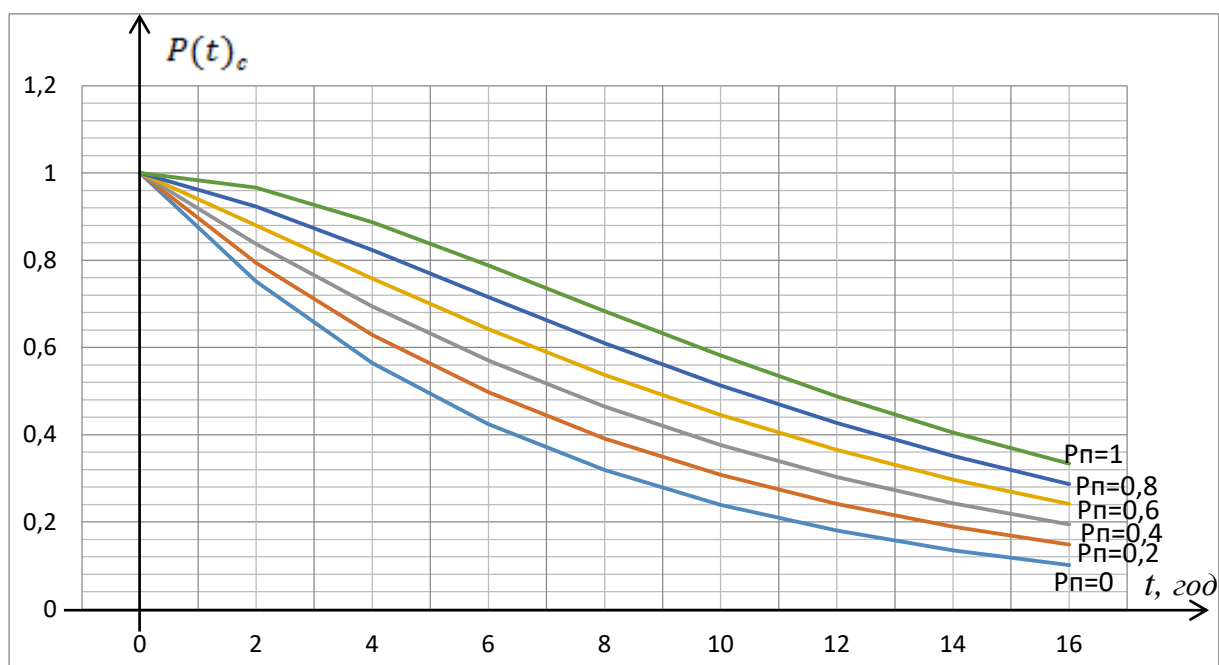
|     |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1,0 | 0,000 | 0,032 | 0,052 | 0,066 | 0,072 | 0,076 | 0,084 | 0,090 | 0,095 | 0,100 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|

Таблица 3.

**ВБР и ИО системы при  $t=T=7$  лет**

| $P_n$          | 0     | 0,2   | 0,4   | 0,6   | 0,8   | 1     |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $P(t)_c$       | 0,368 | 0,441 | 0,515 | 0,588 | 0,662 | 0,735 |
| $\lambda(t)_c$ | 0,143 | 0,119 | 0,102 | 0,090 | 0,080 | 0,072 |

Зависимости ВБР от времени эксплуатации представлены на рисунке 1, а ИО – на рисунке 2. Зависимости ВБР при  $t=T=7$  лет от изменения  $P_n$  представлены на рисунке 3, а ИО – на рисунке 4.



**Рис. 1. Зависимости ВБР системы от времени эксплуатации**

Как видно из результатов расчетов, представленных в таблицах 1 и 2, и кривых, представленных на рисунках 1 и 2, вероятность безотказной работы и интенсивность отказов системы существенным образом зависит от надежности работы переключателя.

Из выражения (3) и рисунка 3 видно, что с ростом вероятности безотказной работы переключателя вероятность безотказной работы системы возрастает линейно. Из выражения (4) и рисунка 4 видно, что с ростом вероятности безотказной работы переключателя интенсивность отказов системы снижается экспоненциально.

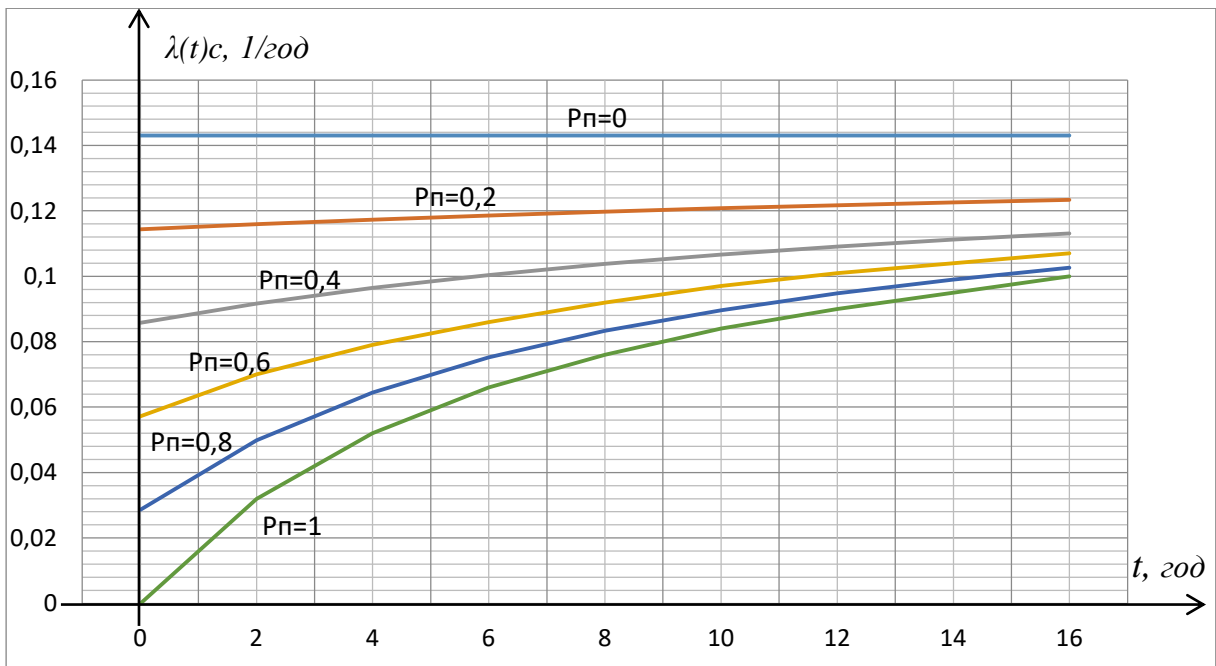


Рис. 2. Зависимости ИО системы от времени эксплуатации

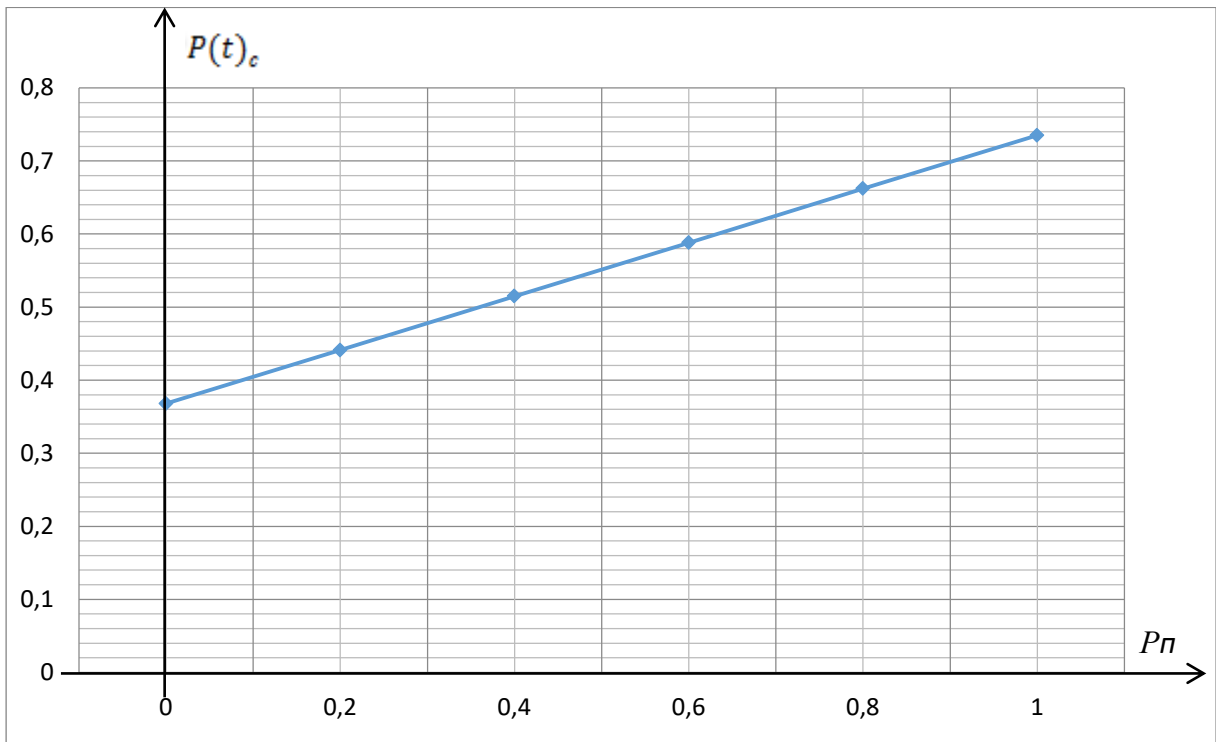


Рис. 3. Зависимость ВБР системы от значений  $P_{п}$

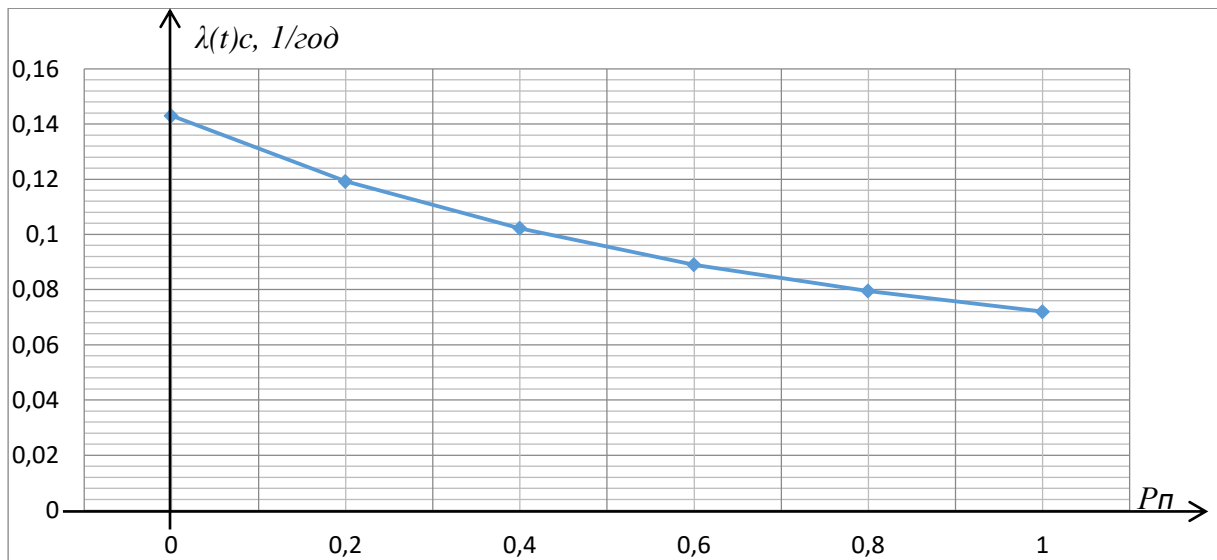


Рис. 4. Зависимость ИО системы от значений  $P_n$

Из выражения (5) видно, что с ростом вероятности безотказной работы переключателя от 0 до 1 наработка системы на отказ возрастает линейно от  $T$  до  $2T$ .

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Володарский В.А., Дударева Д.В. Расчет показателей надежности дублированной системы с переключателем // Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте: сб. науч. трудов. – Иркутск: ИрГУПС, 2013. Вып. 22. – С. 128-133.
2. Ефимов А.В., Галкин А.Г. Надёжность и диагностика систем электроснабжения.- М.: УМК МПС России, 2000.- 512 с.

УДК 621.3.019

В.А. Володарский, А.А. Ставер

### РАСЧЁТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМ ИЗ ЭЛЕМЕНТОВ НЕСТАРЕЮЩЕГО ТИПА

*Изложен метод расчета показателей надежности невосстанавливаемых и восстанавливаемых подсистем и систем при различных способах соединения элементов нестареющего типа. Приведены примеры расчетов.*

Ключевые слова: элемент, подсистема, система, резервирование, восстановление, наработка до отказа, интенсивность отказов, вероятность безотказной работы.



## 1. Исходные положения

Задача расчета состоит в том, чтобы определить показатели надежности системы, если известны показатели надежности составляющих ее элементов и характер связей между элементами. С точки зрения влияния отказов элементов на надежность система и ее подсистемы могут быть представлены различными структурными схемами соединения элементов.

Соединение элементов называется последовательным, если отказ хотя бы одного элемента приводит к отказу подсистемы или системы в целом. Резервированным соединением называется такое, при котором отказ системы наступает только при отказе основного и резервных элементов или подсистем.

В системах, как правило, применяется однократное резервирование, которое называется дублированием и может быть двух видов:

1) постоянным, когда основной и резервный элемент (подсистема) находятся в одинаковых условиях (нагруженном режиме) и одновременно выполняют одни и те же заданные функции. Такое соединение элементов (подсистем) называется параллельным;

2) замещением, когда отказавший основной элемент (подсистема) заменяется с помощью переключателя резервным, находящимся до этого в ненагруженном режиме, который начинает выполнять функции основного элемента (подсистемы).

При выводе формул для расчета надежности, которые представлены ниже, приняты следующие допущения [1,2]:

1) рассматриваются только внезапные отказы, когда наработка элементов до отказа описывается экспоненциальным законом распределения. В связи с этим под элементами нестареющего типа будем понимать такие, которые подвержены только внезапным отказам с постоянной интенсивностью отказов  $\lambda$ ;

2) время восстановления элементов описывается экспоненциальным законом распределения, и оно намного меньше наработки на отказ;

3) все отказы элементов независимы друг от друга, а вероятность одновременного отказа двух и более элементов практически равна нулю;

4) переключение на резервный элемент или подсистему происходит практически мгновенно;

5) вероятность отказа элемента или подсистемы, находящейся в ненагруженном режиме, равна нулю.

## 2. Расчет показателей надежности подсистемы

Структурная схема подсистемы из  $n = 10$  последовательно соединенных элементов представлена на рис. 1.

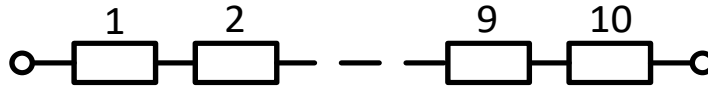


Рис. 1.

Показатели надежности подсистемы из невосстанавливаемых элементов согласно [1,2] определяются:

1) интенсивность отказов  $\lambda_{\text{пс}}$  по формуле

$$\lambda_{\text{пс}} = \sum_{i=1}^n \lambda_i = \sum_{i=1}^n \frac{1}{T_i}, \quad (1)$$

где  $\lambda_i$  – интенсивность отказов  $i$  – го элемента;

$T_i$  – наработка до отказа  $i$  – го элемента;

2) наработка до отказа  $T_{\text{пс}}$  по формуле

$$T_{\text{пс}} = \frac{1}{\lambda_{\text{пс}}}; \quad (2)$$

3) вероятность безотказной работы  $P(t)_{\text{пс}}$  за время эксплуатации  $t$  по формуле

$$P(t)_{\text{пс}} = e^{-\lambda_{\text{пс}} \cdot t}. \quad (3)$$

Показатели надежности подсистемы из восстанавливаемых элементов согласно [1,2] определяются:

1) интенсивность отказов, наработка на отказ и вероятность безотказной работы соответственно по формулам (1), (2) и (3);

2) среднее время восстановления  $T_{\text{впс}}$  по формуле

$$T_{\text{впс}} = T_{\text{пс}} \cdot \sum_{i=1}^n K_{\text{п}i}, \quad (4)$$

где  $K_{\text{п}i}$  – коэффициент простоя  $i$  – го элемента.

$$K_{\text{п}i} = \frac{T_{\text{в}i}}{T_i + T_{\text{в}i}},$$

где  $T_{\text{в}i}$  – время восстановления  $i$  – го элемента.

При  $T_{\text{в}i} \ll T_i K_{\text{п}i} = \frac{T_{\text{в}i}}{T_i};$

3) коэффициенты готовности  $K_{\text{гпс}}$  и простоя  $K_{\text{ппс}}$  подсистемы соответственно по формулам:

$$K_{\text{гпс}} = \frac{T_{\text{пс}}}{T_{\text{пс}} + T_{\text{впс}}}; \quad (5)$$

$$K_{\text{ппс}} = \frac{T_{\text{впс}}}{T_{\text{пс}} + T_{\text{впс}}}. \quad (6)$$

### 3. Расчёт показателей надёжности систем

Структурная схема системы, состоящей из основной и такой же резервной подсистемы, находящейся в нагруженном режиме, представлена на рисунке 2.

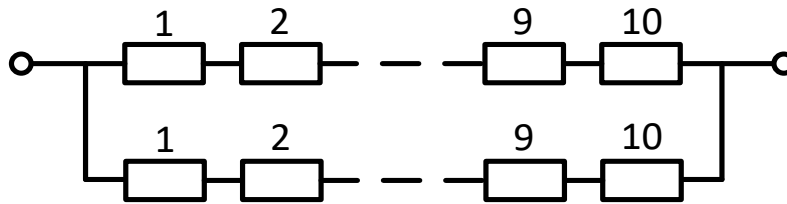


Рис.2.

3.1. Показатели надёжности системы (см. рис. 2), когда восстановление подсистем при их отказе не производится, согласно [1,2] определяются:

1) наработка до отказа  $T_c$  по формуле

$$T_c = \frac{1,5}{\lambda_{\text{пс}}}; \quad (7)$$

2) вероятность безотказной работы  $P(t)_c$  по формуле

$$P(t)_c = 2 \cdot e^{-\lambda_{\text{пс}} \cdot t} - e^{-2 \cdot \lambda_{\text{пс}} \cdot t}; \quad (8)$$

3) интенсивность отказов  $\lambda(t)_c$  по формуле

$$\lambda(t)_c = \frac{2 \cdot \lambda_{\text{пс}} \cdot (1 - e^{-\lambda_{\text{пс}} \cdot t})}{2 - e^{-\lambda_{\text{пс}} \cdot t}}. \quad (9)$$

Структурная схема системы, состоящей из основной **1** и такой же резервной подсистемы **2**, находящейся в ненагруженном режиме, с переключателем **П** представлена на рисунке 3.

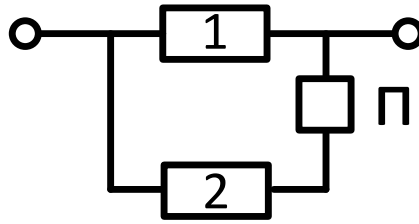


Рис.3.

3.2. Показатели надежности системы (см. рис. 3) с абсолютно надежным переключателем, когда восстановление подсистем при их отказе не производится, согласно [1,2] определяются:

1) наработка системы до отказа  $T_c$  по формуле

$$T_c = \frac{2}{\lambda_{пс}} ; \quad (10)$$

2) вероятность безотказной работы  $P(t)_c$  по формуле

$$P(t)_c = e^{-\lambda_{пс} \cdot t} \cdot (1 + \lambda_{пс} \cdot t); \quad (11)$$

3) интенсивность отказов  $\lambda(t)_c$  по формуле

$$\lambda(t)_c = \frac{\lambda_{пс}^2 \cdot t}{1 + \lambda_{пс} \cdot t} \quad (12)$$

3.3. Показатели надежности системы (см. рис. 3) с ненадежным переключателем, когда восстановление подсистем при их отказе не производится, согласно [2] определяются:

1) наработка системы до отказа  $T_c$  по формуле

$$T_c = \frac{2 - q}{\lambda_{пс}}, \quad (10a)$$

где  $q$  – вероятность отказа переключателя.

Частные случаи выражения (10а):

при  $q = 0$ , когда переключатель абсолютно надежен, получим формулу (10);;

при  $q = 1$ , когда переключатель абсолютно ненадежен, получим формулу (2);:

2) вероятность безотказной работы  $P(t)_c$  по формуле

$$P(t)_c = e^{-\lambda_{пс} \cdot t} \cdot (1 + (1 - q)\lambda_{пс} \cdot t) . \quad (11a)$$

Частные случаи выражения (11a):

при  $q = 0$ , когда переключатель абсолютно надежен, получим формулу (11);:

при  $q = 1$ , когда переключатель абсолютно ненадежен, получим формулу (3).

3.4. Показатели надежности системы (см. рис. 3) с абсолютно надежным переключателем, когда восстановление подсистем при их отказе производится, согласно [1,2] определяются:

1) наработка системы на отказ  $T_c$  по формуле

$$T_c = T_{пс} \cdot \left( 2 + \frac{1}{K_{ппс}} \right) ; \quad (13)$$

2) среднее время восстановления системы  $T_{вс}$  по формуле

$$T_{вс} = \frac{T_{впс}}{2} . \quad (14)$$

3.5. Показатели надежности системы (см. рис. 3) с ненадежным переключателем, когда восстановление подсистем при их отказе производится, согласно [1,2] определяются:

1) наработка на отказ  $T_c$  по формуле

$$T_c = \frac{T_{пс}}{K_{ппс} + q} \quad (15)$$

2) вероятность безотказной работы  $P(t)_c$  по формуле

$$P(t)_c = e^{-\lambda_{\text{пс}} \cdot (K_{\text{пс}} + q) \cdot t}. \quad (16)$$

#### 4. Примеры расчетов

Проведены расчеты показателей надежности подсистемы и систем по формулам, изложенным в разделах 2 и 3. При вычислениях использована программа Mathcad[3]. Исходные данные о наработке до отказа и времени восстановления элементов представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

| $i$   | Наработка до отказа $i$ -го элемента, час |      |      |      |      |     |     |      |      |      |
|-------|---|------|------|------|------|-----|-----|------|------|------|
|       | 1   | 2    | 3    | 4    | 5    | 6   | 7   | 8    | 9    | 10   |
| $T_i$ | 1700                                      | 1800 | 1900 | 2000 | 2100 | 800 | 900 | 1000 | 1100 | 1200 |

Таблица 2

| $i$             | Время восстановления $i$ -го элемента, час |   |     |   |     |   |   |   |   |    |
|-----------------|--|---|-----|---|-----|---|---|---|---|----|
|                 | 1  | 2 | 3   | 4 | 5   | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| $T_{\text{в}i}$ | 6,5  | 7 | 7,5 | 8 | 8,5 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8  |

**Пример 1.** Определим показатели надежности подсистемы из последовательно соединенных невосстанавливаемых элементов.

1. Интенсивность отказов согласно выражению (1) равна  $\lambda_{\text{пс}} = 7,75 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}}$ . Как видно из полученных результатов при последовательном соединении элементов нестареющего типа сохраняется экспоненциальный закон распределения. (см. рис. 5, прямая 1).

2. Нарботка до отказа согласно выражению (2) равна  $T_{\text{пс}} = 129,0$  час. Из сопоставления полученных данных расчета и данных, представленных в таблице 1 видно, что наработка до отказа подсистемы в 6,2 раза меньше, чем наработка до отказа самого ненадежного элемента номер 6.

3. Зависимость вероятности безотказной работы подсистемы  $P(t)_{\text{пс}}$  от времени эксплуатации, определенная согласно выражения (3), представлена на рисунке 4, кривая 1. Так как подсистема состоит из элементов нестареющего типа и является нестареющей, то кривая зависимости вероятности безотказной работы от времени ее эксплуатации имеет форму выпуклую вниз. Например, при  $t = 100$  час  $P(t)_{\text{пс}} = 0,46$ .

**Пример 2.** Определим показатели надежности подсистемы из последовательно соединенных восстанавливаемых элементов.

1. Среднее время восстановления подсистемы согласно выражению (4) равно  $T_{\text{впс}} = 6,36$  час.

2. Коэффициент готовности подсистемы согласно выражению (5) равен  $K_{гпс} = 0,953$ , а коэффициент простоя согласно выражению (6) -  $K_{гпс} = 0,047$ .

**Пример 3.** Определим показатели надежности системы, состоящей из основной и резервной подсистемы, находящейся в нагруженном режиме, когда восстановление подсистем при их отказе не производится.

1. Нарботка системы до отказа согласно выражению (7) равна  $T_c = 193,5$  час.

2. Зависимость вероятности безотказной работы системы  $P(t)_c$  от времени эксплуатации, определенная согласно выражению (8), представлена на рисунке 4, кривая 2. Например, при  $t = 100$  час  $P(t)_c = 0,71$ , что в 1,54 раза больше, чем при отсутствии резервирования.

3. Зависимость интенсивность отказов системы  $\lambda(t)_c$  от времени эксплуатации, определенная согласно выражению (9), представлена на рисунке 5, кривая 2. Как видно из полученных результатов при параллельном соединении подсистем нестареющего типа не сохраняется экспоненциальный закон распределения.

Анализ зависимостей, представленных на рисунках 4 и 5, показывает следующее. В первых, кривая  $P(t)_c$  сначала выпукла вверх, а затем вниз. Во вторых, интенсивность отказов системы возрастает от нуля и стремится со временем эксплуатации к интенсивности отказов подсистемы. Это означает, что резервированная система, состоящая из элементов нестареющего типа, является стареющей. Причем со временем стареет сама структура резервированной системы.

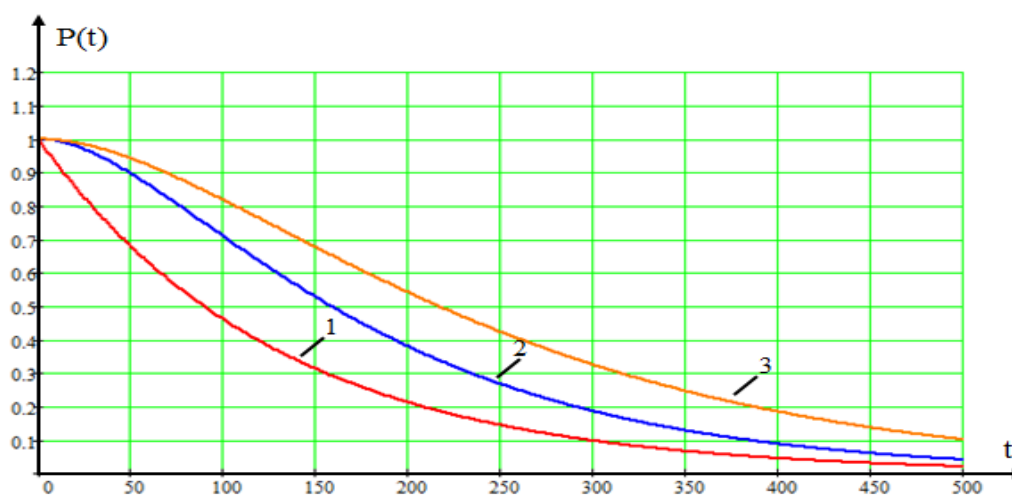


Рис. 4

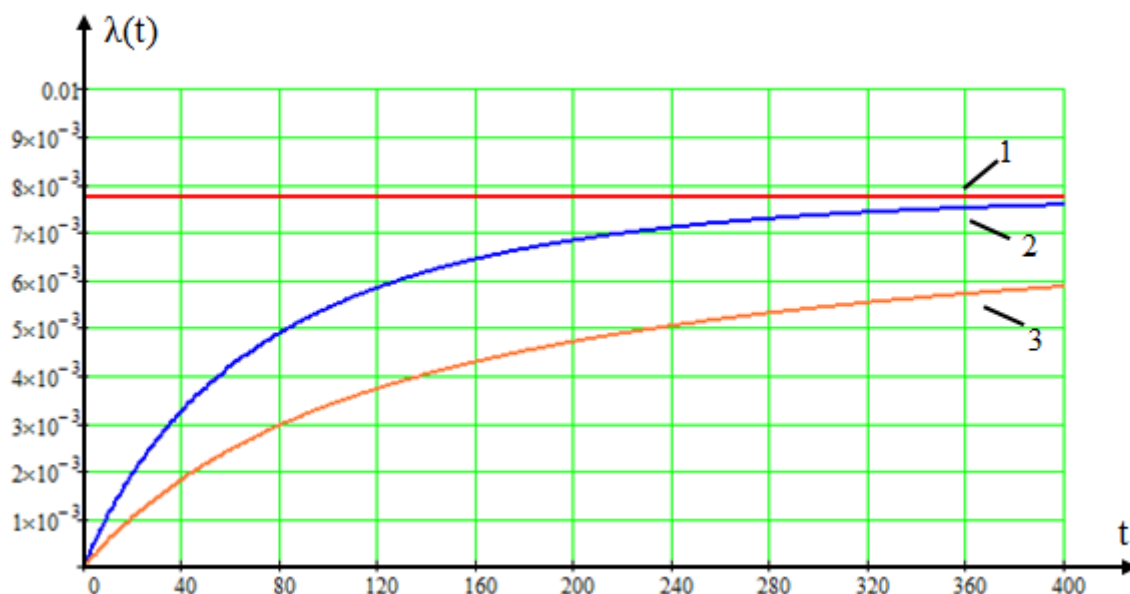


Рис. 5

**Пример 4.** Определим показатели надежности системы, состоящей из основной и резервной подсистемы, находящейся в ненагруженном режиме абсолютно надежным переключателем, когда восстановление подсистем при их отказе не производится.

1. Нарботка системы до отказа согласно выражению (10) равна  $T_c = 258,0$  час.

2. Зависимость вероятности безотказной работы системы  $P(t)_c$  от времени эксплуатации, определенная согласно выражению (11), представлена на рисунке 4, кривая 3. Например, при  $t = 100$  час  $P(t)_c = 0,82$ , что в 1,78 раза больше, чем при отсутствии резервирования.

3. Зависимость интенсивности отказов системы  $\lambda(t)_c$  от времени эксплуатации, определенная согласно выражению (12), представлена на рисунке 5, кривая 3. Как видно из полученных результатов при резервировании замещением подсистем нестареющего типа не сохраняется экспоненциальный закон распределения.

Анализ зависимостей, представленных на рисунках 4 и 5, показывает следующее. В первых, кривая  $P(t)_c$  сначала выпукла вверх, а затем вниз. Во вторых, интенсивность отказов системы возрастает от нуля и стремится со временем эксплуатации к интенсивности отказов подсистемы. Это означает, что резервированная система, состоящая из элементов нестареющего типа, является стареющей. Причем со временем стареет сама структура резервированной системы.

Из сопоставления зависимостей, представленных на рисунке 4 (кривые 2 и 3), видно, что кривая  $P(t)_c$  системы при ненагруженном резерве проходит выше, чем при нагруженном резерве. А из сопоставления зависимостей, представленных на рисунке 5 (кривые 2 и 3), видно, что кри-



вая интенсивности отказов системы с ненагруженным резервом от времени эксплуатации проходит ниже, чем системы с нагруженным резервом. Кроме того наработка до отказа системы с ненагруженным резервом в 1,33 раза больше. Это означает, что по всем показателям система, состоящей из основной и резервной подсистемы, находящейся в ненагруженном режиме абсолютно надежным переключателем, более надежна, чем система с резервной подсистемой, находящейся в нагруженном режиме.

**Пример 5.** Определим показатели надежности системы, состоящей из основной и резервной подсистемы, находящейся в ненагруженном режиме абсолютно надежным переключателем, когда восстановление подсистем при их отказе производится.

1. Нарботка системы на отказ согласно выражению (13) равна  $T_c = 3005$  час. Как видно из результатов расчетов, представленных в примерах 4 и 5, за счет восстановления подсистем при их отказе наработка системы на отказ возрастает в 11,6 раза.

2. Среднее время восстановления системы согласно выражению (14) снижено в два раза и равно  $T_{вс} = 3,18$  час.

**Пример 6.** Определим показатели надежности системы, состоящей из основной и резервной подсистемы, находящейся в ненагруженном режиме ненадежным переключателем, когда восстановление подсистем при их отказе производится.

1. Нарботка системы на отказ согласно выражению (15) при  $q = 0,1$  равна  $T_c = 877,9$  час. Как видно из результатов расчетов, представленных в примерах 5 и 6, при учете вероятности отказа переключателя наработка системы на отказ в этом случае снижается в 3,4 раза.

2. Как видно из выражения (16) значение вероятности безотказной работы системы с восстановлением подсистем существенно образом зависит от вероятности отказа переключателя  $q$ . Для примера на рисунке 6 представлены зависимости вероятности безотказной работы системы от времени эксплуатации: при  $q = 0$  (кривая 1); при  $q = 0,1$  (кривая 2); при  $q = 0,2$  (кривая 3); при  $q = 0,3$  (кривая 4). Здесь же для сравнения представлена определенная согласно выражению (11) зависимость вероятности безотказной работы системы от времени эксплуатации, когда восстановление подсистем не проводится (см. кривая 5).

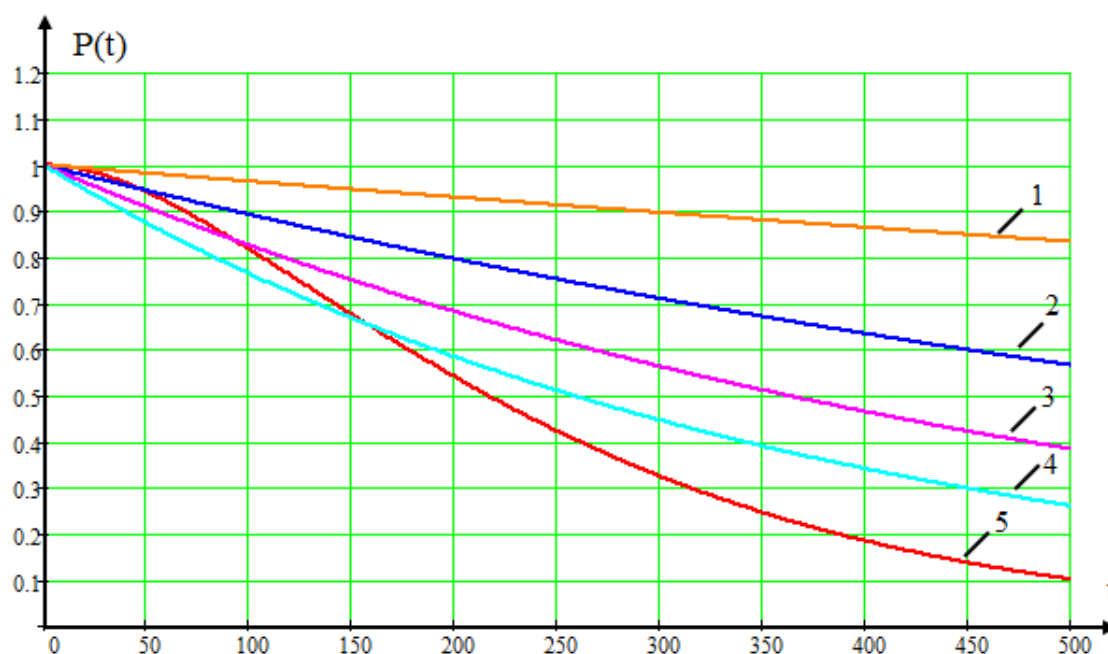


Рис. 6.

Как видно из рис. 6 в начальный период эксплуатации вероятность безотказной работы системы с восстановлением подсистем при вероятности отказа переключателя более нуля может быть ниже вероятности безотказной работы системы без восстановления подсистем. Например, для времени эксплуатации 100 час имеем: при  $q = 0,1 P(t)_c = 0,89$ ; при  $q = 0,2 P(t)_c = 0,83$ , что сопоставимо с вероятностью безотказной работы системы при отсутствии восстановления, равной 0,82 (см. пример 4); при  $q = 0,3 P(t)_c = 0,76$ , что уже ниже значения вероятности безотказной работы системы при отсутствии восстановления. В дальнейший период эксплуатации вероятность безотказной работы системы с восстановлением подсистем всегда выше вероятности безотказной работы системы без восстановления подсистем.

### Выводы

1. Выполненные исследования показали, что резервирование элементов (подсистем) не приводит к заметному повышению надежности систем. В примере 4 показано, что при ненагруженном резерве и абсолютно надежном переключателе наработка системы до отказа не может быть увеличена более чем в два раза.
2. Существенное повышение надежности систем может быть достигнуто только совместным применением резервирования и восстановления отказавших элементов (подсистем). В примере 5 показано, что наработка системы на отказ с ненагруженным и

- восстанавливаемым резервом при абсолютно надежном переключателе может быть увеличена более чем на порядок.
3. Заметное влияние на надежность работы систем оказывает вероятность отказа переключателя. В примере 6 показано, что с ростом вероятности отказа переключателя снижается как наработка на отказ, так и вероятность безотказной работы системы.
  4. Поскольку при введении резервирования интенсивность отказов систем со временем эксплуатации возрастает, появляется возможность проведения профилактических проверок работоспособности и замен отказавших в процессе эксплуатации элементов (подсистем).

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Козлов Б.А., Ушаков И.А. Справочник по расчету надежности аппаратуры радиоэлектроники и автоматики. – М.: Советское радио, 1975. - 472 с.
2. Володарский В.А. Основы теории надежности: Методические указания по выполнению курсовой работы. – Красноярск: КРИЖТ ИрГУПС, 2014. – 38 с.
3. Расчётно - вычислительная программа Mathcad, версия 14.

УДК 629.1

*В.С. Марюхнеко, Т. Золбоо*

### **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ НА БЕЗОПАСНОСТЬ И СВОЕВРЕМЕННОСТЬ ПЕРЕВОЗОК НА УЛАН-БАТОРСКОЙ ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ**

*Выполнен анализ транспортных перевозок Монголии, на основании которого сделан вывод о слабом звене в проблеме надежности устройств автоматики и телемеханики Улан-Баторской железной дороги. Таким звеном является кабельное хозяйство. Предложено для решения проблемы повышения надежности станционных устройств и систем автоматики и телемеханики применить дублирующий радиоканал для связи между удаленными объектами.*

*Ключевые слова: автоматика и телемеханика, системы, устройства, надежность, радиоканал*

Природные и трудовые ресурсы Монголии распределены по её территории крайне неравномерно. Поэтому для успешного развития промышленности, энергетики и сельского хозяйства неизбежен процесс постоянного перемещения людей, сырья и продукции между различными регионами страны. Эту проблему решает единая транспортная система страны, включающая железнодорожный, автомобильный, морской, речной

и воздушный виды транспорта. Главная задача транспортной системы – обеспечение пассажирских и грузовых перевозок с высоким качеством: соблюдение сроков, безопасность для жизни и здоровья пассажиров и сохранность свойств перевозимой продукции.

В Монголии основным видом транспорта перевозочных процессов является железная дорога (табл.1) [1].

Качество перевозочного процесса на железнодорожном транспорте определяется быстротой и безопасностью доставки грузов и пассажиров к месту назначения. Из табл.1 следует, что в дорожно-транспортной сфере Монголии доминирующую позицию занимают 2 вида транспорта: автомобильный и железнодорожный.

Объем авиационных перевозок грузов низкий и малозначащий в масштабах страны. Авиационные перевозки пассажиров составляют существенную (около одной трети) часть перевозок, но уступают и железнодорожному, и автомобильному.

Причины востребованности автомобильного транспорта связаны экономическими факторами, - за последние годы правительством страны приняты меры по строительству и ремонту автомобильных дорог государственного значения в больших городах и регионах.

На схеме рис. 1 показано влияние различных факторов и их составляющих на безопасность железнодорожной транспортной системы. Безопасность перевозок оценивается вероятностью  $P(A)$  такого события  $A$ , которое состоит в отсутствии за расчетное время перевозки

$$T_{\Pi} = t_k - t_n,$$

где  $t_n$  и  $t_k$  – соответственно моменты начала и окончания перевозки, чрезвычайной ситуации, в результате которой произошло повреждение техники и/или нанесен ущерб здоровью пассажиров.

Таблица 1.

#### Годовые итоги транспортных перевозок Монголии

| Виды транспорта                            | 2012г   | 2013г   | 2014г   | Объем перевозки в транспорте, % |       |       |
|--|---------|---------|---------|---------------------------------|-------|-------|
|  |         |         |         | 2012г                           | 2013г | 2014г |
| Оборот груза, млн.тн.км                    |         |         |         |                                 |       |       |
| Железная дорога                            | 12142,7 | 12143,2 | 12416,3 | 73,1                            | 73,1  | 63,0  |
| Автотранспорт                              | 4461,0  | 4314,0  | 7274,0  | 26,9                            | 26,2  | 36,8  |
| Воздушные                                  | 9,7     | 9,6     | 9,4     | 0,1                             | 0,1   | 0,1   |
| Всего                                      | 16613,4 | 16466,8 | 19699,7 | 100,0                           | 100,0 | 100,0 |
| Оборот пассажирских перевозок, млн.пасс.км |         |         |         |                                 |       |       |
| Железная дорога                            | 1485,40 | 1404,20 | 1196,70 | 29,9                            | 30,3  | 22,1  |
| Автотранспорт                              | 2263,10 | 1941,90 | 2965,30 | 45,5                            | 41,9  | 54,9  |
| Воздушные                                  | 1223,10 | 1289,37 | 1236,01 | 24,6                            | 27,8  | 23,0  |
| Всего                                      | 4971,60 | 4635,47 | 5398,01 | 100,0                           | 100,0 | 100,0 |

В течение времени перевозки  $T_{\Pi}$  необходимо обеспечить  $P(A) > P_{\text{зад}}$ . Это может быть достигнуто:

- высокой надежностью технических средств обеспечения движения транспорта;

- нейтрализаций вредного действия проявлений человеческого фактора;

- безопасностью перевозимого груза.

Безопасность транспортных перевозок, при которых произошло  $M$



Рис. 1. Схема влияния факторов на безопасность

нарушений, приведших к особым (опасным) ситуациям можно оценить показателем

$$S_6 = M T_{\Pi}$$

Очевидно что минимизация коэффициента приведет автоматически к достижению максимума вероятностью  $P(A)$  [2].

Из перечисленных факторов технические факторы имеют существенный и решающее

значение. Поэтому надежность работы технических систем обеспечивает безопасность перевозки.

Техническими (аппаратными) средствами обеспечения безопасности железнодорожного транспорта понимаются устройства локомотивного, вагонного хозяйства и устройства автоматики и телемеханики.

К железнодорожной автоматике и телемеханике относятся устройства и системы:

- а) автоматическая блокировка;
- б) диспетчерская централизация;
- в) диспетчерский контроль;
- г) автоматическая переездная сигнализация;
- д) системы контроля подвижного состава на ходу поезда.

В системы и устройства автоматики и телемеханики структурно состоят, как правило, из напольного оборудования и постового оборудования. К напольным устройствам автоматики и телемеханики относятся стрелочные электроприводы, светофоры, датчики и контрольные реле рельсо-вых цепей.

Напольные устройства связаны с объектами управления и с постовым оборудованием посредством разветвленных кабельных сетей.

Напольное оборудование подвергается наибольшим влияниям внешней среды, и его условия функционирования близки к экстремальным. Это

колебания температуры в широком диапазоне, изменение влажности, вибрации, переходные процессы в цепях коммутации, влияние наводок от внешних источников. Перечисленные факторы создают условия к возникновению отказов.

Постовое оборудование имеет некоторую защищенность от вредных факторов внешней среды, но в зависимости от размещения, она (защищенность) может быть неполной, что также приводит к отказам.

Отказы устройств автоматики и телемеханики могут привести к задержке поезда или и даже более серьезным последствиям (рис. 2). К таким отказам относятся прежде всего отказы кабельных линий. Вследствие их отказов время восстановления бывает достаточно большими. Одним из наиболее опасных отказов связанных с неисправностью кабелей являются отказы вызванные сообщением различных цепей или заземления этих цепей [3]. Самопроизвольное появление тока в цепи может вызвать любой опасный отказ: появление разрешающего сигнала, перевод стрелки под составом, ложный контроль стрелок или свободности рельсовой цепи, а это уже прямая угроза безопасности движения поездов.

В табл. 2, 3, 4, 5 [3, 4] показано распределение отказов устройств автоматики и телемеханики и времени восстановления отказов Улан-Баторской железной дороге.

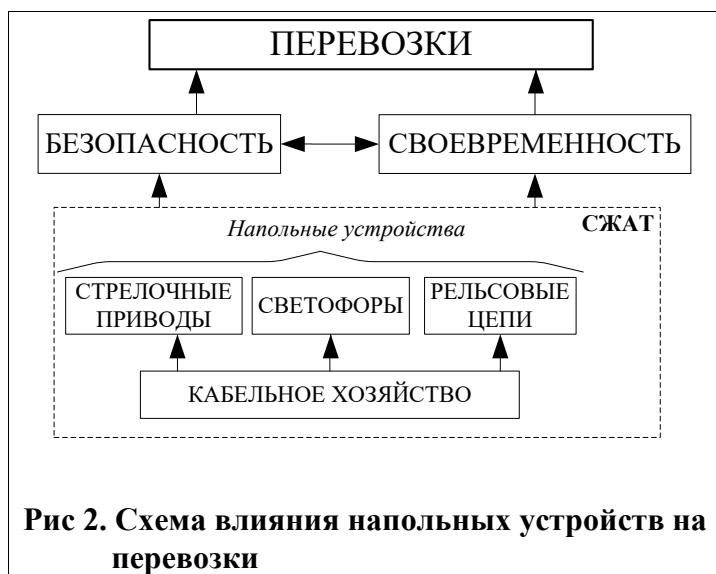


Таблица 2.  
Распределение отказов по дистанциям

| Дистанция | Аппарат | Воздушная линия связи | РЦ | МП | Кабель | Стрелка | Светофор | Питание | Чел. фактор | Всего |
|-----------|---------|-----------------------|----|----|--------|---------|----------|---------|-------------|-------|
| ШЧ-1      | 23      | 16                    | 12 | 0  | 16     | 25      | 47       | 39      | 2           | 180   |
| ШЧ-2      | 42      | 20                    | 22 | 0  | 17     | 42      | 77       | 54      | 3           | 277   |
| ШЧ-3      | 30      | 12                    | 34 | 2  | 16     | 31      | 100      | 63      | 1           | 289   |
| Всего     | 95      | 48                    | 68 | 2  | 49     | 98      | 224      | 156     | 6           | 746   |

Таблица 3.

**Распределение отказов по годам**

| Дата  | Аппарат | Воздушная линия связи | РЦ | МП | Кабель | Стрелка | Светофор | Питание | Чел.фактор | Всего |
|-------|---------|-----------------------|----|----|--------|---------|----------|---------|------------|-------|
| 2005  | 14      | 12                    | 11 | 0  | 7      | 18      | 26       | 15      | 2          | 105   |
| 2006  | 11      | 5                     | 9  | 0  | 12     | 13      | 34       | 20      | 1          | 105   |
| 2007  | 18      | 6                     | 7  | 0  | 5      | 8       | 39       | 7       | 1          | 91    |
| 2008  | 9       | 6                     | 6  | 0  | 6      | 9       | 31       | 16      | 1          | 84    |
| 2009  | 15      | 5                     | 8  | 0  | 4      | 7       | 16       | 13      | 0          | 68    |
| 2010  | 4       | 3                     | 5  | 0  | 2      | 14      | 6        | 11      | 1          | 46    |
| 2011  | 11      | 3                     | 1  | 0  | 5      | 5       | 13       | 14      | 0          | 52    |
| 2012  | 5       | 3                     | 5  | 0  | 1      | 6       | 16       | 13      | 0          | 49    |
| 2013  | 6       | 1                     | 3  | 0  | 3      | 9       | 17       | 17      | 0          | 56    |
| 2014  | 0       | 1                     | 6  | 1  | 2      | 4       | 10       | 17      | 0          | 41    |
| 2015  | 2       | 3                     | 7  | 1  | 2      | 5       | 16       | 13      | 0          | 49    |
| Всего | 95      | 48                    | 68 | 2  | 49     | 98      | 224      | 156     | 6          | 746   |

Из табл. 2 следует, что основное количество отказов приходит на дистанции ШЧ-2 и ШЧ-3. Служба Ш Улан-Баторской железной дороги сделала много работ по устранению и дальнейшего не проявления повторных отказов, и результат можно увидеть с таблицы 3, где количество отказов с каждым годом уменьшается. Одним из работ по исключению отказов, это замена светофорных ламп на диоды с 2009г.

Таблица 4.

**Распределение задержек поездов (час)**

| Дистанция | Аппарат | Воздушная линия связи | РЦ   | МПЦ  | Кабель | Стрелка | Светофор | Питание | Человеческий фактор | Всего  |
|-----------|---------|-----------------------|------|------|--------|---------|----------|---------|---------------------|--------|
| ШЧ-1      | 9,3     | 6,95                  | 3,3  | 0    | 6,02   | 13,5    | 9,98     | 15,72   | 0,82                | 65,59  |
| ШЧ-2      | 18,9    | 4,6                   | 8,6  | 0    | 4,75   | 14,2    | 15,96    | 20,68   | 1,28                | 88,97  |
| ШЧ-3      | 12,9    | 9,83                  | 13,8 | 1,13 | 2,96   | 14,65   | 17,16    | 22,76   | 0,28                | 95,47  |
| Всего     | 41,1    | 21,38                 | 25,7 | 1,13 | 13,73  | 42,35   | 43,1     | 59,16   | 2,38                | 250,03 |

Таблица 5.

**Распределение времени восстановления отказов (час).**

| Дистанция | Аппарат | Воздушная линия связи | РЦ    | МПЦ  | Кабель | Стрелка | Светофор | Питание | Человеческий фактор | Всего  |
|-----------|---------|-----------------------|-------|------|--------|---------|----------|---------|---------------------|--------|
| ШЧ-1      | 31.36   | 12.53                 | 7     | 0    | 71.16  | 26.45   | 27.4     | 42.08   | 0.82                | 218.8  |
| ШЧ-2      | 55.78   | 13.98                 | 17.13 | 0    | 89.98  | 22.67   | 26.58    | 36.1    | 1.28                | 263.5  |
| ШЧ-3      | 24.07   | 14.92                 | 29    | 5.62 | 80.23  | 16.63   | 37.68    | 50.68   | 0.28                | 259.11 |
| Всего     | 111.21  | 41.43                 | 53.13 | 5.62 | 241.37 | 65.75   | 91.66    | 128.86  | 2.38                | 741.41 |

Анализ данных табл. 4 показывает, что основное время задержки поездов занимает аппаратура автоблокировки, стрелки, светофоры и электропитания. А из табл. 5 видно, что большая часть времени занимает на восстановление отказов связанных с кабельным хозяйством. Это значит, что отказы кабельного хозяйства являются наиболее опасным. Отказы кабеля могут произойти по следующим причинам:

1. *Старение кабеля.* Кабели проложены в грунте. Поэтому подвержены естественному старению, под которым понимается постоянное необратимое изменение электрических и механических характеристик кабеля с течением времени.

2. *Климатические условия.* Во время прокладки или монтажа, кабель минимум дважды подвергают изгибу: один раз при прокладке, а другой во время монтажа при выкладке концов кабеля по форме котлована. Растягивающее воздействие испытывает подземный кабель при изменении температуры почвы. При низкой температуре существенно изменяются свойства многих изоляционных материалов, пластмассы теряют ударную вязкость и прочность на растяжение, что уменьшает надёжность покрытия. С повышением температуры снижается сопротивление изоляции жил кабеля постоянному току, увеличивается сопротивление жил.

3. *Внешние факторы.* Кабельное хозяйство СЦБ является наиболее уязвимым местом для внешних повреждений. Кабельные групповые муфты, путевые коробки, в которых разделяются и соединяются кабель, расположены в междупутьях станции. Поэтому нередко подвергаются повреждению при производстве земляных работ на станции различными сторонними организациями, работе путевых машин при ремонте пути.

**Выводы.** Выполненный анализ транспортных перевозок Монголии позволяет утверждать:

1. Железная дорога является основным видом транспорта, влияющая на экономику Монголии и дальнейшее её развитие.

2. Основным фактором в нарушении безопасности перевозок является



технический фактор, а именно, отказы устройств автоматики и телемеханики.

3. По данным отказов устройств автоматики и телемеханики Улан-Баторской железной дороги сделан вывод, что самым слабым звеном в цепи надежности этих устройств- является кабельное хозяйство.

4. Поэтому для решения проблемы повышения надежности стационарных устройств и систем автоматики и телемеханики предлагается для связи с удаленными объектами применить радиоканал.

5. Для отработки технологии создания и применения внутрисистемных радиоканалов в устройствах автоматики и телемеханики на первых порах ограничиться дублированием радиоканалами существующих кабельных соединений.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Диспетчеры службы Ш, АО “Улан-Баторская железная дорога”. Ежемесячный отчет работы, с 2005г. по 2015г.; Улан-Батор, 2016.

2. *Арслан Ц., Ундармаа Д.* Годовой отчет АО “УБЖД” 2014 года, центр технической политики, проектирование и исследования / Под ред. С.Ууганзая – Улан - Батор: Ганзам, 2016.

3. *Марюхненко В.С.* Информационное обеспечение подвижных транспортных средств на основе интегрированных навигационных систем / В.С. Марюхненко, Ю.Ф. Мухопад, В.В. Демьянов, Б.М. Миронов / под. ред. В.С. Марюхненко. – Новосибирск: Наука, 2014. – 256 с.

4. *Бубнов В.Д., Дмитриев В.С.* Устройства СЦБ их монтаж и оборудование. – М: Транспорт, 1993. – 366с.

## РАЗДЕЛ V. ИНФОРМАЦИОННЫЕ УСТРОЙСТВА И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 681.5

*А.А. Александров*

### ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НАГРЕВА (ОХЛАЖДЕНИЯ) ПРИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

*В статье рассмотрены вопросы определения нестационарного теплового поля заготовки из алюминиевых сплавов при термообработке. Основной проблемой при определении теплового поля является определение коэффициента теплоотдачи, поэтому предложена расчетно-экспериментальная модель теплового поля и алгоритм параметрической идентификации, позволяющие рассчитывать коэффициент теплоотдачи и нестационарное тепловое поле.*

*Ключевые слова: расчетно-экспериментальная модель, параметрическая идентификация, метод конечных разностей, термическая обработка, остаточные термические напряжения, маложесткие детали.*

#### **Введение**

Термическая обработка заготовок из алюминиевых сплавов, широко используемых при производстве крупногабаритных маложестких деталей, заключается в проведении закалки и искусственного старения [1]. В процессе закалки происходит быстрое неравномерное охлаждение заготовки, которое формирует уровень температурных напряжений, превышающий предел текучести материала, что в свою очередь приводит к возникновению неравномерных пластических деформаций заготовки. При полном охлаждении заготовки до равномерной температуры по всему телу, неравномерные пластические деформации приводят к возникновению термических остаточных напряжений (ОН). Данные напряжения после механической обработки приводят к возникновению коробления деталей и их дорогостоящему браку. Следовательно, решение задач исследования процессов формирования остаточного напряженно-деформированного состояния (НДС) на основе математического моделирования является актуальной задачей.

На сегодняшний день, вопрос остаточных деформаций исследован на достаточно высоком уровне. Использование математических моделей, предложенных В.В. Абрамовым, И.А. Биргером, С.И. Ботвенко, Г. Бюлером, С.П. Гинкулом, Н.Н. Давиденковым, Ю.И. Замащиковым, С.И. Ивановым, С.К. Каргапольцевым, С.И. Ключниковым, В.Е. Койре, А.В. Лившицем, А.И. Промптовым, позволяет определять, как локальные, так и общие

деформации маложестких деталей. При этом, узкое место исследований остаточного НДС, заключается в определении исходных данных для моделирования остаточных деформаций – определении термических остаточных напряжений. На сегодняшний день, указанные напряжения определяются либо разрушающими методами, что удорожает процесс производства, либо неразрушающими методами, использующими голографическую интерферометрию, электронную спекл-интерферометрию, рентгеновские и ультразвуковые методы измерения, которые имеют значительную (15-30 %) погрешность измерения. Результаты работ, посвященных математическому моделированию остаточных напряжений, имеют узкую специфику. Примером являются работы Д.А. Мирзаева (моделирование ОН в поковках) [2], С.Л. Лебского (моделирование ОН после дробенаклепа) [3], С.А. Макеева (моделирование ОН в тонкостенном прокате) [4], И.Н. Кравченко (моделирование ОН при формировании плазменных покрытий) [5], С.И. Каратушин (моделирование ОН при цементации) [6] и т.д.. Это объясняется значительными отличиями физики протекающих процессов и нестационарностью параметров. На сегодняшний день наиболее перспективным, при моделировании нестационарных тепловых процессов является использование программных комплексов (MSC Nastran, Ansys и т.д.), реализующих численные методы расчета, которые являются мощными инструментами решения подобных прикладных задач. При этом, их использование в каждом конкретном случае так же связано с необходимостью трудоемкого определения специфических параметров процесса (таких как, коэффициент теплоотдачи, кривые ползучести материала в диапазоне температур обработки, распределение углерода по толщине при цементации и другие). В случае расчета нестационарного теплового поля в основу численных математических моделей положено уравнение теплопроводности (1) с соответствующими граничными условиями [2].

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q_w(x, y, z, t, T) = 0 \quad (1)$$

где  $\rho$  - плотность,  $c$  - удельная теплоемкость,  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $Q_w(x, y, z, t, T)$  - мощность внутренних источников тепловыделения.

Применительно к моделированию процесса охлаждения в процессе закалки, вызывающей термические остаточные напряжения, необходимо отметить, что предлагаемые различными исследователями [7, 8, 9] работы не избавлены от основной проблемы расчета – определение температурозависимого коэффициента конвективной теплоотдачи, изменяющего в широких пределах ( $500-10000 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$ ), что тормозит дальнейшее изучение процесса формирования остаточных напряжений. Таким образом, задача формирования математической модели процесса с целью определения значений коэффициента теплоотдачи при различных условиях проведения термической обработки является актуальной.

## Расчетно-экспериментальная модель процесса охлаждения заготовки при термической обработке.

Для случая заготовки типа плиты, у которой ширина и длина значительно превышают толщину, справедливо перейти к одномерному уравнению теплопроводности:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad 0 < x < L. \quad (2)$$

Начальные и граничные условия описываются следующим образом:

$$t = 0: T = T_0, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (3)$$

$$x = 0: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_1 (T - T^{e1}), \quad t > 0, \quad \alpha_1 > 0 \quad (4)$$

$$x = L: \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2 (T - T^{e2}), \quad t > 0, \quad \alpha_2 > 0, \quad (5)$$

где  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности,  $T^{e1}$  и  $T^{e2}$  – температура внешней среды,  $T$  – начальная температура заготовки,  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  – коэффициент теплоотдачи.

Так как процесс закалки происходит при опускании заготовки вертикально, коэффициенты теплоотдачи  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  и температура внешней среды  $T^{e1}$  и  $T^{e2}$  равны.

Коэффициент теплоотдачи, характеризующий процесс охлаждения заготовки в процессе закалки, зависит от значительного числа факторов, поэтому определить его значения расчетным способом представляется весьма трудной задачей, а справочные данные отсутствуют.

Учитывая вышесказанное, предложена расчетно-экспериментальная модель (6) нестационарного теплового поля, представляющая собой уравнение Фурье-Кирхгофа с соответствующими начальными, граничными условиями и экспериментальными зависимостями изменения температуры в процессе закалки в различных сечениях исследуемой заготовки, позволяющая рассчитать коэффициент теплоотдачи и систему нестационарных тепловых полей, возникающих в процессе закалки.

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \text{ где } 0 < x < L \\ \text{начальные условия : при } t = 0, 0 \leq x \leq L : T = T_0 \\ \text{граничные условия : при } x = 0 : \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_1 (T - T^{e1}), \text{ где } t > 0, \alpha_1 > 0 \\ \text{при } x = L : \lambda \frac{\partial T}{\partial x} = \alpha_2 (T - T^{e2}), \text{ где } t > 0, \alpha_2 > 0 \\ T_i = f_i(x_i, t), \text{ где } i = [1, 2, 3, 4, 5], t > 0 \end{array} \right. \quad (6)$$

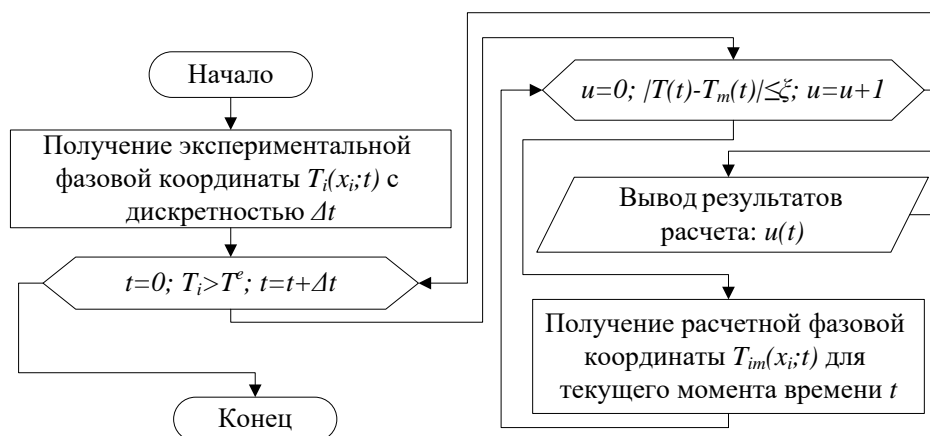
где  $T_i = f_i(x_i, t)$ , где  $i = [1, 2, 3, 4, 5]$  – экспериментальные кривые охлаждения, характеризующие изменение температуры в сечениях исследуемого тела по толщине.

Расчет системы нестационарных тепловых полей осуществляется методом конечных разностей, на постоянной сетке, по неявной четырехугольной разностной схеме.

### Идентификация коэффициента теплоотдачи

Определение коэффициента теплоотдачи, учитывая нелинейно изменяющиеся параметры, входящие в граничные условия, представляется весьма трудной задачей. В связи с этим, в работе предложен алгоритм параметрической идентификации температурозависимых параметров, характеризующих нестационарный теплообмен заготовки в процессе термообработки (рис. 1), с соответствии с которым:

1. Определяются экспериментальные кривые охлаждения;
2. Полученные экспериментальные зависимости разбиваются на ряд временных интервалов с шагом  $\Delta t$ , в пределах которых температура изменяется по линейному закону, а идентифицируемый параметр – постоянный;
3. Определяются расчетные кривые охлаждения, разбитые на такие же временные интервалы, как и экспериментальные кривые охлаждения;
4. По экспериментальным кривым охлаждения с интервалом дискретизации  $\Delta t$  оцениваются значения параметра, обеспечивающего минимум величины квадратичного функционала невязки между расчетными и фактическими данными.

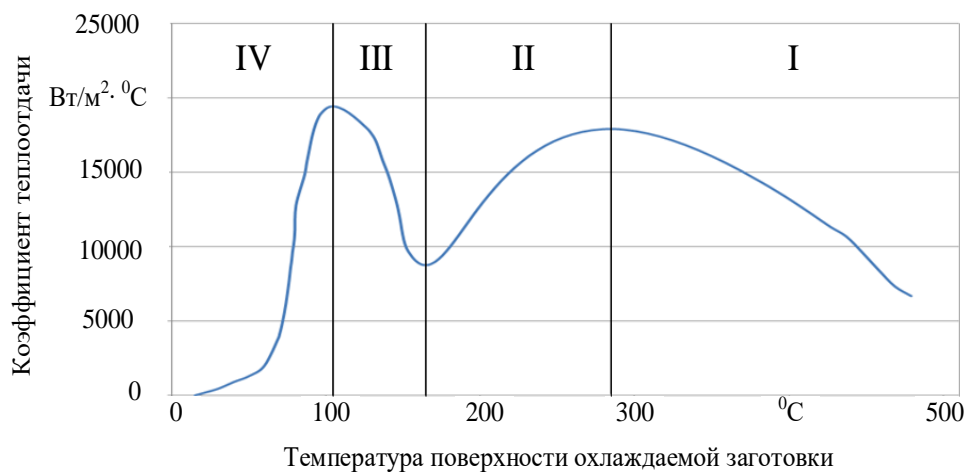


**Рис. 1. Алгоритм идентификации коэффициента теплоотдачи по кривым охлаждения**

В расчетах используются экспериментально установленные значения температуры тела в сечениях заготовки на заданной глубине с использованием разработанного устройства [11].

Использование предложенной расчетно-экспериментальной модели и разработанного на ее основе алгоритма (рисунок 1) позволило определить

значения температурозависимого коэффициента теплоотдачи. Для случая заготовки с габаритами 390\*260\*38 из сплава В95  $\alpha(t)$  имеет вид, представленный на рисунке 2. Процесс изменения коэффициента теплоотдачи при термообработке протекает в четыре этапа, в соответствии с изменением режимов кипения закалочной среды.



**Рис. 2. Температурно-зависимый коэффициент теплоотдачи**

### **Заключение**

Использование вышеприведенного коэффициента при расчете нестационарного теплового поля и термических остаточных напряжений дает расхождение с не превышающее 3,76 % с экспериментальными значениями, приведенными в работах [1, 12, 13], и может быть использовано в практических расчетах. Таким образом, впервые предложенные расчетно-экспериментальная модель и алгоритм расчета позволяет перейти от физических методов определения термических остаточных напряжений к расчету напряжений еще на этапе проектирования изделий и, соответственно, обеспечить снижение себестоимости продукции.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Лившиц А.В.* Прогнозирование локальных остаточных деформаций при проектировании технологического процесса изготовления маложестких деталей: Дисс. ... канд. техн. наук / А. В. Лившиц. – Иркутск: - 1999. – 185 с.
2. *Мирзаев Д.А.* Анализ термоупругих напряжений в поковках с учетом эффекта релаксации / Д.А. Мирзаев, А.Д. Шабуров, А.О. Чернявский // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2014. - №3. – с. 40-47.
3. *Лебский С.Л.* Влияние параметров технологического процесса дробенаклепа на эпюру остаточных напряжений / С.Л. Лебский, Д.С. Лебский // Известия ВолгГТУ. – 2013. - №15(118). – с. 61-64,
4. *Макеев С.А.* Моделирование остаточных напряжений в тонкостенном прокате трапециевидного сечения / С.А. Макеев, Д.М. Колмаков // Омский научный вестник. – 2014. - №1(127). – с. 69-73.
5. *Кравченко И.Н.* Математическое моделирование процесса развития остаточных напряжений при формировании плазменных покрытий / И.Н. Кравченко, В.В. Сель-

- дяков, Е.М. Бобряшов, А.Ф. Пузряков // Современные наукоемкие технологии. – 2013. - №11. – с. 77-80.
6. Каратушин С.И. моделирование остаточных напряжений при цементации / С.И. Каратушин, Д.В. Спиридонов, Ю.А. Плешанова // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2012. - №3. – с. 65-68.
  7. Кузнецов Г.В. Разностные методы решения задач теплопроводности / Кузнецов Г.В., Шеремет М.А. – Томск: Изд-во ТПУ, 2007. – 172 с.
  8. Бачурин А.С. Численное моделирование влияния припуска на величину остаточных напряжений в деталях летательных аппаратов после закалки / А.С. Бачурин, К.Н. Бобин, К.А. Матвеев, Н.В. Курлаев // Вестник Сибирского государственного государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева . – 2013. - №3. – с. 123-128.
  9. Ампилогов А.Ю. Прогнозирование структуры и свойств сталей в объеме изделия при закалке и отпуске: Дисс. ... канд. техн. наук / А.Ю. Ампилогов, Москва.: - 2008. – 145 с.
  10. Применение SYSWELD для моделирования закалки в 2D постановке / Делкам – Урал [Электронный ресурс] / Режим доступа: [http://www.delcam-ural.ru/cae/tehnologicheskii\\_analiz/sysweld\\_modelirovanie\\_zakalki](http://www.delcam-ural.ru/cae/tehnologicheskii_analiz/sysweld_modelirovanie_zakalki) .
  11. Устройство для определения коэффициентов теплоотдачи. Патент на полезную модель №155337 / А.А. Александров, А.В. Лившиц, Н.Г. Филиппенко, С.И. Попов, С.Н. Филатова // Патентообладатель: ФГБОУ ВПО ИрГУПС. Зарегистрировано в Государственном реестре полезных моделей Российской Федерации 10.10.2015.
  12. Каргапольцев С.К. Минимизация остаточных деформаций методом дискретного моделирования при фрезеровании мало жестких деталей. Дисс. ... канд. техн. наук : С.К. Каргапольцев. – Иркутск.: - 1990. – 136 с.
  13. Ключников С.И. Минимизация остаточных деформаций методом дискретного моделирования при фрезеровании мало жестких деталей. Дисс. ... канд. техн. наук : С.И. Ключников. – Иркутск.: - 1998. – 154 с.

УДК 681.586.4

*С. Б. Антошкин*

## **ВОПРОСЫ ОРИЕНТАЦИИ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ ТРАНСПОРТНЫХ РОБОТОВ**

*Рассматриваются способы ориентации автономных транспортных роботов методом пеленгации акустического сигнала маяка. Производится сравнительная оценка способов фазовой и корреляционной пеленгации.*

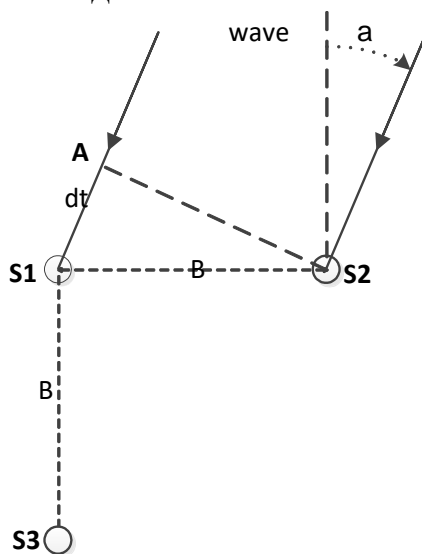
*Ключевые слова: транспортный робот, метод пеленгации, акустический сигнал маяка.*

Основное назначение транспортных роботов – доставка или сопровождение груза в заданное место. При этом одной из приоритетных систем робота является система ориентации в пространстве [1]. В статье рассматриваются методы ориентации в специфических условиях для роботов, осуществляющих перемещение в заданное место, определяемое стацио-

нарным или мобильным маяком. Что касается особенностей, то перемещение может происходить в среде исключая передачу сигналов в электромагнитном диапазоне (радиоволновом, оптическом, ИК) – жидкие среды, в том числе малопрозрачные. В подобных случаях используются акустические сигналы [2].

Определение направления на маяк по акустическому сигналу – пеленгация может выполняться амплитудным, фазовым или корреляционным способом [3, 4, 5], которые имеют сходство со способами пеленгации электромагнитных волн [6]. Амплитудный способ акустической пеленгации, основанный на поиске минимума сигнала диаграммой направленности сенсора не лучший вариант для мобильного робота, так как требует сканирования по азимуту диаграммой направленности, то есть механических поворотов сенсора при непрерывном излучении сигнала маяком. Фазовый и корреляционный способ допускают обработку прерывистых пакетов сигнала маяка, что при автономном электропитании допускает экономичный режим его работы.

Рассмотрим общие и индивидуальные особенности фазового и корреляционного пеленгаторов: оба способа основаны на измерении относительных задержек прихода волнового фронта к сенсорам измерительного массива. На рис.1 представлено расположение сенсоров на плоскости. S1 – опорный сенсор, относительно которого измеряется задержка или опережение прихода фронта на сенсоры S2 и S3, находящиеся на перпендикулярных осях для устранения неоднозначности пеленга в пределах  $\pm\pi$ .



**Рис.1. Расположение сенсоров акустического пеленгатора.**

При фазовой пеленгации применяется сигнал в виде пакетов гармонического сигнала частотой F. Для однозначного определения пеленга база B должна удовлетворять условию

$B < \lambda/2$  где длина волны  $\lambda = C/F$ , C – скорость распространения сигнала



С другой стороны точность пеленга пропорциональна величине базы В.

S1-D – фронт проходящей звуковой волны

$\alpha$  – азимут направления проходящей звуковой волны (wave) относительно перпендикуляра к базе

S2-D =  $\Delta L$  – разность хода по фронту волны

Приведем известные соотношения для фазовых пеленгаторов:

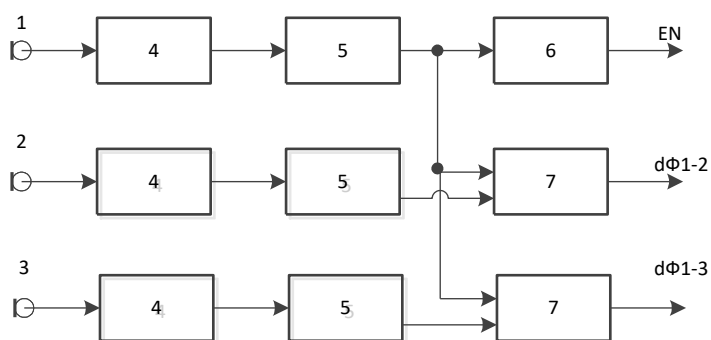
$$d\Phi = \pi \frac{\Delta L}{\lambda} \quad (1)$$

$$\Delta L = \lambda \frac{d\Phi}{\pi} \quad (2)$$

$$\Delta L = b \cdot \text{Sin}\alpha \quad (3)$$

$$\alpha = \text{arcSin}\left(\lambda \frac{d\Phi}{\pi b}\right) \quad (4)$$

На рис. 2 представлена блок-схема фазового пеленгатора



**Рис. 2. Блок-схема фазового пеленгатора:**

1,2,3 – микрофоны сенсора; 4 – активные полосовые фильтры; 5 – усилители-ограничители; 6 – детектор порога сигнала; 7 – измеритель разности фаз.

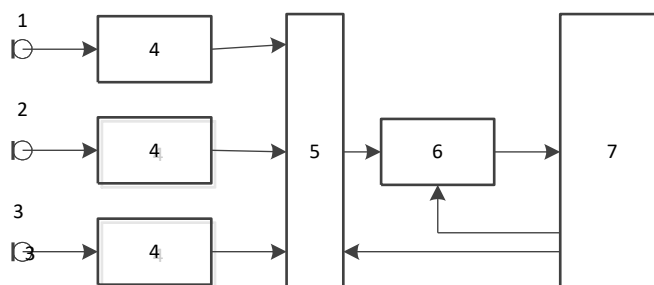
Активные полосовые фильтры выделяют сигнал заданного частотного диапазона, усилители-ограничители усиливают фильтрованный сигнал и ограничивают до логических уровней. Детектор порога сигнала при обнаружении начала пакета вырабатывает сигнал разрешения (EN), измерители разности фаз формируют импульсы ( $d\Phi_{1-2}$ ,  $d\Phi_{1-3}$ ), длительность которых пропорциональна разности фаз. Эти сигналы обрабатываются микроконтроллером управления роботом. Функции измерителей разности фаз может выполнять микроконтроллер. Значения азимута  $\alpha$  нецелесообразно определять вычислительным алгоритмом, а считывать из таблицы ПЗУ данных микроконтроллера.

При использовании в качестве сенсоров малогабаритных электретных или пьезорезистивных микрофонов их частотный диапазон лежит в пределах 500 – 15000 Гц. И при выборе частоты излучения 2000 Гц база должна быть  $< \lambda/2$  – что для воздуха ( $C=340$  м/сек) составит 85мм, а для воды 375мм., что позволяет для водной среды применять более высокие частоты.

ты в пеленгаторах малогабаритных роботов. Кроме того уровень посторонних акустических помех снижается с ростом частоты.

При корреляционном способе пеленгации нет особых ограничений на размер базы, но при этом требуется применение сигналов с заданными корреляционными характеристиками, что усложняет аппаратную и программную составляющую пеленгатора.

На рис. 3 представлена блок-схема корреляционного пеленгатора



**Рис. 3. Блок-схема корреляционного пеленгатора:**

1,2,3 – микрофоны сенсора; 4 – активные полосовые фильтры; 5 – коммутатор; 6 – аналого-цифровой преобразователь; 7 – микроконтроллер.

Входные цепи аналогичны фазовому пеленгатору, коммутатор под управлением микроконтроллера переключает аналоговые сигналы на вход АЦП, цифровые данные которого обрабатываются микроконтроллером. Коммутатор и аналого-цифровой преобразователь могут входить в состав микроконтроллера. Одним из параметров, определяющих точность измерений, является время преобразования АЦП. Так, например, для модулей АЦП микроконтроллеров PIC16F87X время преобразования составляет около 20мкс. Для трех каналов в воздухе шаг дискретизации (минимальная погрешность) в пространстве составит около 20мм., то есть база должна быть значительно больше (>200мм), а для водной среды более 1000мм. Таким образом, для улучшения показателей корреляционного пеленгатора следует применять отдельный более быстродействующий АЦП и, соответственно, отдельный коммутатор.

Из вышеприведенного следует вывод, что для малогабаритных автономных транспортных роботов целесообразно применять методы фазовой пеленгации, в силу относительной простоты, как аппаратной, так и программной составляющих. Такие роботы могут применяться при аварийно-спасательных работах, для доставки грузов в конкретное место в условиях ограниченной видимости, при проведении подводных работ. Транспортные роботы с корреляционным методом определения пеленга на маяк более сложны, но имеют лучшие характеристики по дальности при применении помехоустойчивых сигналов, поэтому их применение целесообразно при транспортировании больших грузов следуя за ведущим по изменяемому маршруту (например, по водному пути ведомый буксир с баржей за ведущим катером).

На кафедре под руководством автора публикации выполнялись дипломные проекты, в которых отработывался фазовый метод наведения макета транспортного робота на источник сигнала

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Подураев Ю.В.* Основы мехатроники. Учебное пособие. – М.: МГТУ «СТАНКИН», 2000 – 80 с.
2. *Воротников С.А.* Информационные устройства робототехнических систем: Уч. Пособие. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2005. – 384 с.
3. *Агеев М.Д., Киселев Л.В., Матвиенко Ю.В. и др.* Автономные подводные роботы: системы и технологии; Ин-т проблем морских технологий. – М.: Наука. 2005. – 398 с.
4. Пеленгатор водолаза. Патент на полезную модель RU 43370 U1, fips.ru 27.07.2014.
5. Устройство обнаружения источника звука, Фукамати Хидео (JP), Киндо Тосики (JP). Патент на изобретение RU 2576339 C2, fips.ru 27.02.2016.
6. *Гришин Ю.П., Ипатов В.П., Казаринов Ю.М и др.* Радиотехнические системы: учеб. для вузов. – М.: Высшая школа, 1990. – 496 с.

## **РАЗДЕЛ VI. АВТОМАТИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ПРОИЗВОДСТВ**

УДК 519.711

*И. М. Александров*

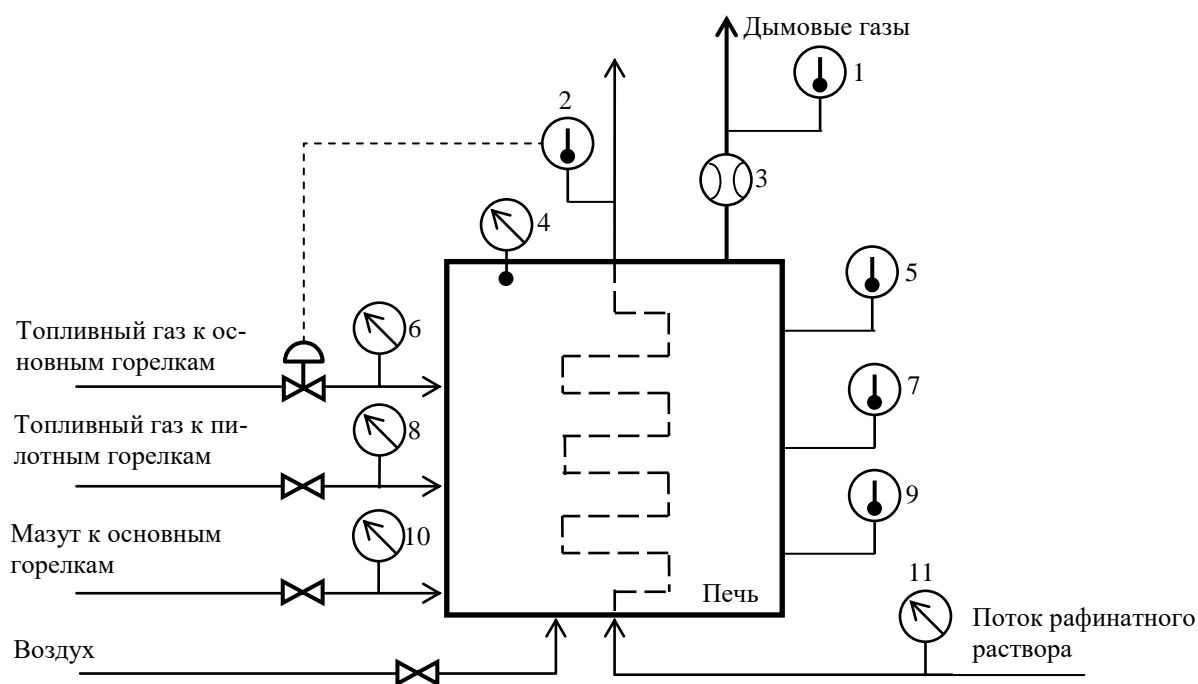
### **СИСТЕМА КОНТРОЛЯ КИСЛОРОДА В ДЫМОВЫХ ГАЗАХ ПЕЧИ УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕГЕНЕРАЦИИ ФЕНОЛА**

*Представленная статья посвящена актуальным методам повышения эффективности использования топлива в промышленной печи. В частности, автором рассматриваются возможности для повышения достоверности оценки эффективности регулирующих воздействий, описываются возможные подходы для алгоритмизации указанных методов. Особое внимание автором уделено методу увеличения точности оценки измеряемого параметра. Автором так же предложены подходы, обеспечивающие повышение оценки содержания кислорода в дымовых газах по косвенным признакам. Автором обоснован вывод об актуальности применения виртуального датчика для повышения эффективности использования топлива в промышленной печи.*

*Ключевые слова: эффективность, косвенные измерения, виртуальный датчик, нечеткие системы, редукция данных, кислород в дымовых газах.*

Для повышения эффективности управления и качества выпускаемого и промежуточного продукта необходимо измерять концентрацию вещества в потоках технологического процесса. Существующие решения этой задачи не всегда отвечают современным требованиям точности (поточный датчик) и оперативности измерений (лабораторный анализ).

Настоящая работа продолжает цикл исследований по направлению организации эффективных алгоритмов управления технологическими объектами [1-4] и на примере контроля концентрации кислорода в дымовых газах предлагает вариант их построения на основе нечеткой нейронной продукционной сети (ННС).



**Рис. 1. Технологическая схема печи, где 1 - температура дымовых газов в борове печи (T04), 2 - температура потока рафинатного раствора на выходе из печи (T05), 3 - объемная доля кислорода в уходящих дымовых газах печи (Q01), 4 - разрежение в печи (P05), 5 - температура верха печи (T01), 6 - давление топливного газа к основным горелкам печи (P02), 7 - температура середины печи (T02), 8 - давление топливного газа к пилотным горелкам печи (P03), 9 - температура низа печи (T03), 10 - давление мазута к основным горелкам печи (P04), 11 - давление в сырьевом змеевике на входе печи (P01). [4]**

В работе рассматривается одна из печей установки селективной очистки масел фенолом типа А-37/3, входящая в состав цеха 101 нефтеперерабатывающего завода[5]. Введена в действие в 1974 году. Эта печь установлена на участке регенерации фенола из рафинатных растворов и служит для нагрева этого раствора до температуры 280-290 °С (рис. 1).

В качестве топлива выступает мазут и топливный газ. В процессе горения так же участвует кислород в воздухе, который подают в печь через специальные воздухопроводы, а его объем, подаваемый в печь, регулируют шиберами. Существует определенное соотношение объемов топлива и воздуха для эффективного сгорания топлива. Если количество кислорода в дымовых газах на выходе печи отклоняется от определенного значения, это значит, что топливо сгорает не полностью, то есть расходуется не эффективно. Таким образом, количество кислорода в дымовых газах примем за оптимизируемую величину выхода.

В схеме печи присутствует потоковый датчик концентрации кислорода в дымовых газах, но, как показала практика, он не всегда показывает верные значения, так как часто выходит из строя либо покрывается слоем сажи и требует сервисного обслуживания.

Для решения этой проблемы предлагается использовать виртуальный датчик, способный оценивать величину выхода по косвенным измерениям переменных технологического процесса. В дальнейшем вся работа будет направлена на построение модели печи, с помощью которой можно будет получить оптимальные параметры горения.

Виртуальные датчики с успехом применяются для оценки трудноизмеримых и неизмеримых параметров продукции, управления летательными аппаратами и роботизированной техникой, и многих других сфер деятельности человека. Виртуальный датчик исполняет роль потокового анализатора и может быть основан на любом методе моделирования, широко используются регрессионные, аналитические и нейро-сетевые модели.

Разработка виртуального датчика сводится к построению модели, основанной на полученных данных о поведении объекта. Обычно эти данные получены из журналов, которые хранят информацию о поведении объекта в течение продолжительного промежутка времени. Так как объект должен находиться в рабочем состоянии, то и все переменные процесса, протекающего в объекте, находятся в нормальном интервале, установленным техническим регламентом, а виртуальный датчик должен показывать адекватные значения не только в нормальном режиме работы объекта, но и в граничных режимах (пуск, останов). Эти данные можно получить либо из специализированной документации, если она есть, либо от эксперта, обладающего значительным опытом работы на моделируемом объекте.

В комплексе метод построения виртуального датчика состоит из нескольких этапов: получения статистических данных с производства о поведении измеряемых величин в нормальном режиме работы, исследования уровня значимости переменных влияющих на оптимизируемую величину выхода, а так же получение от экспертов сведений об изменениях этих величин в граничных режимах работы. В итоге все полученные сведения анализируются алгоритмами искусственного интеллекта виртуального датчика.

По опыту разработок было выявлено, что количество входов прямо пропорционально времени и качеству обучения, поэтому для оптимизации процесса обучения необходимо из всего доступного списка имеющихся переменных выбрать только те, которые наиболее значимо влияют на оптимизируемую величину выхода.

Определение существенных переменных – это необходимый процесс для уменьшения нагрузки на модель виртуального датчика. Предлагается применить комплекс из трех методов исследования входных переменных: метод средних нечетких кривых, метод дугоугольного индекса, корреляционный анализ.

Воспользуемся программой [3], разработанной для анализа данных по вышеперечисленным методам определения существенных переменных.

Показатели, полученные в результате работы программы, отображены в таблице 1. В полях «Показатель» таблицы 1 представлен некоторый индекс, от величины которого зависит влияние указанной переменной на концентрацию кислорода Q01. В таблице 1 показатели отсортированы в порядке убывания отдельно для каждого метода.

При сортировке показателей для метода средних нечетких кривых значение принималось по модулю, так как знак показателя отображает прямую или обратную зависимость исследуемых переменных.

Таблица 1

**Результаты методов отбора существенных переменных**

| Метод ср. нечетких кривых |            | Метод дугугольного индекса |            | Коэффициент корреляции |            |
|---------------------------|------------|----------------------------|------------|------------------------|------------|
| Имя переменной            | Показатель | Имя переменной             | Показатель | Имя переменной         | Показатель |
| T02                       | -0,1711    | T05                        | 89,9751    | T02                    | 0,72976    |
| T04                       | -0,1711    | P04                        | 89,8473    | T04                    | 0,71559    |
| T01                       | -0,1644    | P02                        | 89,5824    | T03                    | 0,67881    |
| T03                       | -0,1524    | T01                        | 89,5312    | T01                    | 0,55845    |
| P04                       | -0,1098    | T04                        | 89,5022    | P01                    | 0,41827    |
| P05                       | 0,0518     | P05                        | 89,4821    | P03                    | 0,39822    |
| P01                       | -0,0315    | T02                        | 89,4568    | P05                    | 0,34366    |
| P02                       | 0,0104     | T03                        | 89,3189    | P04                    | 0,24936    |
| P03                       | -0,0053    | P01                        | 89,0703    | T05                    | 0,07323    |
| T05                       | -0,0020    | P03                        | 87,5617    | P02                    | 0,04805    |

Агрегируя приведенные выше исследования, была сделана сортировка по степеням влияния переменных на концентрацию кислорода в дымовых газах от более влияющих к менее влияющим: T02, T04, T01, P05, T03, P04, P01, T05, P02, P03.

Учитывая зависимость, выявленную в результате корреляционного анализа, между температурами внутри печи (T01, T02, T03), можно выделить температуру T02. Для построения модели виртуального датчика целесообразно выбрать еще 3 параметра. По приведенному выше рейтингу это T04, P05 и P04. Эксперт с производства подтвердил наши исследования, указав эти переменные, как самые влияющие на процесс горения.

Предлагаемый виртуальный датчик основан на нечеткой нейронной продукционной сети, так как нечеткость позволяет более точно описывать плохо формализованные процессы [6], нейронные сети обладают быстрой обучаемостью (настройкой), а продукционные правила позволяют интерпретировать полученную сеть в свод правил следующего вида [7]:

$$P_i: \text{ЕСЛИ } x_i \text{ есть } A_{ij} \text{ И } \dots \text{ И } x_j \text{ есть } A_{ij} \text{ И } \dots \text{ И } x_m \text{ есть } A_{im}, \text{ ТО } y \text{ есть } B_i, i = 1, \dots, n$$

Такой подход позволяет делать и обратную операцию – внедрять мнение эксперта о поведении переменных процесса в граничных режимах работы.

Данные для обучения были получены из архивов системы управления установкой. Эти данные представляют собой массив периодических измерений каждого параметра системы, отсортированный по дате. Всего было получено 1000 измерений, из них 829 пригодны для дальнейшей обработки, причиной этого является очередная поломка датчика концентрации кислорода в дымовых газах. Итоговый массив данных был разбит на два множества: обучающее и контрольное. В свою очередь из обучающего множества треть данных выделяется в тестовое множество, с помощью которого реализуется защита от переобучения нейронной сети.

На вход нейронной сети желательно подавать нормализованные данные, что значительно ускорит процесс обучения и работы ННС. Был выбран метод нормализации максимально возможным значением, таким образом, все значения переменных находятся в интервале [0,1]. Расчет нормализации производится по формуле 1.

$$x'_i = \frac{x_i}{x_{\max}}, \quad (1)$$

где  $x'_i$  - нормализованное значение переменной  $i$ -го исхода,  $x_i$  - значение переменной  $i$ -го исхода,  $x_{\max}$  - максимально возможное значение переменной, которое можно узнать из регламента технологического процесса.

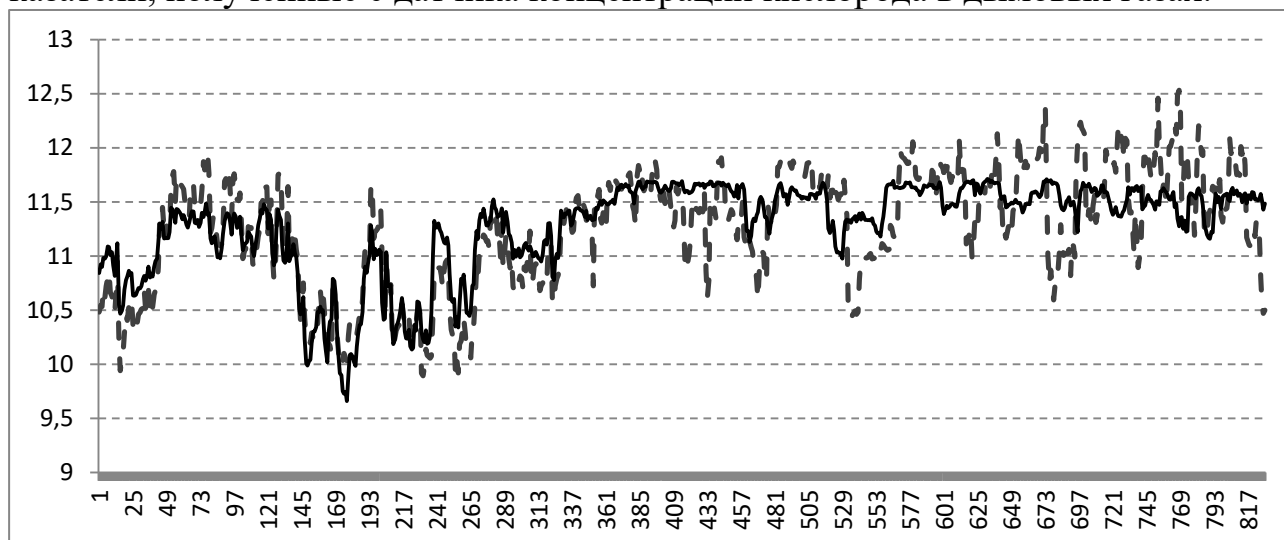
Так же очень важен процесс подбора параметров самой ННС: количество входов, правил, скорость обучения и др.

1. Количество правил – количество групп нейронов, позволяющих классифицировать определенные наборы входных переменных. Этот параметр зависит от сложности процесса, на который настраивается нейронная нечеткая продукционная сеть.
2. Скорость обучения – коэффициент, используемый в алгоритме обучения. Данный параметр влияет на скорость изменения весов нейронов, что приводит либо к грубой, но быстрой настройке, если скорость обучения достаточно высока, и к точной, но долгой настройке, если скорость относительно мала.
3. Количество эпох обучения – условие выхода, число итераций обучения.
4. Допустимая ошибка – условие выхода, порог среднеквадратичной погрешности, полученной на обучающем множестве.

Опытным путем было определено, что для достаточно быстрого и точного обучения сети необходимо установить следующие параметры обучения: количество правил – 16; скорость обучения – 0,01; максимальное количество эпох обучения – 100000; допустимая ошибка – 0,0001.



После обучения ННС была выполнена проверка работы на контрольном множестве. Рисунок 2 отображает результат проверки. График сплошной линией показывает значение переменной Q01, полученное в результате работы ННС, а график, очерченный пунктирной линией – реальные показатели, полученные с датчика концентрации кислорода в дымовых газах.



**Рис. 2. Сравнение графиков реальных показаний Q01 и вычисленных с помощью нечеткой нейронной продукционной сети на контрольном множестве**

В результате обучения нечеткой нейронной сети и анализа полученных значений на контрольном множестве были получены следующие оценочные показатели:

- Среднеквадратичная ошибка на обучающем множестве – 0,0007
- Среднеквадратичная ошибка на тестовом множестве – 0,0014
- Среднеквадратичная ошибка на контрольном множестве – 0,0026

В результате работы полученный виртуальный датчик способен не только оценивать концентрацию кислорода в дымовых газах, но и визуально показать свод продукционных правил, которые были получены в результате обучения. С их помощью можно определить оптимальные параметры подачи топлива и воздуха для эффективного процесса горения.

Представленный метод построения ВД для технологического объекта «Печь» может быть применен на различные процессы, в которых можно по косвенным измерениям оценивать величину целевого выхода.

В итоге, был спроектирован и программно реализован виртуальный датчик концентрации кислорода в дымовых газах печи. Были получены и проанализированы данные из архива системы управления, произведен опрос эксперта о поведении объекта в граничных режимах, выделены существенные переменные, выбран метод моделирования для виртуального датчика, определены параметры обучения, произведено обучение нечеткой нейронной продукционной сети полученными данными, оценены ошибки вычислений виртуального датчика.

Технологии искусственного интеллекта с каждым днем все плотнее внедряются в нашу жизнь. Без применения наукоемких процессов в производстве, современные промышленные предприятия не могут выдержать условия жесткой конкуренции. Использование виртуальных датчиков взамен дорогостоящих аналогов помогает достичь поставленных целей, внедрения безопасных и экономически выгодных технологических процессов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Александров И.М. Использование экспертных знаний для построения виртуальных датчиков / И.М. Александров, Н.С. Благодарный // Винеровские чтения / Труды IV Всероссийской конференции. Часть II. – 2011. – С. 5-14.
2. Александров И.М. Построение виртуального датчика на примере датчика концентрации этан-этиленовой фракции ректификационной колонны / И.М. Александров, Н.С. Благодарный // Сборник трудов научно-технической конференции – 2011. – С. 51-61
3. Александров, И.М. Программная реализация нечеткой нейронной сети для оценки концентрации этилена верха колонны К-11 установки ЭП-300/ И.М. Александров, Н.С. Благодарный // Вестник АГТА. – 2012. – № 6. – С.31-37.
4. Свердлова, О.Л. Алгоритм расчета скорости образования диоксида серы на поверхности / Свердлова О.Л., Туркина Н.М., Александров И.М. // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2013. – № 3 (39).– С. 275-278.
5. Технологический регламент установки селективной очистки масел фенолом А37/3 цеха 101 НПЗ. – 2003.
6. Благодарный Н.С., Кривов М.В., Колмогоров А.Г., Кобозев В.Ю. Критерий адекватности тренажерной модели // Автоматизация в промышленности. – 2010.– №7. – С. 59-65
7. Круглов, В. В. Гибридные нейронные сети / В.В. Круглов, В.В. Борисов – Смоленск : Русич, 2001. – 382 с.

УДК 620.181

*Д.В. Буторин, Н.Г. Филиппенко, А.В. Лившиц*

## УПРАВЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

*Для организации процесса управления механическими и электрофизическими свойствами изделий из полимерных материалов разработан способ определения структурных превращений в полимерных материалах, заключающийся в медленном линейном (монотонном) разогреве полимерного образца контактным способом с постоянным контролем теплового расширения и периодической подачей на образец ВЧ-энергии с целью определения динамики коэффициента диэлектрических потерь. Линейный разогрев реализован за счет пропорционально-интегрально-дифференциального закона регулирования.*

*Ключевые слова: полимеры; фазовые превращения; релаксационные превращения; термическая обработка; ВЧ-обработка; ПИД-регулятор.*

**Введение.** Полимерные материалы на сегодняшний день являются одним из широко используемых классов современных конструкционных материалов. Широкое распространение данные материалы получили благодаря своим уникальным свойствам: стойкостью к коррозии; высокой степенью устойчивости к различным видам механических и химических воздействий, возможностью работы в агрессивных средах, хорошим поглощением звука и вибрации. Они обладают электро- и теплоизоляционными свойствами. Тем самым, полимерные материалы приходят на смену ряду конструкционных материалов.

При разработке технологического процесса изготовления любого изделия технолог решает ряд задач, одной из которых является получение изделия с заданными эксплуатационными свойствами. В отношении металлов и конструкционных материалов данная задача не вызывает существенных трудностей, поскольку на сегодняшний день свойства и возможности данного класса материалов раскрыты достаточно полно, чего нельзя сказать о полимерах. Свойства полимеров определяются их надмолекулярными структурами. Механические свойства полимеров зависят от условий структурообразования и могут быть изменены в достаточно широких пределах [1].

Поэтому актуален вопрос изучения процесса структурных превращений, происходящих в полимерах. Его решение необходимо для организации управления механическими и электрофизическими свойствами изделий из полимерных материалов.

Одним из наиболее доступных в машиностроении методов управления механическими свойствами полимеров является термическая обработка.

**Постановка цели и задач исследования.** В связи с этим целью данных исследований было изучение структурных превращений в полимерных материалах в процессе их термообработки. Достижение поставленной цели возможно после решения ряда задач:

- выбор способов и режимов термической обработки полимеров;
- выбор контролируемых параметров процесса нагрева полимерных материалов;
- разработка способа определения фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах;
- выбор способа линейного разогрева полимерного образца;
- апробация разработанного способа и анализ результатов.

**Выбор способов и режимов термической обработки полимеров.** Режим термообработки характеризуют максимальная температура  $t_{\max}$ , до которой был нагрет полимерный материал при термообработке, время вы-

держки материала  $\tau$  при этой температуре, скорость нагрева  $v_n$  и скорость охлаждения  $v_o$  материала [1, 2].

Применительно к полимерным материалам различают четыре вида термообработки: закалка, отжиг, нормализация, отпуск [2].

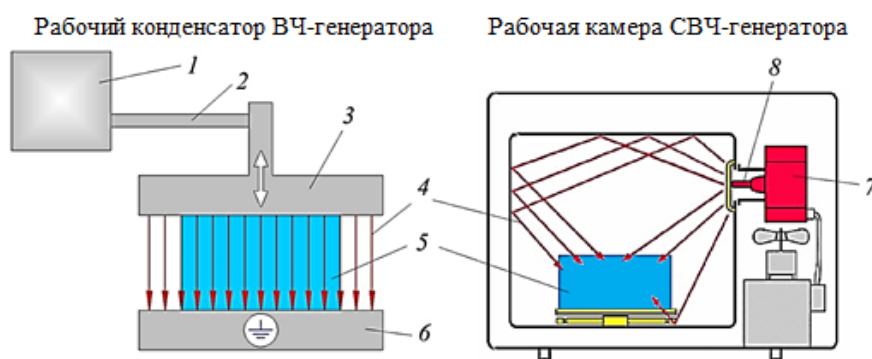
Нагрев традиционными способами (конвективный, контактный) весьма длительный и энергозатратный процесс. Анализ современных способов нагрева показывает, что наиболее эффективным является диэлектрический поляризационный нагрев, т.е. нагрев диэлектрических материалов переменным электрическим полем. Примером такого способа нагрева являются высокочастотные (ВЧ) и сверхвысокочастотные (СВЧ) печи.

В связи с этим способ диэлектрического нагрева стал предметом научных исследований многих ученых, большая часть работ которых направлена на разработку технологических процессов электротермической обработки полимерных материалов (сварка, сушка, термическая обработка, диагностика, восстановление) [3-5].

Различают высокочастотный и сверхвысокочастотный диэлектрический нагрев. На рис. 1 представлена схема воздействия ВЧ- и СВЧ-энергии.

Обзор проведенных теоретических и экспериментальных исследований показал, что наиболее предпочтительным является нагрев полимеров диапазоном частот ВЧ-излучения, которое имеет ряд преимуществ перед СВЧ, конвективным и контактным способами нагрева:

- равномерность;
- интенсивность;
- избирательность;
- саморегулируемость;
- тепловая безинерционность;
- простота подвода ВЧ-энергии к электродам (кабельная линия);
- обработка изделий любой формы и размеров;
- возможность контроля качества обработки;
- линейность потока ВЧ-энергии (при СВЧ-поток хаотичен);
- возможность создания автоматизированной системы управления (АСУ) процессом обработки.



**Рис. 1. Схема воздействия ВЧ- и СВЧ-энергии:**

1 – высокочастотный генератор; 2 – коаксиальная линия передачи ВЧ-энергии; 3 – подвижная высокопотенциальная плита рабочего конденсатора; 4 – волны электромагнитного излучения; 5 – нагреваемое тело; 6 – нижняя заземляющая плита рабочего конденсатора; 7 – СВЧ-генератор (магнетрон); 8 – СВЧ-волновод

Таким образом, в рамках настоящего исследования был выбран способ и наиболее эффективный частотный диапазон диэлектрического нагрева.

**Выбор контролируемых параметров процесса нагрева полимерных материалов.** Управление процессом электротермической обработки полимерных материалов – задача, от решения которой зависит качество обработки. Измерение параметров обрабатываемых диэлектрических материалов непосредственно в зоне ВЧ-воздействия это затратная и технически сложная задача.

Ряд отечественных и зарубежных авторов [6] решение данной задачи видят в организации контроля процесса ВЧ-воздействия по электрофизическим параметрам работы электротермического оборудования (анодный ток, напряжение на рабочем конденсаторе), времени ВЧ-обработки и расчетно-справочной температуре плавления полимера.

Литературный обзор показывает, что все эти методы основаны на примерном расчете температуры плавления, в зависимости от времени и мощности воздействия излучения. Поэтому организация процесса разогрева, а соответственно и управление мощностью электротермического воздействия, организовано на прогнозируемой температуре, определяемой по параметрам работы ВЧ-генератора. При этом авторами вводится большое количество допущений, касающихся однородности структуры обрабатываемого материала, постоянстве электрофизических параметров полимеров в процессе разогрева и др. Тем самым, практическая значимость данных разработок определена узкими рамками лабораторных условий [3].

В работе [3], согласно зависимости (1, 2), автор доказал и экспериментально подтвердил, что изменение фазового состояния обрабатываемого материала можно проследить по динамике изменения фактора диэлектрических потерь  $\varepsilon'' = f(T)$ .

$$I_a = \frac{4\pi f \varepsilon_0 \varepsilon''(T) E U_p ab}{\gamma d}, \quad (1)$$

$$I_a = k \cdot (\varepsilon''(T)), \quad (2)$$

где  $f$  – частота ЭМ-поля, Гц;  $\varepsilon_0$  – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума (воздуха), Ф/м;  $\varepsilon''(T)$  – фактор диэлектрических потерь;  $E$  – напряженность электрического поля, В/м;  $U_p$  – напряжение рабочего конденсатора, В;  $a$  и  $b$  – геометрические параметры пластины рабочего конденсатора (длина и ширина), м;  $\gamma$  – коэффициент отражения;  $d$  – расстояние между обкладками конденсатора, м.

Отсюда, в соответствии с зависимостью 2, контроль фазового состояния полимерного материала в процессе ВЧ-обработки можно осуществлять по единственному параметру работы высокочастотного оборудования – анодному току  $I_a$ .

Остается неоднозначным соответствие фазовых превращений в полимерных материалах динамике коэффициента диэлектрических потерь. В работе [3] автор утверждает, что фазовый переход первого рода (состояние плавления) соответствует второму температурному максимуму фактора диэлектрических потерь, а в работе [4] состояние плавления полимера определено в первом температурном минимуме. Следовательно, для корректного контроля фазовых превращений в полимерных материалах в процессе нагрева одного показателя  $I_a$  (анодного тока) не достаточно.

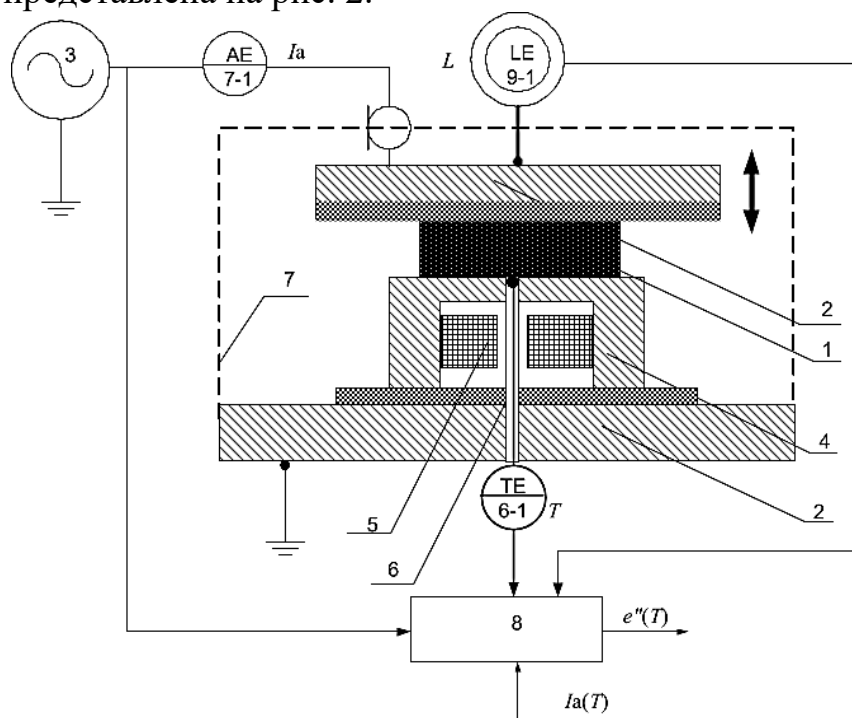
В связи с этим, в рамках настоящих исследований, для контроля электротермической обработки полимеров, были применены амперометрический и термомеханический (на основе прибора Фишера-Джонса) способы, что дало возможность обеспечения объективного определения момента достижения образцом температуры плавления и сопоставление её с динамикой изменяющегося в процессе нагрева коэффициента диэлектрических потерь.

Исходя из выше изложенного, в качестве контролируемых параметров были выбраны анодный ток ( $I_a$ ) и тепловое расширение.

Данное комплексирование методов позволило значительно упростить способы контроля, используя при этом уже готовые методики расчета результатов, что обеспечило высокую сходимость расчетных и практических данных.

**Разработка способа определения фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах.** Для решения задачи определения фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах был разработан способ исследований, заключающийся в линейном разогреве полимерного образца контактным способом с постоянным контролем теплового расширения объекта исследования и периодической подачей на рабочий конденсатор ВЧ-энергии с целью определения динамики коэффициента диэлектрических потерь.

Реализация разработанного способа была осуществлена на автоматизированной экспериментальной установке. Схема экспериментальной установки представлена на рис. 2.



**Рис. 2. Схема экспериментальной установки:**

- 1 – обрабатываемый образец; 2 – электроды рабочего конденсатора; 3 – ВЧ-генератор; 4 – приспособление для нагрева образца; 5 – электронагревательный элемент; 6 – термопара; 6-1 – термопара-термометр; 7 – защитный экран; 7-1 – амперметр (линейный датчик с выходом по напряжению); 8 – вычислительный блок; 9-1 – микрометр (фиксирует тепловое расширение образца)

Принцип работы данной установки заключается в следующем. Образец из полимерного материала 1 помещается между электродами 2 плоскопараллельного рабочего конденсатора, подключенного к ВЧ-генератору 3. Нижний электрод в совокупности является электрическим нагревательным элементом 5, обеспечивающим линейный нагрев образца до необходимой температуры с заданной скоростью. В приспособлении 4 имеется отверстие, заполненное термопроводящей пастой с термопарой 6 для контроля поверхностной температуры исследуемого образца. Анодный ток  $I_a$  на рабочем конденсаторе измеряется автоматически после включения ВЧ-генератора с помощью датчика тока (амперметра) 7-1. Температура образца контролируется непрерывно с помощью термопары-термометра 6-1, выходные сигналы от которой, также как и с датчика тока, поступают на вход вычислительного блока 8, в качестве которого используется микроконтроллер, связанный с персональным компьютером через СОМ-порт. Для объективного контроля момента достижения образцом температуры плавления к механизму верхней подвижной плиты рабочего конденсатора был присоединён, разработанный в рамках настоящего исследования, дат-

чик теплового расширения 9-1, работающий по принципу эффекта Холла. Выходные сигналы с датчика теплового расширения также поступают в вычислительный блок 8.

Данная установка и разработанный способ позволили уверенно контролировать и идентифицировать динамику коэффициента диэлектрических потерь по показателям анодного тока и линейного теплового расширения.

**Выбор способа линейного (равномерного) разогрева полимерного образца.** Одна из задач при разработке способа определения фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах заключалась в организации линейного разогрева образца.

Наиболее простой закон регулирования температуры – позиционный. При этом методе на нагреватель подается полная мощность до достижения заданного значения температуры, после чего подача мощности прекращается. Несмотря на это, разогретый нагреватель продолжает отдавать тепло и температура объекта какое-то время продолжает нарастать, что приводит к перегреву, иногда значительному. При последующем остывании объекта, по достижении заданного значения температуры, на нагреватель вновь подается полная мощность. Нагреватель сначала разогревает себя, затем окружающие области объекта, и, таким образом, охлаждение будет продолжаться до тех пор, пока волна тепла не достигнет датчика температуры. Следовательно, реальная температура может оказаться значительно ниже заданного значения. Таким образом, при позиционном законе регулирования возможны значительные колебания температуры около заданного значения [7].

Этот недостаток можно уменьшить или даже вовсе устранить, применяя пропорционально-интегрально-дифференциальный закон регулирования (ПИД закон). ПИД предполагает уменьшение мощности, подаваемой на нагреватель, по мере приближения температуры объекта к заданной температуре. Кроме того, в установившемся режиме регулирования по ПИД закону находится величина тепловой мощности, необходимой для компенсации тепловых потерь и поддержания заданной температуры [7].

Поэтому в качестве поддержания линейного разогрева полимерного образца был выбран ПИД-метод. При этом мощность  $N$ , которая должна выделяться нагревателем, выраженная в процентах от его максимальной мощности, рассчитывалась по формуле (3)

$$N = \frac{1000}{K_p} \left( \Delta T + \frac{1}{K_i} \int_0^1 \Delta T dt - K_d \frac{dT}{dt} \right), \quad (3)$$

где  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – пропорциональный, интегральный и дифференциальный коэффициенты регулирования соответственно (ПИД коэффициенты).



Процесс настройки ПИД-регулятора состоял из задания уставки и значений указанных выше трёх коэффициентов. Поиск коэффициентов осуществлялся эмпирически.

**Апробация разработанного способа и анализ результатов.** Согласно разработанному способу на ВЧ-оборудовании модели УЗП 2500 были проведены исследования взаимосвязей электрофизических параметров электротермического оборудования и таких полимерных материалов как: поливинилхлорид ОМБ-60, полиамид ПА6, стеклонаполненный полиамид (армамид ПА СВ 30-1 ЭТМ).

Размеры образцов подбирались согласно условию максимальной эффективности обработки на высокочастотной установке модели УЗП 2500, что соответствует площади образца в  $125 \text{ см}^2$ . Натурные испытания не были ограничены размерами, соответствующими максимальной мощности ВЧ-генератора и дополнительно был проведён ряд экспериментов с образцами других размеров.

Полученные экспериментальные данные позволили построить графики зависимостей теплового расширения образца от температуры  $\Delta l=f(T)$  (рис. 3а), анодного тока от температуры (рис. 3б, сплошная линия) и скорости изменения анодного тока от температуры (рис. 3б, пунктирная линия).

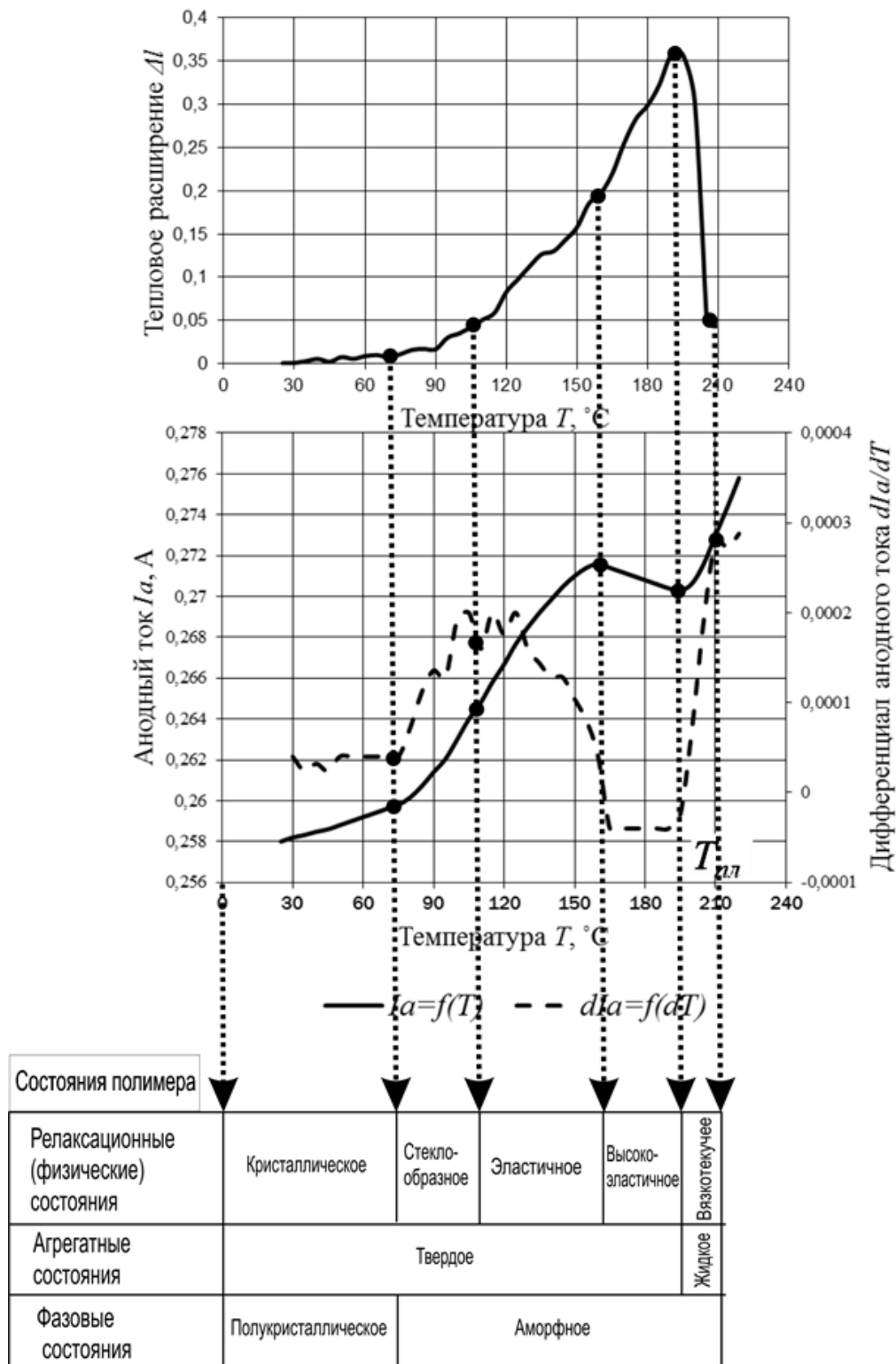
Анализ данных теплового расширения и анодного тока, показал, что изменение фазового состояния (начало плавления) соответствует первому минимуму значений анодного тока, как и утверждалось в работе [3].

Состояние первого максимума анодного тока, было идентифицировано как момент распада сегментальной подвижности полярных групп.

В рамках настоящего исследования впервые были определены скорости изменения анодного тока от температуры  $dI_a = f(dT)$  (рис. 3б, пунктирная линия). Производные определялись методом левой конечной разности первого порядка аппроксимации по формуле (4)

$$\frac{dI_a}{dT} = \frac{I_{a_m} - I_{a_{m-1}}}{T_m - T_{m-1}}. \quad (4)$$

Дифференцирование позволило организовать контроль соответствия текущего значения  $I_a$  экстремумам  $\text{tg} \delta$  в виде контроля достижения  $\frac{dI_a}{dT}$  нулевого значения.



**Рис. 3. Экспериментальные кривые:**

а –  $\Delta l=f(T)$ , б –  $I_a=f(T)$  и  $dI_a=f(dT)$  (материал: Армамид)

Анализ скорости изменения анодного тока также обнаружил ряд экстремумов. Предположительно данные переходы относятся к релаксационным переходам, а именно переход из кристаллического состояния в стеклообразное и из стеклообразного в высокоэластичное.

**Выводы.** На основе проведенных исследований были получены следующие результаты:

1. Впервые в рамках настоящих исследований, был применен метод комплексования на основе амперометрического и термомеханического способов, который позволил осуществлять контроль фазовых превращений в полимерных материалах в процессе нагрева.

2. Был сформирован комплекс контролируемых и управляемых параметров фазовых состояния полимерных материалов и критерии их оценки.

3. Были определены зависимости электрофизических параметров технологической системы и фазовых превращений в полимерных образцах различных геометрических форм и размеров.

Разработанный способ определения структурных превращений в полимерах позволяет создать технические и технологические решения организации процесса управления термообработкой изделий из пластических и композиционных материалов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еренков, О.Ю. К вопросу о регулировании надмолекулярной структуры полимерных материалов путём термообработки. Новые материалы и технологии в машиностроении – 2011: Материалы и технологии в машиностроении. Хабаровск: ТОГУ, 2011.
2. Битюцкая, Е.А. Влияние степени кристалличности на свойства полимеров [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://sciencebsea.bgita.ru/2013/mashin\\_2013\\_17/bituckaya\\_vl.htm](http://sciencebsea.bgita.ru/2013/mashin_2013_17/bituckaya_vl.htm) (дата обращения 5.09.2015).
3. Филиппенко, Н.Г. Автоматизация управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов: дис. ... кан. тех. наук 05.13.06 / Филиппенко Николай Григорьевич. Иркутск, 2012. – 161 с.
4. Румынский, С. Н. Автоматизированная система управления процессом сварки изделий из полиамида: дис. ... кан. тех. наук: 05.13.06 / Румынский Сергей Николаевич. СПб., 2005. – 133 с.
5. Попов, С. И. Автоматизация управления технологическими процессами восстановления эксплуатационных свойств полимеров: дис. ... кан. тех. наук: 05.13.06 / Попов Сергей Иванович. Иркутск, 2013. – 150 с.
6. Марков, А. В. Математическая модель высокочастотной сварки термопластов // Материалы 19 международ. науч. конф. «Математические методы в технике и технологиях» – ММТТ–19. – Воронеж: Воронеж. гос. технол. акад., – Т. 5. – Секция 5. 2006.– С. 87 – 89.
7. ПИД-закон регулирования. Методы нахождения ПИД коэффициентов [Электронный ресурс] // «Термодат» – Режим доступа: <http://www.termodat.ru/pdf/pid.pdf> (дата обращения 25.09.2015).

## **АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА УПРАВЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИМИ И ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ИЗДЕЛИЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

*Проведенный анализ оборудования электротермической обработки полимерных материалов на предмет его автоматизации позволил разработать алгоритм автоматизированного исследования, реализованный в виде программного обеспечения и автоматизированной системы управления процессом контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах при электротермической обработке.*

*Разработанная система управления позволяет на качественно новом уровне производить технологические процессы сушки, сварки и термоупрочнения изделий из природных, искусственных и синтетических полимерных материалов.*

*Ключевые слова: полимеры, фазовые превращения, релаксационные превращения, термическая обработка, высокочастотная обработка, ПИД-регулятор, автоматизированная система управления.*

**Введение.** Изучение процесса фазовых и релаксационных превращений, происходящих в полимерах, весьма актуальный вопрос, решение которого необходимо для организации управления механическими и электрофизическими свойствами изделий из полимерных материалов.

Одним из наиболее доступных в машиностроении методов управления механическими свойствами полимеров служит термическая обработка. Применительно к полимерным материалам различают четыре вида термообработки: закалка, отжиг, нормализация, отпуск [1].

В работе [2] в результате проведенного теоретического анализа и экспериментальных исследований был выбран высокочастотный диэлектрический способ термической обработки полимеров; определен комплекс контролируемых параметров процесса нагрева полимерных материалов; разработана методика определения структурных превращений в полимерах, заключающаяся в линейном разогреве полимерного образца контактным способом с постоянным контролем теплового расширения и периодической подачей на образец ВЧ-энергии.

**Постановка цели и задач исследования.** Для повышения эффективности использования потенциальных возможностей разработанной методики [2] необходимо создание автоматизированной системы управления (АСУ) процессом контроля фазовых и релаксационных (структурных) превращений в полимерных материалах, что и является целью данной работы. Для достижения поставленной цели необходимо:

– проведение анализа оборудования электротермической обработки полимерных материалов на предмет его автоматизации;

- разработка АСУ процессом контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах;
- разработка и изготовление блока автоматизации процесса контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах;
- апробирование АСУ, контроль фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах.

**Анализ оборудования электротермической обработки полимерных материалов и состояния вопроса его автоматизации.** Анализ электротермического оборудования, в рамках проводимых исследований, сводится к решению такого вопроса, как состояние и возможности автоматизации оборудования высокочастотной обработки.

На основе анализа большого количества разработок [3-7] посвященных совершенствованию технологии ВЧ-нагрева его оснастки и автоматизации процессов можно сделать вывод о том, что большинство разработок грешат академичностью и малоприменимы для проводимых исследований, а также промышленного использования [3].

Тем не менее, в работах [4, 8] представлена система управления ВЧ-оборудованием промышленного использования, которая лишена многих недостатков АСУ, а именно: ориентация работы на максимальных мощностях, незначительное количество предварительно вводимых параметров, универсальность по обрабатываемым термопластам, АСУ имеет дополнительный защитный контур по частичным разрядам (ЧР) для предотвращения пробоя [3]. Тем самым, данная система была принята за основу для проводимых исследований, но нуждается в модификации.

Исходя из изложенного, можно сделать вывод, что совершенствование и внедрение автоматизированных систем управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов является актуальной задачей. Ее решение позволит расширить возможности проводимых исследований.

**Разработка АСУ процессом контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах.** В работах [2, 4] было отмечено, что в современной технологии ВЧ-электротермии полимеров отсутствует техническая возможность прямого контроля параметров обрабатываемого материала. Особая роль в технологии ВЧ-электротермии отводится задаче корректного расчета продолжительности процесса обработки – до достижения в обрабатываемом термопласте фазового превращения, соответствующего состоянию плавления (текучести) и сегментальной подвижности [9].

В работе [2] была разработана методика определения структурных превращений в полимерных материалах в процессе электротермической обработки, за контролируемые параметры обработки в которой были приняты анодный ток ВЧ-генератора и тепловое расширение полимерного образца.

Необходимо отметить, что авторами использовался еще один показатель термообработки (температура образца), но его значения в поставленной ими задаче не оказывали влияния на полученные результаты. При разработке системы управления в рамках настоящего исследования, данный показатель был принят в качестве контрольно-управляющего сигнала.

Следующим этапом разработки системы управления процессом контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерах было – создание алгоритма управления и его реализация применительно к существующим ВЧ-установкам промышленного типа. Для создания данного алгоритма за основу была взята методика, разработанная в работе [2].

Разработанный алгоритм управления процессом нагрева полимерных материалов представлен на рис. 1.

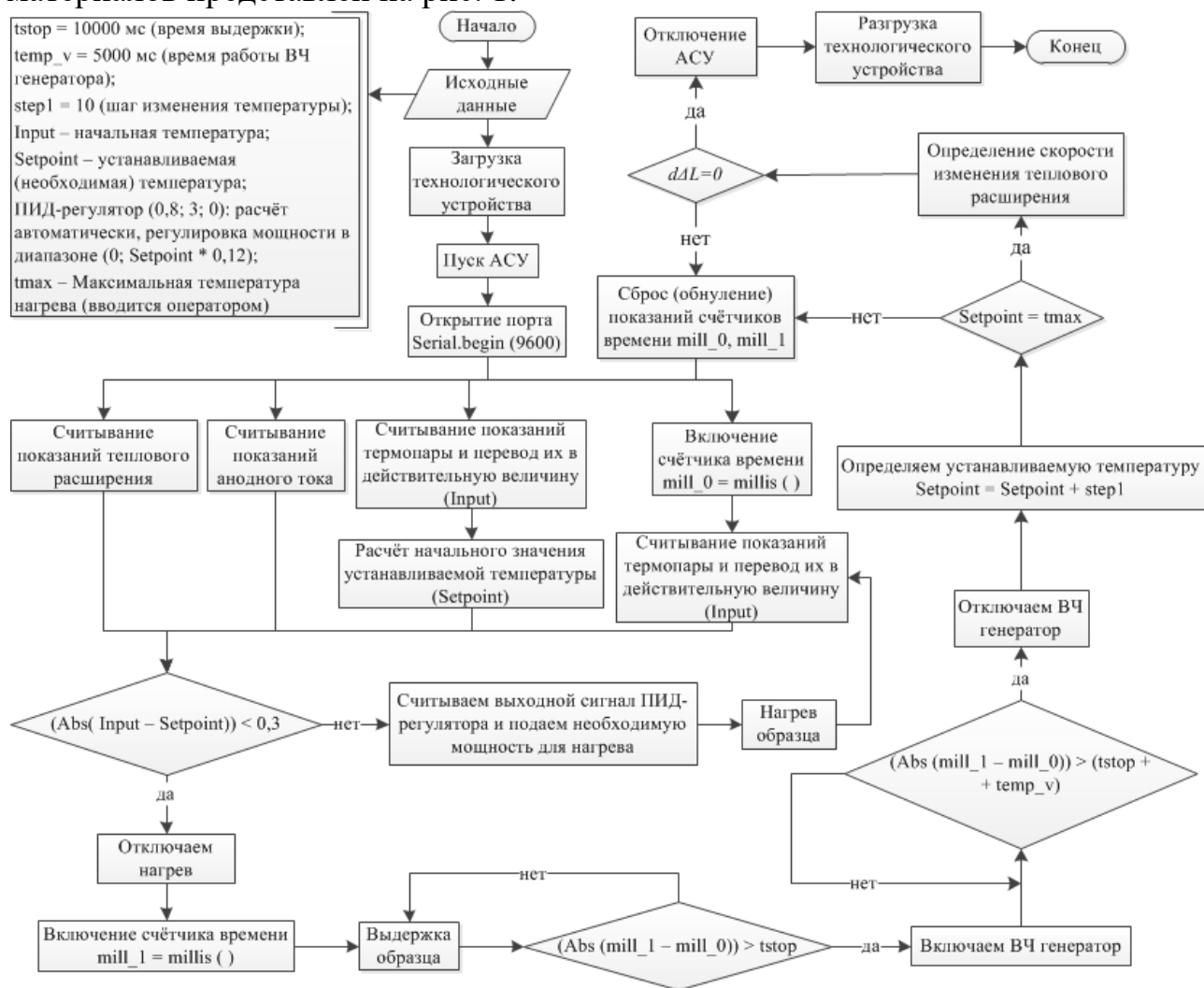


Рис. 1. Блок-схема алгоритма управления процессом нагрева

Алгоритм АСУ построен таким образом, что оператор имеет возможность изменять параметры работы системы в зависимости от исследуемого материала. Например, скорость нагрева регулируется за счёт поправочного коэффициента (в алгоритме этот коэффициент 0,12); процесс нагрева осуществляется до момента достижения образцом температуры плавления;

также регулируется периодичность включения ВЧ-генератора за счёт шага изменения температуры (step1).

Разработанный алгоритм системы управления процессом нагрева полимерных материалов имеет следующие особенности:

- он разработан по многозадачной схеме;
- схема построена по невытесняющему типу процедуры планирования;
- жестко прописаны приоритеты задач.

Данный алгоритм позволил приступить к задаче по проектированию блока автоматизации.

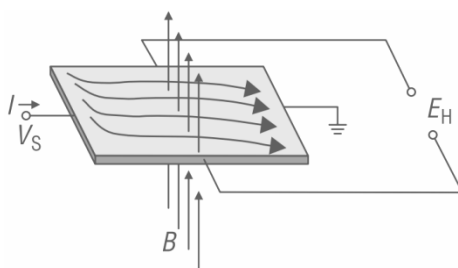
**Разработка и изготовление блока автоматизации процессом контроля фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах.** Разработка и изготовление блока автоматизации процесса велось на основе блока автоматизации процесса сушки (сварки) изделий ВЧ-излучением, представленного в работе [4] и блока автоматизации процесса диагностики методом высокочастотного излучения в работе [7]. Модернизация данных блоков осуществлялась с использованием следующих дополнительных устройств: нагревательный элемент, операционный усилитель, симисторный драйвер, датчик температуры (термопара), датчик теплового расширения.

Исполнительный механизм, производящий регулирование напряжения на обкладках рабочего конденсатора представлен в виде сервопривода на основе шагового двигателя марки «КВА-Planeta». Данный механизм предусматривает точный поворот подвижной пластины переменного конденсатора на заданный угол. За основу были взяты разработки, приведенные в работе [7].

В качестве исполнительного механизма, отвечающего за нагрев полимерного образца, был использован нагревательный элемент с плоской качественно обработанной поверхностью.

Контроль момента достижения образцом температуры плавления осуществляется датчиком теплового расширения, разработанным на базе микрометра часового типа.

Принцип работы датчика теплового расширения заключался в следующем. По тонкой пластине полупроводникового материала, как показано на рис. 2, протекает ток  $I$ . При наличии магнитного поля на движущиеся носители заряда (электроны) действует сила Лоренца. Эта сила искривляет траекторию движения электронов, что приводит к перераспределению объёмных зарядов в полупроводниковой пластине. Вследствие этого на краях пластины, параллельных направлению протекания тока, возникает разность потенциалов (э.д.с. Холла) [12].



**Рис. 2. Иллюстрация принципа работы датчика теплового расширения**

Для управления процессом электротермической обработки была использована микроконтроллерная плата промышленного логического контроллера семейства Arduino Mega 2560.

Возможности программируемого логического контроллера [11] считывать и обрабатывать наряду с аналоговыми и цифровые данные позволили организовать необходимую систему управления.

На рис. 3 изображена структурная схема блока автоматизации устройства электротермической обработки полимерных материалов.

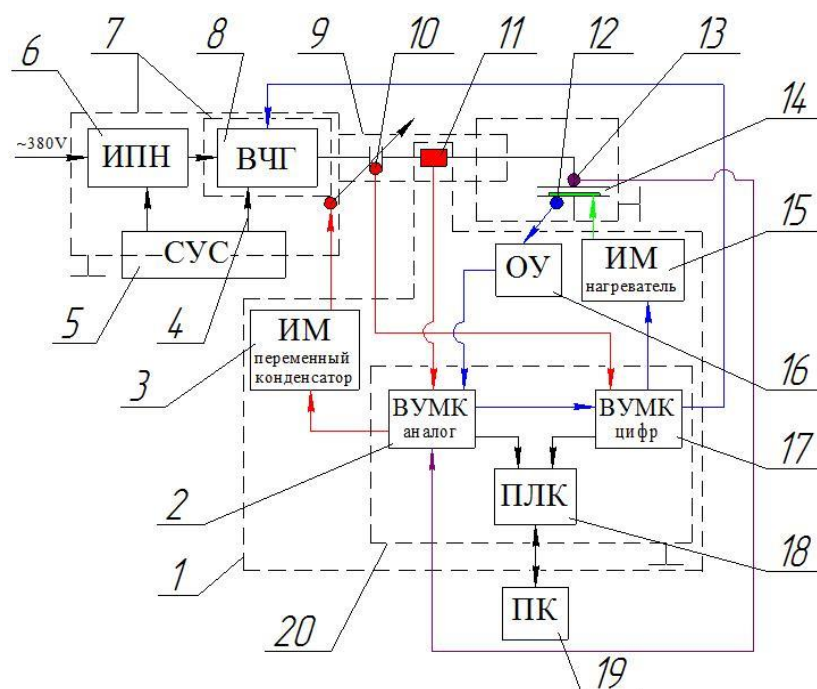
Особенностью разработанного в рамках данной работы блока автоматизации является то, что не вносятся изменения в существующие принципиальные электрические схемы устройств высокочастотной обработки и в разработанные блоки автоматизации ВЧ обработки. Блок легко изготавливается и может быть использован не только для исследовательских целей, но и для различных видов промышленной термической обработки изделий. Таким образом, созданная по данному алгоритму АСУТП, позволяет производить в автоматизированном режиме исследования фазовых превращений в полимерных материалах.

**Апробирование АСУ. Контроль фазовых и релаксационных превращений в полимерных материалах.** По разработанной методике [2] с применением созданной АСУТП проведены исследования взаимосвязей электрофизических параметров электротермического оборудования и полимерных материалов поливинилхлорид ОМБ-60, полиамид ПА6, стеклонаполненный полиамид (армамид ПА СВ 30-1 ЭТМ).

Размеры образцов подбирались согласно условия максимальной эффективности обработки на высокочастотной установке модели УЗП 2500, что соответствует площади образца в  $125 \text{ см}^2$ . Натурные испытания не были ограничены размерами, соответствующими максимальной мощности ВЧ-генератора и дополнительно был проведён ряд экспериментов с образцами меньших размеров.

Согласно разработанной методике [2] и АСУТП контроль параметров (анодный ток, температура, тепловое расширение) осуществлялся в режиме реального времени адаптированным программным комплексом PowerGraph, способным принимать данные с ПЛК за счёт созданного совместно с разработчиком оригинального драйвера. Драйвер был включён разработчиками в инсталляционный пакет PowerGraph.





**Рис. 3. Структурная схема блока автоматизации устройства:**

1 – блок автоматизации; 2 – вычислительное устройство микроконтроллера (аналоговые входы); 3 – исполнительный механизм переменного конденсатора; 4 – цепь управления генератором; 5 – система управления сигнализация; 6 – источник постоянного напряжения; 7 – экранирующий корпус; 8 – высокочастотный генератор; 9 – коаксиальный кабель; 10 – датчик угла поворота; 11 – линейный токовый датчик; 12 – термомпара; 13 – датчик теплового расширения; 14 – рабочий конденсатор; 15 – исполнительный механизм нагревательного элемента; 16 – операционный усилитель; 17 – вычислительное устройство микроконтроллера (цифровые входы/выходы); 18 – промышленный логический контроллер; 19 – персональный компьютер; 20 – помехозащищенный корпус

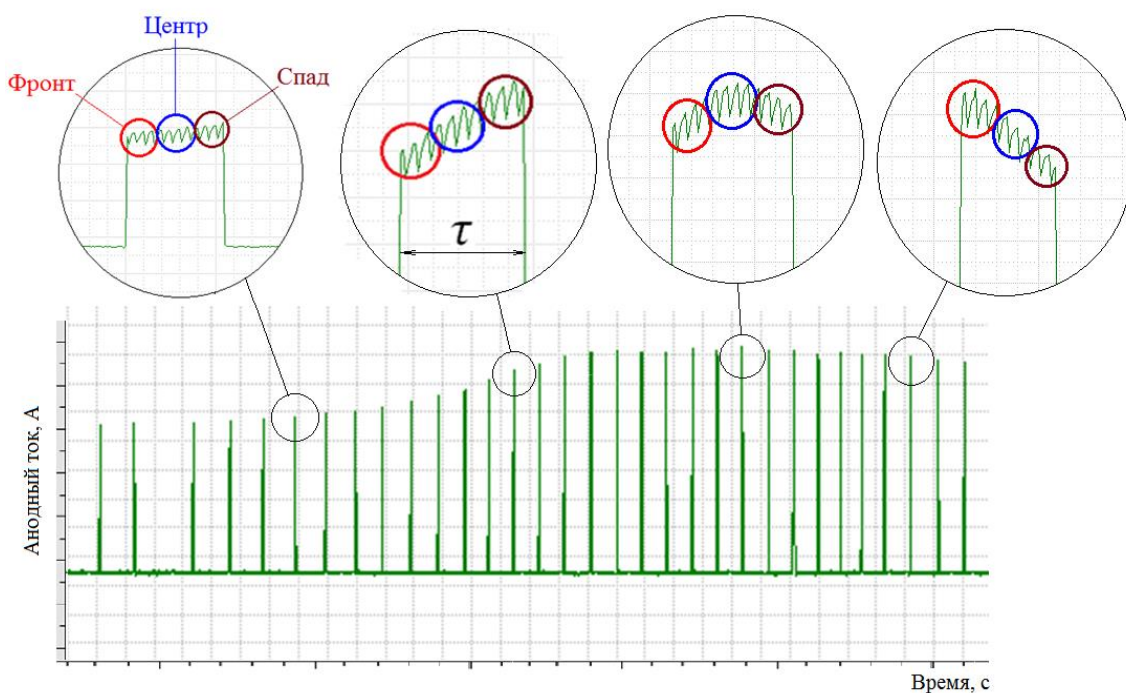
Полученные данные использовались для обработки (построения графиков), с дальнейшим их анализом.

Графический вид полученной информации по каналу анодного тока  $I_a$  представлен на рис. 4. Анализ полученных данных позволил построить зависимости анодного тока от температуры  $I_a = f(T)$ .

Согласно разработанному алгоритму АСУТП, описанному ранее, разогреваемый полимерный образец на определённый промежуток времени  $\tau$  подвергается ВЧ-излучению. Необходимо отметить, что вне зависимости от времени воздействия ВЧ-излучение оказывает влияние на полимер, т. е. образец выделяет тепло, что представлено полученными экспериментальными данными (рис. 4). Степень воздействия определяется диэлектрическими свойствами обрабатываемого материала.

В соответствии с вышесказанным, в рамках настоящего исследования была определена некоторая постоянно возникающая зависимость анодного тока от времени импульсного ВЧ-воздействия. Наиболее показательные изменения были обнаружены при ВЧ-обработке ПВХ (рис. 4). В связи с

этим, ширина высокочастотного импульса анодного тока была условно разделена на три участка, которым были присвоены следующие названия: начало (фронт), центральная область и конец (спад).



**Рис. 4. Контроль анодного тока в программном комплексе PowerGraph**

Участок фронта характеризуется переходными процессами, происходящими в рабочем конденсаторе при включении ВЧ-генерации (например, зарядка конденсатора). Аналогичные процессы наблюдаются на участке спада.

Полученные экспериментальные данные позволили построить зависимости  $I_a = f(T)$  по всем трём участкам, представленные на рис. 5. Анализ данных позволяет сделать вывод, что для всех областей высокочастотного импульса на всех исследованных материалах наблюдается одинаковая тенденция изменения анодного тока от температуры с хорошо просматриваемыми максимальными и минимальными значениями анодного тока.

Полученные экспериментальные данные позволили построить зависимости теплового расширения от температуры  $\Delta l = f(T)$ , на которых отчетливо просматривается начало плавления полимерных образцов. Совмещая построенные зависимости теплового расширения и анодного тока, как показано на рис. 6 – 8, получаем, что изменение фазового состояния (начало плавления) соответствует первому минимуму значений анодного тока.

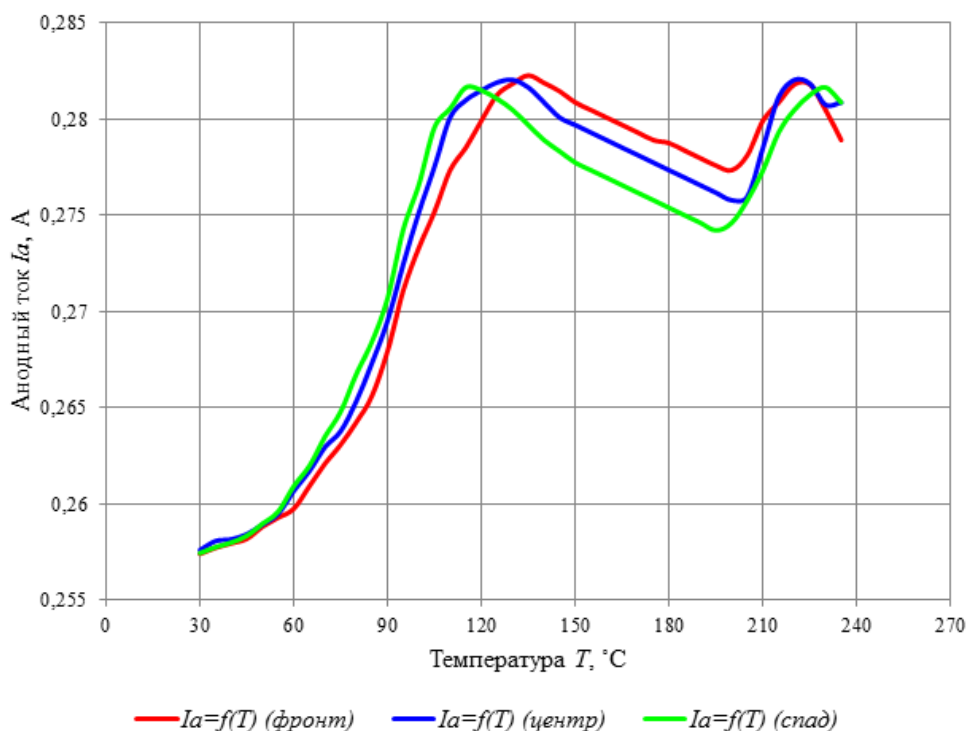


Рис. 5. Зависимости  $I_a=f(T)$  по ширине ВЧ-импульса для материала ПА6

Хорошо просматривается состояние первого максимума анодного тока, связанного с сегментальной подвижностью полярных групп.

Также, в рамках настоящего исследования были определены скорости изменения анодного тока от температуры  $dI_a = f(dT)$ , представленные на рис. 6б, 7б, 8б, методом левой конечной разности первого порядка аппроксимации.

Использование подобных зависимостей позволило организовать контроль соответствия текущего значения  $I_a$  экстремумам  $tg\delta$  в виде контроля достижения  $dI_a/dT$  нулевого значения.

На кривых скорости изменения анодного тока также просматриваются экстремумы. На данном этапе исследования тяжело судить о том, какие структурные изменения произошли в момент теплового перехода, соответствующего экстремумам скорости изменения анодного тока, но, опираясь на литературные источники, можно предположить, что данные переходы относятся к релаксационным переходам, а именно переход из кристаллического состояния в стеклообразное и из стеклообразного в высокоэластичное.

**Выводы.** На основе проведенных исследований были получены следующие результаты:

3. Разработан алгоритм автоматизированного исследования, реализованный в виде программного обеспечения и автоматизированной системы управления процессом контроля структурных превращений в полимерных материалах.

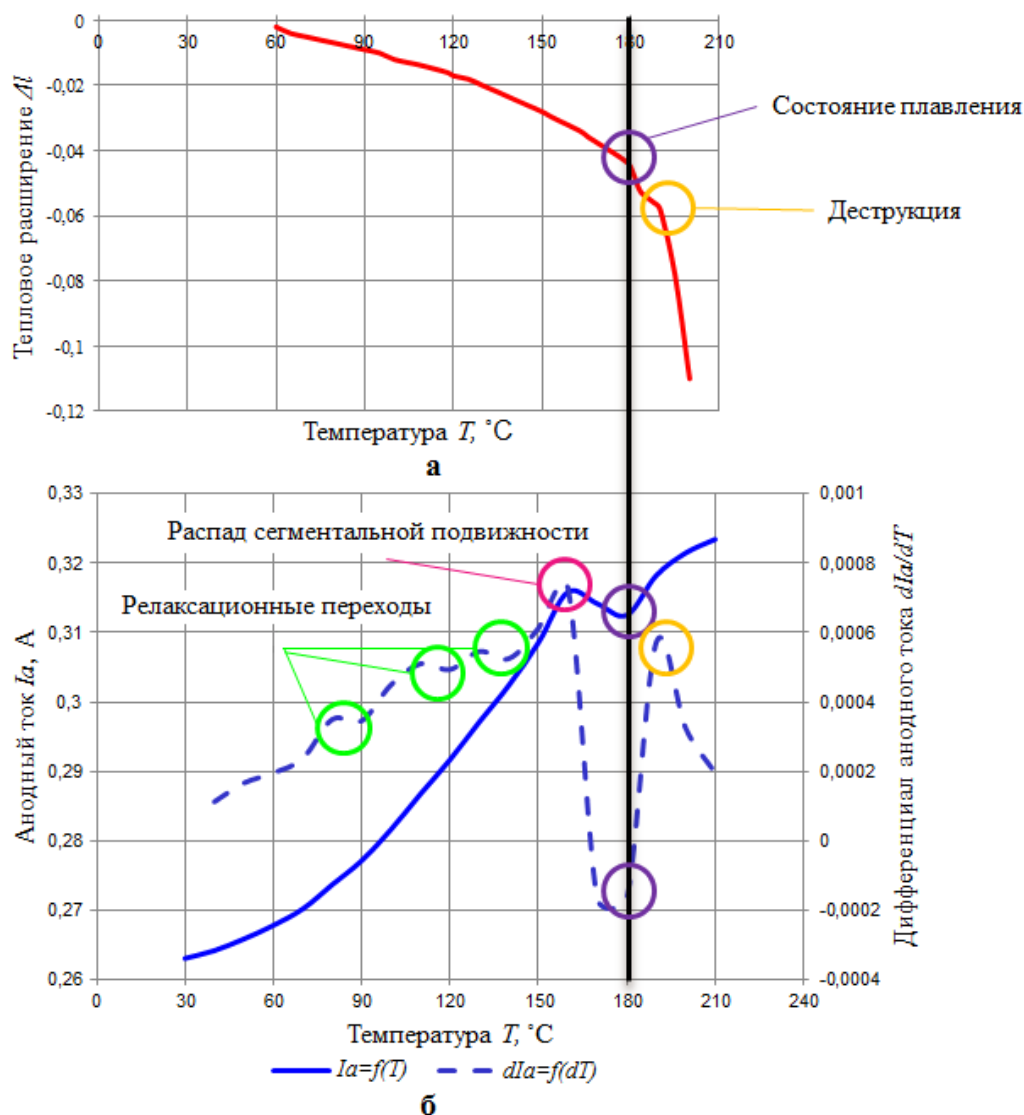


Рис. 6. Зависимости: а –  $\Delta l=f(T)$ , б –  $I_a=f(T)$  и  $dI_a=f(dT)$  (материал: ПВХ ОМБ-60)

4. Сформирован комплекс контролируемых и управляемых параметров контроля изделий из полимерных материалов и критерии их оценки.

3. Для полимерных образцов различных геометрических форм и размеров были получены взаимовлияния электрофизических параметров технологической системы с фазовыми и релаксационными превращениями в термопластах.

Все это позволило создать технические и технологические решения организации процесса управления термообработкой полимерных материалов в поле высокой частоты, а созданная, на основе разработанного алгоритма, автоматизированная система управления электротермией позволяет на качественно новом уровне производить технологические процессы сушки, сварки и термоупрочнения изделий из природных, искусственных и синтетических полимерных материалов с бесконтактным определением его нагрева до эффективных температур обработки.

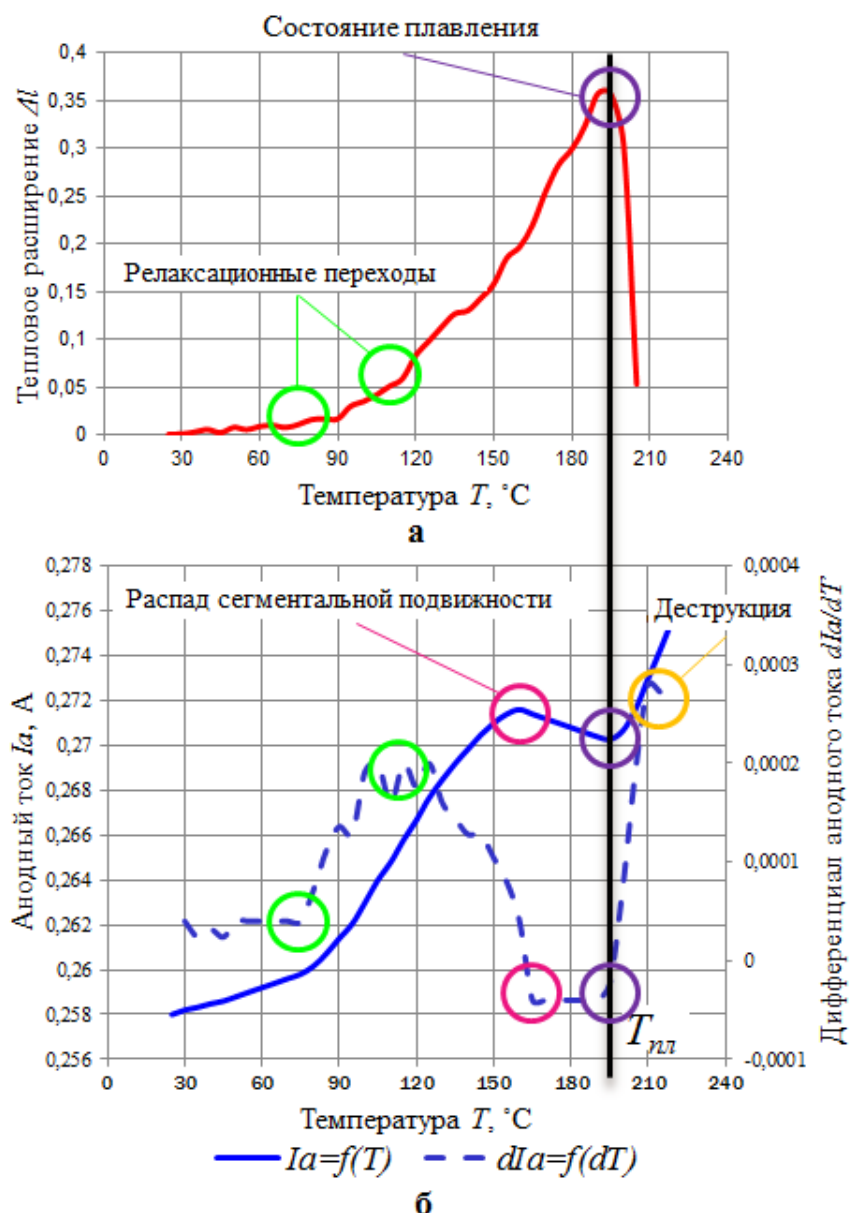
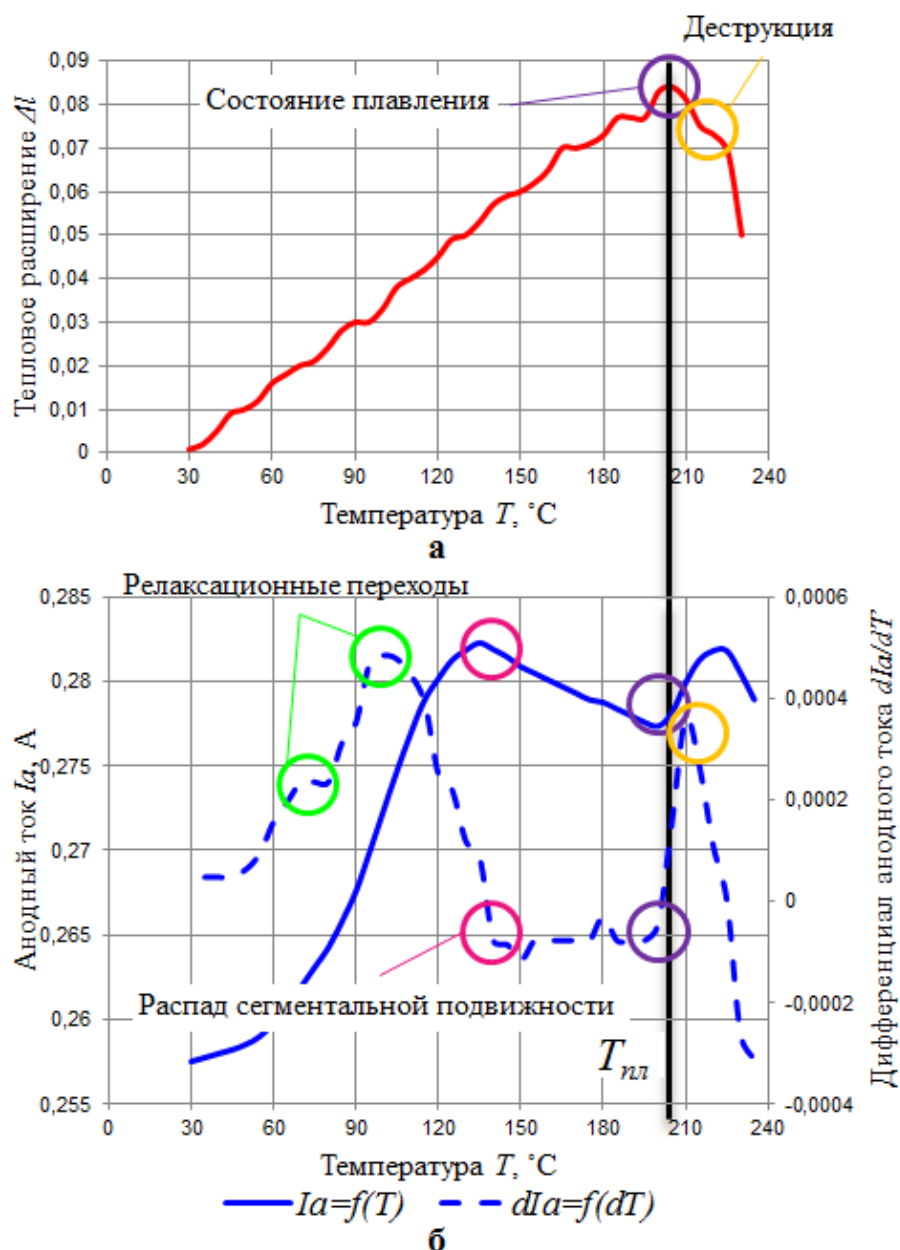


Рис. 7. Зависимости: а –  $\Delta l=f(T)$ , б –  $I_a=f(T)$  и  $dI_a=f(dT)$  (материал: Армамид)

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Еренков, О. Ю. К вопросу о регулировании надмолекулярной структуры полимерных материалов путём термообработки / О. Ю. Еренков, Р. С. Мазин – Режим доступа: [http://www.science-bsea.bgita.ru/2011/mashin\\_2011\\_1/erenkov\\_vopros.htm](http://www.science-bsea.bgita.ru/2011/mashin_2011_1/erenkov_vopros.htm)
2. Буторин, Д. В. Разработка методики определения структурных превращений в полимерных материалах / Д. В. Буторин, Н. Г. Филиппенко, С. Н. Филатова, А. В. Лившиц, С. К. Каргапольцев // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2015. – Вып. 4(48). – С. 80 – 86.



**Рис. 8. Зависимости: а –  $\Delta l=f(T)$ , б –  $I_a=f(T)$  и  $dI_a=f(dT)$  (материал: полиамид ПА6)**

3. Попов, С. И. Автоматизация управления технологическими процессами восстановления эксплуатационных свойств полимеров: дис. ... кан. тех. наук: 05.13.06 / Попов Сергей Иванович. Иркутск, 2013. – 150 с.
4. Филиппенко, Н.Г. Автоматизация управления процессом высокочастотной обработки полимерных материалов: дис. ... кан. тех. наук: 05.13.06 / Филиппенко Николай Григорьевич. Иркутск, 2012. – 161 с.
5. Румынский, С. Н. Автоматизированная система управления процессом сварки изделий из полиамида: дис. ... кан. тех. наук: 05.13.06 / Румынский Сергей Николаевич. СПб., 2005. – 133 с.
7. Ларченко, А. Г. Система автоматизированного управления высокочастотным диагностированием при производстве и эксплуатации изделий из полимерных материалов: дис. ... кан. тех. наук: 05.13.06 / Ларченко Анастасия Геннадьевна. Иркутск, 2014. – 164 с.

8. Филиппенко, Н. Г. Система управления и блок устройства автоматизации высокочастотной обработки полимерных материалов [Электронный ресурс] / Н. Г. Филиппенко, С. К. Каргапольцев, А. В. Лившиц // Материалы международной научно-практической конференции «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании 2011»: докл. Междунар. конф. – 2011. – Режим доступа: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/transportation-411/maintenance-and-repair-of-transportation-411/11637-411-0277>
9. Лушнейкин, Г.А. Методы исследования электрических свойств полимеров – М.: Химия, 1988. – 160 с.
10. Волович, Г. Интегральные датчики Холла [Текст] // Современная электроника – 2004. – Вып. 12. – С.26-31
11. Arduino. Arduino Mega 2560 – Режим доступа: <http://arduino.ru/Hardware/ArduinoBoardMega2560>

УДК 539.538

*Н.Г. Филиппенко, Д.В. Буторин, Г.С. Солодов*

### **АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ САМОВОССТАНОВЛЕНИЕ ТЕРМОПЛАСТОВ ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ПОЛЕМ**

*В работе рассматриваются задачи определения условий самовосстановления целостности структуры полиамидных материалов в процессе их эксплуатации. Для нахождения способов определения усталостных разрушений использованы предложенные и развиваемые авторами методы их определения с учетом реальных метеоклиматических условий эксплуатации на примере подвижного состава ОАО РЖД. Разработан способ высокочастотного электротермического самовосстановления образцов стеклонеполненного полиамида и получены экспериментальные данные, подтверждающие процесс восстановления свойств полимерных материалов.*

*Ключевые слова: термопласты, полиимиды, залечивание покрытий, самовосстановление, высокочастотное излучение.*

Конструкционные материалы, в том числе это относится и к полимерным материалам, разрабатываются исходя из парадигмы «предотвращения повреждения», а не «управления повреждением». При этом применение самовосстанавливающихся материалов открыли огромные возможности, особенно в тех случаях, когда необходимо обеспечить надежность материалов на как можно более длительный срок. Кроме того, самовосстановление идеально для материалов, склонных к повреждениям, например, в случаях с поверхностными трещинами.

Последние десятилетия характеризуются ростом производства полимерных конструкционных материалов и использованием изделий из них во всех отраслях промышленности. Как было определено авторами [1, 2] ряд полиамидных материалов в большинстве случаев отбраковываются в процессе их эксплуатации по причинам образования усталостных трещин.

Поэтому самовосстановление изделий из полимерных материалов особенно в труднодоступных зонах является актуальной задачей.

В связи с этим целью данного исследования стала разработка алгоритма процесса самовосстановления механических свойств изделий из полимерных материалов.

Для достижения поставленной цели авторами были определены следующие задачи:

Определение способов самовосстановления полимерных материалов

Обоснование возможности обнаружения повреждений в изделиях из полимерных материалов

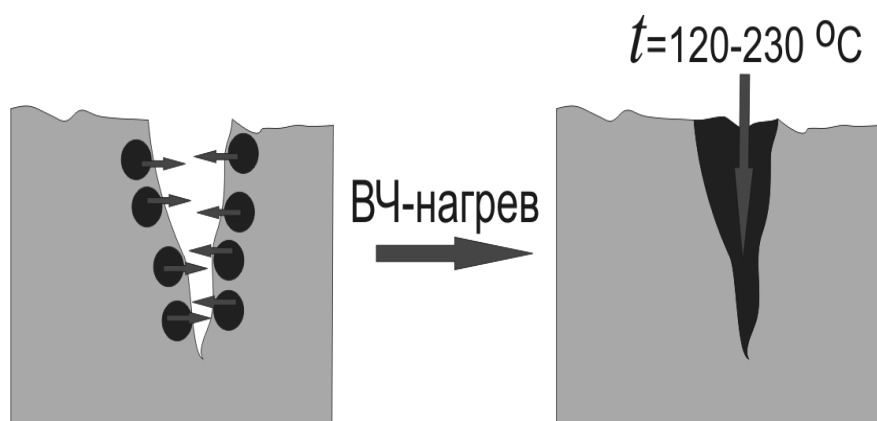
Алгоритм формирования сигнала инициирующего процесс восстановления

Определение эффективности регенерации материала

Самовосстанавливающиеся материалы — это материалы, способные частично или полностью восстанавливать повреждения, например, образовавшиеся трещины. Одним из их самых выдающихся свойств биологических материалов является способность к самовосстановлению и регенерации своих функций после получения внешних механических повреждений. В природе самовосстановление может происходить как на уровне единичных молекул (например, восстановление ДНК), так и на макроуровне: срастание сломанных костей, заживление поврежденных кровеносных сосудов и т.д. Эти процессы знакомы всем, однако, конструкционные материалы, в большинстве случаев не обладают подобной способностью к самовосстановлению.

В настоящее время, полимеры (и их композиты) являются наиболее изученной категорией материалов в контексте способности к самовосстановлению. Так, например, для инженерных целей разрабатываются различные стратегии и подходы для создания технологий самовосстановления материалов. Исследования показали, что в частности, для термопластических полимеров необходимым условием восстановления повреждения является формирование подвижной фазы, которая сможет "затянуть" за счет сил поверхностного натяжения трещину (рис. 1). В зависимости от используемого материала для полимеров (и их соединений) необходимо (избирательно в зоне трещин) создать температуру в пределах 120-230°C.



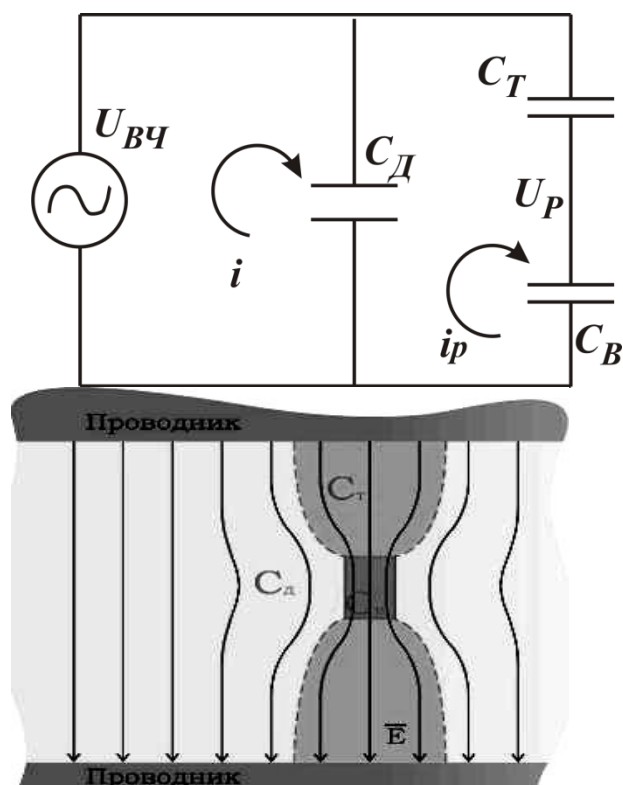


**Рис.1. Общий принцип самовосстановления материалов**

После возникновения трещины внешнее воздействие (в показанном случае высокочастотное излучение) образует “подвижную фазу”. Дальнейшее воздействие излучения и силы поверхностного натяжения производят закрытие трещины “подвижной фазой”. Последующее остывание инициирует процесс иммобилизации (создание неподвижности поврежденной области) после восстановления.

Многочисленные исследования авторов [1, 2] показали, что промышленное оборудование ВЧ-нагрева обладает возможностью избирательного нагрева в полимерных материалах. Более того именно в местах раздела сред и концентраторах напряжения, которыми и являются образовавшиеся в процессе эксплуатации трещины, будет повышенное воздействие высокочастотной энергии. Все это было принято в рамках данного исследования за основу дальнейших изысканий.

Образовавшиеся микротрещины на поверхности и внутри полимера сопровождается образованием неоднородностей в материале с газовыми или другими включениями. Высокоэнергетическое воздействие электромагнитным полем вызывает возникновение в данных неоднородностях микроразрядов. Модель таких включений при обработки материала электромагнитным полем можно рассматривать как следующую эквивалентную схему замещения, представленную на рис. 1 [3, 4].



**Рис. 2. Принципиальная и эквивалентная схема полимера с газовым или жидким включением в электрическом поле**

Емкость  $C_B$  представляет собой включение, образовавшееся в процессе эксплуатации (например газовое).  $C_T$  емкость оставшегося без повреждений полимера, для которого силовые линии поля общие с газовым.  $C_D$  емкость остальной части полимера

Напряженность электрического поля в включении превышает напряженность поля в остальной части полимера, т.к. диэлектрическая проницаемость полимера ниже проницаемости материала включения.

Согласно схемы замещения напряжение на включении будет определяться следующим образом:

$$U_B = \frac{C_T}{C_T + C_B} \cdot U_{ВЧ} \quad (1)$$

Емкость конденсатора зависит от диэлектрической проницаемости  $\epsilon$  материала полимера, площади обкладок  $S$  и расстояния между ними  $d$ :

$$C = \frac{\epsilon \cdot \epsilon_0 \cdot S}{d} \quad (2)$$

Приняв, что площади обкладок емкостей  $C_B$  и  $C_T$  равны, т.к. образовавшаяся трещина делит условно на два равных по длине противоположных участка разрыва и приняв за материал включения воздух ( $\epsilon = 1$ ) можно определить, что:

$$U_B = \frac{1}{1 + \frac{C_B}{C_T}} \cdot U_{BЧ} = \frac{U_{BЧ}}{1 + \frac{d_T}{d_B \cdot \epsilon_T}} \quad (3)$$

где  $d_T$  — толщина полимера  
 $d_B$  — толщина включения

Прикладываемое напряжение вызывает накопление поверхностного заряда на границе включения и остального полимера. При достижении напряжения величины ионизации материала включения  $U_{II}$  произойдет разряд емкости в включении. При этом напряжение разряда будет равно:

$$U_P = U_{II} \left( \frac{d_T}{\frac{d_B}{\epsilon_T} + 1} \right) \quad (4)$$

При разряде в газовом или ином включении напряжение  $U_{II}$  падает до величины  $U_K$ . Величина изменения напряжения  $\Delta U_B = U_{II} - U_K$  в большинстве случаев равна  $\Delta U_B \approx U_{II}$ .

Отсюда можно сделать вывод, что показателем наличия дефектов в изделиях из полимерных материалов, при их обработке высокочастотным электрическим полем могут быть микроразряды, возникающие на поверхностях трещин (включений). При этом падение напряжения в момент разряда вызовет изменение электрофизических показателей работы электротермического ВЧ-оборудования. Наиболее информативным показателем работы ВЧ-оборудования, как было неоднократно доказано [5] является  $I_{ан}$  анодный ток. Необходимо также отметить, что любое электротермическое оборудование штатно снабжено таким устройством контроля. Поэтому авторами за стимулирующий сигнал начала регенерирования полимера был принят показатель динамического изменения анодного тока  $I_{упр ан}$  работы ВЧ-генератора, указывающего на наличие дефектов в полимерных материалах.

Восстановление изделия (после диагностики) ведется при выбранных заранее режимах работы  $I_{ан}$  регенерации на ВЧ-оборудовании, с последующем повторным контролем качества обработки.

Алгоритм самовосстановления изделий из полимерных материалов показан на рис. 2.

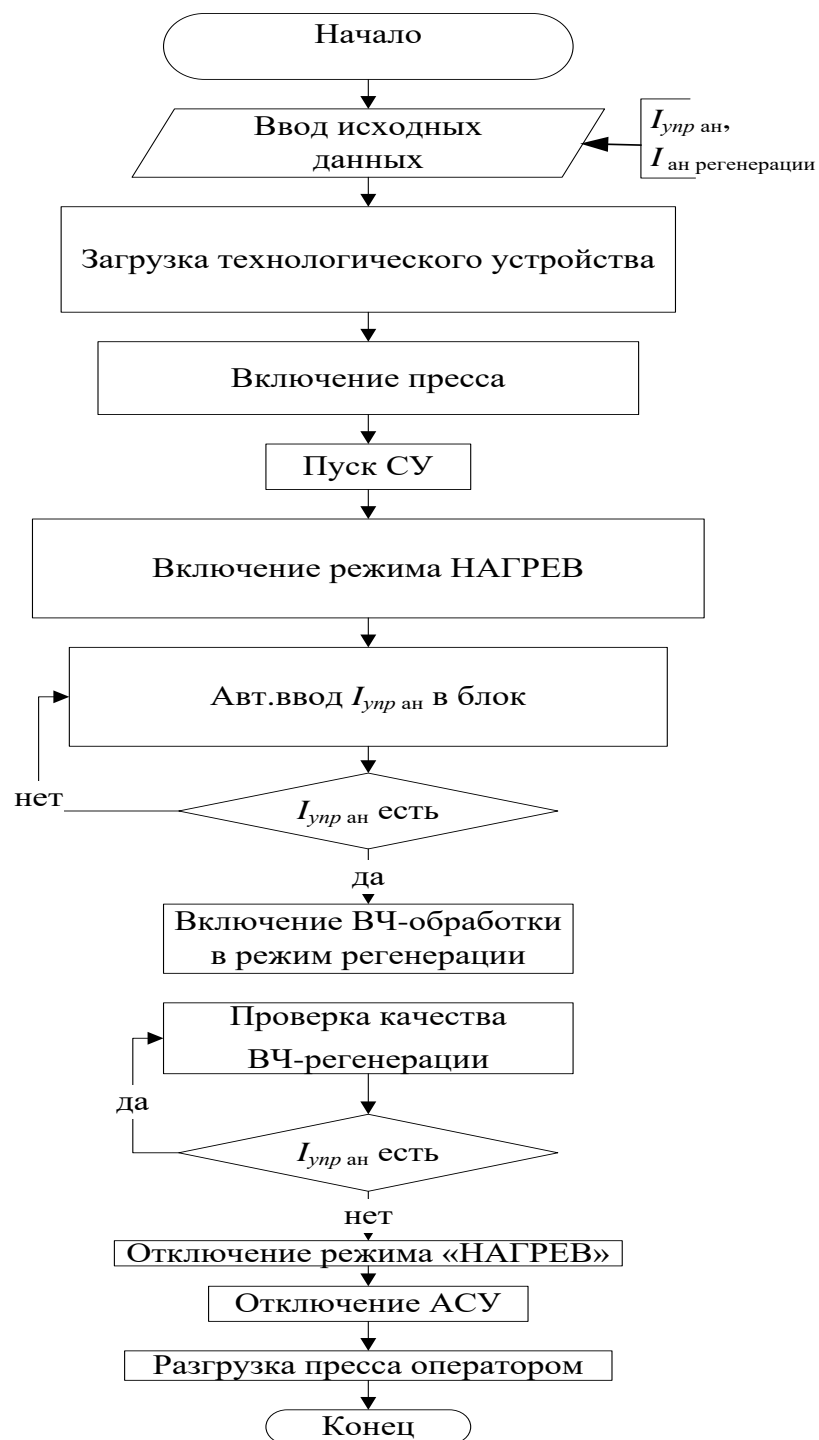
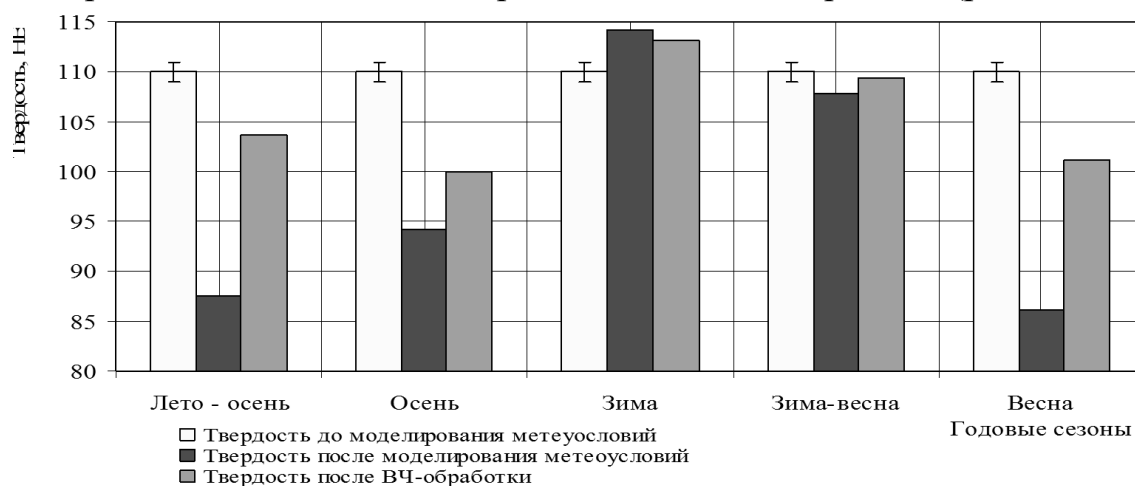


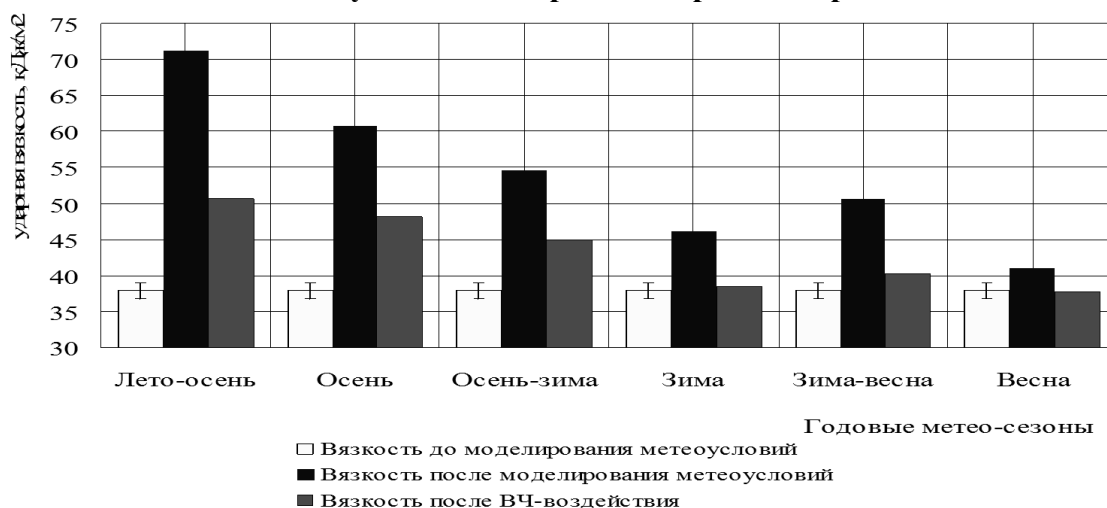
Рис. 3. Алгоритм самовосстановления изделий из полимерных материалов

Экспериментальные исследования восстановления прочностных характеристик образцов полиамида марки ПА-66 производились с использованием методики в соответствии с нормативными требованиями [6, 7]. Образцы помещались в смоделированные условия эксплуатации, соответствующие реальным условиям Западной и Восточной Сибири. Для этого в ходе настоящих исследований была определена кинетика разрушений полиамидных материалов в процессе из эксплуатации [8]. Также были найдены наиболее опасные факторы, влияющие на трещинообразование,

что и послужило основанием построения моделей эксплуатации. Результаты практических испытаний представлены на диаграммах (рис.4, 5).



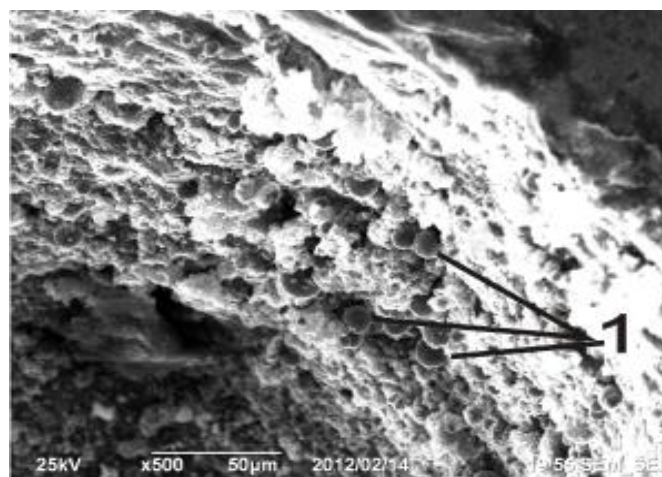
**Рис. 4. Результаты измерений твердости образцов**



**Рис. 5. Результаты измерений ударной вязкости образцов**

Анализ полученных данных доказывает, что прочностные характеристики образцов полиамида марки ПА-66, (используемого для изготовления сепараторов подшипников буксовых узлов подвижного состава) после ВЧ-обработки были не только восстановлены, но и в ряде случаев превысили свои первоначальные значение.

Объясняется это особенностью полиамида впитывать влагу (до 8%), снижая свои прочностные характеристики даже в процессе хранения. Более того в ходе исследований было определено, что после ВЧ-восстановления армирующие нити стекловолокна в местах их выхода на поверхность оплавляются (Рис. 5. поз. 1) в процессе электротермического нагрева, «сшивая края» и создавая «напряженную арматуру» стягивающую изделие из полиамида. Данная структура отчетливо видна на снимке, сделанном в ходе исследований (Рис. 5).



**Рис. 6. Структура поверхности восстановленного полиамида**

В результате проведенных исследований авторами был разработан и реализован с удовлетворительными результатами на установке электро-термического нагрева модели УЗП 2500 алгоритм самовосстановления в ВЧ-поле полимерных материалов.

### **БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Лившиц А.В., Машиович А.Я. Филиппенко Н.Г.* Аспекты электротермической обработки материалов электромагнитным полем высокой частоты // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* 2011. Вып. 2. (30). С.135–140.
2. *Попов С. И., Лившиц А. В., Филиппенко Н. Г.* Восстановление подшипников буксовых узлов подвижного состава// *Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции «Научные исследования и их практическое применение. Современное состояние и пути развития 2012».* – Выпуск 3. Том 2 . – Одесса: КУПРИЕНКО, 2012., С. 499
3. *Martin D. Hager, Peter Greil, Christoph Leyens, Sybrand van der Zwaag and Ulrich S. Schubert.*“Self-Healing Materials”//*Advanced Materials.* 2010., С. 223
4. *Swapan Kumar Ghosh,* *Self-healing Materials: Fundamentals, Design Strategies, and Applications ISBN: 978-3-527-31829-2 //, Wiley-VCH* 2009., С. 312
5. *Филиппенко Н.Г.* Математическая модель процесса высокочастотной обработки полимерных материалов // *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование.* – 2012. – Вып. 1 (33). С. 76 – 79.
6. ГОСТ 10589–87 Полиамид 610 литьевой. – М.: Изд-во стандартов, 1987., – 12 с.
7. ГОСТ 22372–77. Материалы диэлектрические. Методы определения диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь.– М.: Изд-во стандартов, 1977. – 12 с.
8. *Ибатуллин И.Д.* Кинетика усталостной повреждаемости и разрушения поверхностных слоев: монография / И.Д. Ибатуллин – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. –387 с.: ил.

## АЛГОРИТМ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ КРАН-БАЛКИ НА СКЛАДЕ МАГНЕТИТА В ПРОЦЕССЕ ПРИГОТОВЛЕНИЯ МАГНЕТИТОВОЙ СУСПЕНЗИИ

*Предложен алгоритм передвижения кран-балки с целью сокращения времени рабочего цикла загрузки магнетита в баки приготовления магнетитовой суспензии. Система «изучает» поверхность склада и автоматически выбирает направление для перемещения крана на основе значений высоты насыпи магнетита на складе.*

Ключевые слова: кран-балка, обогащение угля, система автоматического управления, алгоритм перемещения.

**Введение.** В настоящее время большое количество промышленных объектов автоматизируется с целью увеличения производительности и качества выполняемых работ, уменьшения времени их выполнения и сокращения влияния человеческого фактора. На автоматизированных складах большое внимание уделяется именно сокращению времени выполнения операций загрузки-выгрузки материалов и качеству выполняемых процессов. Причем автоматизированный склад с материалом для обогащения угля следует рассматривать как целый комплекс технических средств: кран-балка, электромагнит для загрузки магнетита с поверхности склада, система безопасности передвижения крана, система позиционирования, баки приготовления магнетитовой суспензии.

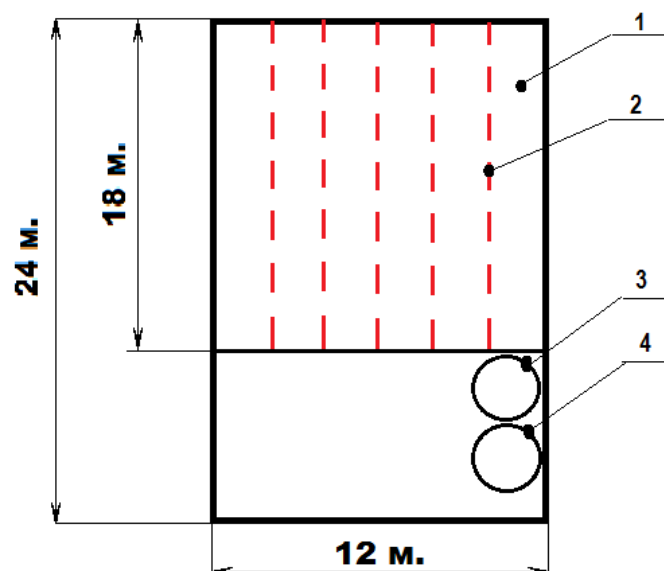
Для более быстрого выполнения операций по загрузке-выгрузке магнетита необходимо разработать специальный алгоритм передвижения, учитывающий ключевые особенности данного крана.

Целью данного исследования является разработка такого алгоритма передвижения кран-балки, который бы позволил выбирать наиболее высокие точки поверхности насыпанного материала на полу склада, что ускорило бы процесс приготовления магнетитовой суспензии.

Алгоритм планируется реализовать следующим образом: при первом прохождении кран-балки необходимо «изучить» поверхность насыпи, чтобы выделить наивысшие точки, а при остальных – выбирать точки, ближайшие к емкостям приготовления суспензии.

Для того, чтобы «изучить» поверхность насыпи, принято решение разместить на балке пять датчиков (лазерные дальномеры), направленных вниз, на поверхность материала. Во время передвижения крана будут формироваться так называемые «линии изучения». На каждой линии будет по двенадцать контрольных точек, расположенных через равные расстояния.

На рисунке 1 изображена схема склада магнетита.



**Рис. 1. Схема склада с системой автоматического управления приготовления магнетитовой суспензии:**

- 1 – Область склада, заполненная магнетитом;
- 2 - Линии «изучения поверхности»;
- 3 – Емкость для приготовления магнетитовой суспензии №1;
- 4 – Емкость для приготовления магнетитовой суспензии №2.

При прохождении кран-балкой контрольной точки (прохождение фиксируется системой позиционирования) значение с лазерного дальномера обрабатывается ПЛК склада и записывается в память в формате двумерной матрицы вида

$$\begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 & \dots & l_{12} \\ x_1 & x_2 & x_3 & \dots & x_{12} \end{bmatrix},$$

где  $l_{1,2,\dots,12}$  - значения высоты поверхности материала, обработанные контроллером;

$x_{1,2,\dots,12}$  - значения положения контрольных точек.

Таким образом, на этапе «ознакомления» системы с поверхностью насыпного материала во время первого прохода будет сформировано пять матриц со значениями высот поверхности в каждой контрольной точке.

Кран-балка передвигается до конца склада, т.е. до емкостей приготовления суспензии и останавливается в некоторой конечной точке. Система на данном этапе обрабатывает полученные данные и по отдельно разработанному алгоритму выбирает матрицу с наибольшими высотами.

Критериями выбора такой матрицы являются:

1. матрицы, ближайšie к бакам приготовления магнетитовой суспензии имеют более высокий приоритет и рассматриваются в первую очередь;
2. значения матриц, в контрольных точках, ближайших по расположению к бакам приготовления магнетитовой суспензии имеют более высокий приоритет и анализируются в первую очередь;



Таким образом, при загрузке материала с высот поверхности, находящихся как можно более близко к зоне приготовления магнетитовой суспензии, можно значительно сократить время выполнения операций приготовления суспензии.

В конечном виде алгоритм можно описать следующим образом:

1. Этап «изучения».

На данном этапе кран-балка проходит склад по длине, двигаясь от начала склада до зоны приготовления магнетитовой суспензии. Во время движения в системе записываются данные о высотах поверхности, измеренные датчиком и обработанные контроллером в каждой из двенадцати контрольных точек.

2. Этап выбора.

На данном этапе система по специальным критериям выбора обрабатывает данные, полученные на первом этапе, и выбирает одну матрицу с наибольшими значениями.

3. Этап загрузки материала.

Кран-балка начинает движение до точки поверхности, определенной на втором этапе алгоритма. Независимо от этапа работы, если при передвижении кран-балка проходит через контрольную точку, то текущее значение высоты будет перезаписано в памяти контроллера. Это позволит работать только с актуальными данными.

4. Этап выгрузки материала и приготовления магнетитовой суспензии.

На данном этапе кран-балка движется до баков приготовления магнетитовой суспензии и выгружает материал. Баки предварительно заполнены водой. Датчики плотности измеряют текущую плотность суспензии. Если материала недостаточно для соблюдения заранее заданной технологии приготовления, то кран-балка продолжает загрузку материала, работая как на втором этапе алгоритма. Если же количество магнетита достаточно для соблюдения технологии, цикл приготовления завершен. Дальнейшие циклы работы начинаются со второго этапа. Однако, если имело место изменение поверхности склада, независящее от работы крана (очистка, наполнение склада или иное), то работа кран-балки начинается с первого этапа.

**Заключение.** Данный алгоритм позволит значительно сократить время загрузки-выгрузки материала без потери качества и надежности работы. Критерии выбора высот поверхности магнетита подобраны таким образом, чтобы уменьшить время выполнения каждого цикла. В дальнейшем при работе над алгоритмом планируется более точно сформулировать алгоритм выбора по критериям, основываясь на реальных данных, которые можно будет получить с модели склада. При работе с реальными данными будет возможно скорректировать данный алгоритм и выявить возможные недостатки. Кроме этого планируется реализация возможности повышения скоро-

сти движения за счет активного гашения колебаний кран-балки, возникающих при быстрых передвижениях с грузом.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Абрамович И.И., Березин В.Н., Яуре А.Г.* Грузоподъемные краны промышленных предприятий: Справочник – М.:Машиностроение, 1989. – 360с.: ил.
2. *Добронравов С.С., Дронов В.Г.* Строительные машины и основы автоматизации: Учеб.для строит. вузов. – М.: Высш. шк., 2001. – 575 с.: ил.

## **РАЗДЕЛ VII. ЭЛЕМЕНТЫ И УСТРОЙСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ**

УДК 681.3.06(075.8)

*А.Ю. Мухомов*

### **СТРУКТУРНО-АВТОМАТНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ**

*Предлагается новый метод автоматного программирования, основанный на структурной схеме автоматов нового типа, в которых из всего множества входных условий выбирается одно (единственное) логическое условие, которое подается на вход комбинационной схемы автомата совместно с кодом состояния.*

*Ключевые слова: автоматы нового типа, программирование, управляющий алгоритм.*

В последнее время основой программирования по сложным управляющим алгоритмам является переход к программным кодам с явно выделенными состояниями (UML технологии и др. [1, 2]).

В связи с широким использованием теории автоматов появились идеи применения автоматного подхода в программировании [3-6]. Возникла новая парадигма программирования – автоматное программирование, согласно которому программа представляется как модель абстрактного автомата. Процесс исполнения граф-схемы алгоритма (ГСА) при программировании в этой технике практически точно воспроизводит методы составления абстрактных автоматов. Это позволяет проектировщикам работать на высоком уровне обобщения и разрабатывать эффективные программы. Метод профессора Шалыто А.А. хорошо проработан как в теоретическом, так и в инженерном плане [4].

В статье, который назван структурно-автоматным. Структурное автоматное программирование – это метод программирования, основанный на структурной схеме автоматов нового типа, в которых из всего множества входных условий выбирается одно (единственное) логическое условие, которое подается на вход комбинационной схемы автомата совместно с кодом состояния. Для определения номера выбираемого условия вводится специальная комбинационная схема, адресом которой является код текущего состояния автомата. Методика анализа и синтеза автоматов нового типа рассмотрена в работе [7].

Перед началом программирования составляется детальный алгоритм управления реальным операционным устройством или технологическим

процессом, формализованная запись которого производится в виде граф-схемы алгоритма (ГСА).

Сущность нового метода структурного программирования сводится к следующему. Считается изначально заданным алгоритм, подлежащий переводу в программный код, где операторы действия ГСА трактуются теперь как вычислительные процедуры  $A(t)$ , которые могут быть также простыми операторами действия.

Программный код УА определяется через последовательность следующих действий:

1. Производится абстрактный синтез УА со счетчиком по методике, предложенной в работе [7]. Для этого по заданной (модифицированной) ГСА строится граф переходов. На графе переходов выделяется самый длинный путь от  $A_0$  до  $A_k$ , т.е. от начального до конечного операторов. Причем если есть переход вида  $a(t) \rightarrow \bar{\alpha}_j a_{i+1}(t+1)$ , то значение  $\bar{\alpha}_j$  заменяется на  $\beta_j$ , где  $\beta_j = \bar{\alpha}_j$ . Тогда все переходы на «траектории счетчика» будут реализовываться по условиям  $\alpha_0$  или  $\alpha_j, \beta_j$  принимающими значения «1». Условие  $\gamma = 1$  при необходимости прибавления «1» к содержимому счетчика можно определить как логическую сумму кодов состояний  $\alpha_i \in \{\alpha\}$  на самом длинном пути. Эта процедура повторяется и для других непрерывных участков графа переходов.

2. Выписываются 3 таблицы:

- соответствие номеров логических условий  $\alpha_j$  состояниям  $a(t)$ ;
- соответствие операторов действия  $A(t)$  состояниям  $a(t)$ ;
- соответствие кодов  $\alpha x_1 \dots x_m$  коду  $y_1 \dots y_m$  для переходов вне счетчика. Здесь  $x_1 \dots x_m$  - код предыдущего состояния  $a(t)$ ;  $y_1 \dots y_m$  - код последующего состояния  $a(t+1)$ .

При этом номер  $\alpha$  в конкатенации  $\alpha x_1 \dots x_m$  не указывается, (только его значение), т.к. он выбирается из множества  $\alpha_j \in \{\alpha\}, j=0, 1, \dots, q$  по состоянию  $a(t+1)$ ;

3. Если на графе переходов имеются петли, то они ликвидируются за счет введения пустой вершины графа перед вершиной с петлей.

4. Используется структурная организация УА с памятью  $a(t)$  на счетчике. Из преобразованного графа переходов формируется условие  $\gamma = 1$ , определяющее условие перехода по счетчику как  $a(t+1)$ .

Специфика программы управления определяется тремя таблицами:

1. таблицей переходов, которая будет выполнять функцию комбинационной схемы  $F_1$ , т.е. определять  $a(t+1) = \tilde{\alpha} a(t+1)$ ;

2. таблицей  $F_2$ , определяющей операторы действия  $A(t)$ . Реализации таблиц – представление их массивом данных.

3. таблицей адресации мультиплексора, выполняющей функции схемы  $F_3$ .

Предлагаемое программное представление автоматов является простым, поскольку разделяет процесс управления на две составляющие:

- универсальную программную реализацию управления через обращение к трем таблицам, представленных в виде массивов ОЗУ, соответствующих схемам  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ;

- специализированную часть, определяющую содержание указанных таблиц по результатам абстрактного синтеза.

В других известных вариантах программирования при вводе неразделенных пустыми операторами логических условий пришлось бы вводить множество операторов ветвления, что привело бы к затруднению понимания кода программы. Кроме того, при числе логических условий в ГСА равном  $q$ , в структуре программного кода должны быть обеспечены  $2^q$  переходов. Это и приводит к существенному усложнению программы и полной потере возможности визуального восприятия и анализа правильности ее реализации.

В предлагаемом структурном программировании переходы осуществляются по значению одного (единственного) логического условия, которое выбирается программным мультиплексором из полного множества входных логических условий на каждом шаге работы абстрактного автомата. Реализация программного мультиплексора не представляет каких либо затруднений, а адресация мультиплексора осуществляется на основе таблично-алгоритмического метода.

В результате моделирования УА был создан новый шаблон в автоматном программировании, основанный на структурной модели автоматов нового типа. Отличительная особенность созданного программного продукта состоит в том, что он может быть использован для любой ГСА. Причем, независимо от сложности ГСА, в динамике всегда реализуется одна и та же последовательность действий:

- 1) выбор с помощью  $\alpha_j \in \{\alpha\}$ ,  $j = \overline{1, q}$  программного мультиплексора, адрес которого определяется через массив  $F_3$ ;
- 2) считывание значения функции  $F_1$  (т.е. кода  $y_1 y_2 \dots y_m$ ) по конкатенации  $\alpha_j x_1 x_2 \dots x_m$  из таблицы;  $m$ -разрядного кода состояния автомата  $a(t)$ ;
- 3) изменение кода состояний (через счетчик или таблицу  $F_1$ );
- 4) включение соответствующей исполнительной команды  $A_i \in \{A\}$  по таблице  $F_2$ ;
- 5) проверка условия на завершение команды (процедуры)  $A_i \in \{A\}$ ;
- 6) считывание значений  $\alpha_j \in \{\alpha\}$  по результату исполнительной команды  $A_i \in \{A\}$ ;

7) передача обновленного логического кортежа  $\alpha_1\alpha_2\dots\alpha_q$  на информационный вход мультиплексора;

8) проверка на необходимость завершения программы, иначе возврат к п.1.

Алгоритм ведущей программы по  $n1 \div 8$  в форме ЛСА запишется в виде:

$$A_0 R_1 R_2 \downarrow^1 R_3 R_4 R_5 \alpha_1 \uparrow^2 R_6 \downarrow^3 R_7 R_8 \downarrow^4 R_{11} R_9 \overline{\alpha_2} \uparrow^4 R_{10} \overline{\alpha_3} \uparrow^1 R_{11} A_k; \downarrow^2 R_{12} \uparrow^3$$

Семантика операторов и логических условий приведена в таблице.

Специфика автоматного подхода к программированию по предложенному методу определяется необходимостью предварительного абстрактного синтеза УА нового типа. Однако процедура синтеза полностью определена и может быть так же автоматизирована.

Предлагаемый метод структурного программирования позволяет существенно упростить создание программ как на языках высокого уровня [1], так и на ассемблере для микроконтроллера [8].

Структурно-автоматное программирование основано на использовании результатов абстрактного синтеза автоматов с выбором одного условия из полного множества входных переменных (условий)  $\{\alpha\}$  по коду состояния. Программный код нового типа не меняется для заданного микроконтроллера при изменении алгоритма, подлежащего программированию.

При корректировке ГСА необходимо изменять только содержимое трех секций ОЗУ. Общий объем памяти ОЗУ при этом много меньше объема, требующегося для программного кода автоматов с классической структурной организацией Мура (Мили), использующихся в работах [3-6].

Таблица 1.

**Семантика операторов действия**

| Ri | Содержание                        |
|----|-----------------------------------|
| 1  | Служебн. (инд.)                   |
| 2  | «0» → СТ, Rg 1-4, Tp 1,2          |
| 3  | <Rg1,3>→M; <M>→Tp 1               |
| 4  | <F <sub>1</sub> >→Rg2             |
| 5  | <F <sub>3</sub> >→Rg4; <Rg2>→ Rg3 |
| 6  | <СТ> = <СТ> +1                    |
| 7  | <Rg2>→DC                          |
| 8  | Пуск $A_i \in \{A\}$              |
| 9  | Пустой оператор                   |
| 10 | <OУ>→Rg1                          |
| 11 | Пустой оператор                   |
| 12 | <Rg3>→ СТ                         |

$$\alpha_1 = \gamma = 1 \rightarrow \langle \text{СТ} \rangle = \langle \text{СТ} \rangle + 1$$

$$\alpha_2 = 1 \text{ окончание } A_i \in \{A\}$$

$$\alpha_3 = 1 \text{ признак возврата (е) к } a_0$$

По структурно-автоматному программированию зарегистрировано две программы во Всероссийском фонде алгоритмов и программ [9,10].

Отличительной особенностью структурно-автоматного программи-

рования является простота и малый объем программного кода, т.к. ведущая программа по заданному алгоритму составляется один раз и не меняется при смене алгоритма. Замена алгоритма требует лишь смены содержимого трех зон памяти для выбранного типа микроконтроллера.

### Заключение

Предложено развитие метода автоматного программирования на базе новой структурной организации управляющих автоматов. Новый метод (который назван структурно-автоматным программированием) позволяет повысить быстродействие управляющих программ для микроконтроллеров примерно на порядок или при заданном уровне быстродействия перейти к реализации управляющей программы на микроконтроллере более упрощенного типа с пониженной частотой синхронизации, который отличается более низким уровнем энергопотребления и более высоким уровнем безотказности.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Иванова Г.С.* Технология программирования.-М.: КНОРУС, 2011.-336с.
2. *Воевода А.А., Романников Д.О.* Использование UML и временных сетей Петри при разработке программного обеспечения./ Сб.научн. тр. НГТУ.Новосибирск: НГТУ №3(61), 2010.-С.61-70.
3. *Шалыто А.А.* Логическое управление. Методы аппаратной и программной реализации алгоритмов управления. СПб.: Наука, 2000.– 227с.
4. *Поликарпова Н.И.* Автоматное программирование / Н.И.Поликарпова, А.А. Шалыто.-СПб.: Литер, 2009. - 176 с.
5. *Гуров В.С.* Инструментальное средство для поддержки автоматного программирования / В.С. Гуров, М.А. Мазин, А.С. Нарвский, А.А. Шалыто // Программирование, 2007.-№6 . - С. 65-80.
6. *Шалыто А.А.* Алгоритмизация и программирование для систем логического управления и «реактивных» систем / А.А.Шалыто //Автоматика и телемеханика. -№ 1, 2001.-С.3-39.
7. *Мухопад А.Ю.* Теория управляющих автоматов технических систем реального времени / А.Ю. Мухопад.- Новосибирск: Наука, 2015. – 216с.
8. *Уилмсхерст Т.* Разработка встроенных систем с помощью микроконтроллеров PIC. М.: «МК-Пресс», 2008. – 543 с.
9. Свидетельство о регистрации электронного ресурса №15737 от 11.05.2010. Алгоритм моделирования автомата в системе управления операционным устройством / Мухопад А.Ю., Мухопад Ю.Ф., Полетаев А.Ф.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015615404 от 18.05.2015. Программа управляющего автомата автоматизированной системы очистки технологических сред с применением вихревого эффекта и ультразвука / Филатов Д.А., Марков Р.Ю., Мухопад А.Ю.

## КОНЦЕПТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЦЕССОВ С ДИНАМИЧЕСКОЙ МЕРОЙ

*Д.Ц. Пунсык-Намжилов*

*В статье осуществлен концептуальный анализ нелинейной модели с динамической мерой, согласно которой исследуемая и преобразуемая величина сдвигается внутри пространства с локальным наклоном.*

*Ключевые слова: нелинейная система, локализованная динамическая структура, структурно-аппаратная модель.*

Выявить законы организации процессов в нелинейных средах, разобраться в том, как сложные структуры могут быть созданы из набора более простых всегда актуально. Причем речь идет не только о взаимодействии процессов, каждый из которых без взаимодействия развивался бы иначе во времени, а также о неизменной, обобщенной статической структуре системы, взаимосвязях, т.е. об обобщенных моделях для решения локальных задач.

Оказалось, что асимптотикой, дающей хорошее описание многих нелинейных динамических процессов, являются модели с динамической мерой, согласно которой исследуемая и преобразуемая величина сдвигается внутри пространства с локальным наклоном (крутизной).

В работе [1] дается определение динамической меры процесса, определяемой через указанный сдвиг.

Исследование явлений в таких процессах с динамической мерой, могут приводить к возникновению пространственно локализованных динамических структур, т.е. – динамически управляемых модулей.

Само существование таких структур представляется парадоксом до сих пор. Например, температура в средах, где есть процессы с динамической мерой (процесс переработки нефти), может быть локализована в пространстве, несмотря на наличие теплопроводности, коэффициент которой может расти с температурой (ведь известно, что нефть «кипит» при разных температурах).

Проблема анализа таких систем определилась через конкретные прикладные задачи, над которым работал Томский политехнический институт (ТПИ) (в решении которых автор принимал самое непосредственное участие) при создании автоматизированного контрольно-измерительного комплекса ресурсных испытаний устройств исполнительной автоматики; при исследовании задач физики нейтронного потока реактора ИРТ и со-



здании системы контроля в процессе легирования кремния; в задачах проектирования систем переработки нефти на мини-заводах.

Поиск и написание фундаментальных уравнений являются недостаточными, т.к. надо уметь их решать, и самое главное ПОНИМАТЬ. В качестве такого простейшего объекта, исследование которого можно довести до уровня глубокого понимания, выбрана четырехкомпонентная модель динамически управляемого модуля (элемента, автомата, преобразователя информации и др.)

В физике де-факто полагается, что физическая модель даже упрощенная, должна, тем не менее, работать с настоящим физическим миром. Конкурирующая теория по умолчанию, должна быть еще точнее, причем как утверждал Р. Фейнман - «Цель науки – число».

На самом деле значение концептуальных моделей в физике, химии и не только, огромно и поэтому требования к точности конкурентных теорий должны быть на время смягчены, причем значительно.

Большинство так называемых «фундаментальных» разработок и формализованных описаний динамических систем в виде дифференциальных уравнений с правой частью основано по существу на двухмерной модели: объект (процесс) и временная развертка (управление).

В конструктивном плане для алгоритмически управляемых структур такая концепция отображается моделью В.М. Глушкова: объект управления (операционное устройство) и управляющий автомат (УА).

Авторы работ [1, 2] независимо пришли к идее четыре координатной модели сложной динамической системы. Пятой координатой модели является временное управление в интерпретации работы [1], которое в работе [2] представлено независимой управляющей (У) подсистемой. В работах [3-6] пяти координатная модель проанализирована как система и рассматривается как средство синтеза сложных технических средств с функциональной (Ф), информационной (И), логической (Л), адресной (А) и управляющей (У) подсистемами. Фактически концептуальная роль модели ФИЛАУ значительно глубже, чем ее конструктивная ориентация на информационно-управляющие системы. Таким образом, в результате введения понятия динамической меры, локализации процессов с динамической мерой и использования структурных моделей сложных технических систем автору удалось численно описать процессы в динамических системах и тем самым установить «связь» с настоящим физическим миром. Конструктивный аспект такого подхода позволил автору разработать целый комплекс оригинальных аналого-цифровых функциональных преобразователей информации с микропрограммным управлением [7, 8].

**Заключение.** В настоящей статье предложен концептуальный подход к анализу и синтезу сложных динамических систем на основе понятия динамической меры и структурно - автоматных моделей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пунсык-Намжилов Д.Ц.* Метод синтеза функциональных преобразователей информации. Автореф. канд. диссерт. – Томск: ТПИ, 1985. – 19 с.
2. *Мухонад Ю.Ф.* Анализ структурных схем вычислителей по автоматным моделям Труды междунар. конгресса IFAC. – Рига, 1974. Т.5. Сб. Дискретные системы. – С. 131-140.
3. *Mukhopad Yu.F.* Formal transformation on the system model. Компьютерная алгебра / Труды Международного конгресса. 1993. Nova Science Publisheers, Inc., New York.
4. *Мухонад Ю.Ф.* Микроэлектронные информационно-управляющие системы. – Иркутск: ИрГУПС, 2004. – 407с.
5. *Мухонад Ю.Ф.* Микроэлектронные системы управления. Братск:БрГУ, 2009. - 285с.
6. *Мухонад Ю.Ф.* Теория дискретных устройств. Иркутск: ИрГУПС, 2010. 172 с.
7. *Мухонад А.Ю., Пунсык-Намжилов Д.Ц.* Управляющий автомат. Патент на изобретение № 2527190 от 27.08.2014. БИ №24 G06F 9/00 (2006.01).
8. *Пунсык-Намжилов Д.Ц., Мухонад А.Ю.* Микроэлектронные средства управления системой переработки нефти / Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте. Иркутск: ИрГУПС, 2015. Вып. 22.- С.110-118.

## *ПРИЛОЖЕНИЕ*

### **Сведения об авторах**

АЛЕКСАНДРОВ АНДРЕЙ АЛЕКСЕЕВИЧ, старший преподаватель кафедры «Автоматизация производственных процессов» ИрГУПС;

АЛЕКСАНДРОВ ИЛЬЯ МИХАЙЛОВИЧ, к.т.н., инженер Информационного вычислительного центра Ангарской государственной технической академии, г. Ангарск;

АНТОШКИН СТАНИСЛАВ БОРИСОВИЧ, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов» ИрГУПС;

БАКАНОВ МАКСИМ ВИКТОРОВИЧ, студент 3-го курса факультета Транспортных систем ИрГУПС;

БАЙБЕКОВ СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ, магистрант 2-го года обучения факультета Транспортных систем ИрГУПС;

БЕЛОВ ВЛАДИСЛАВ ГЕННАДЬЕВИЧ, студент 4-го курса Красноярского института железнодорожного транспорта, г. Красноярск;

БЕЛЯЕВ ЕВГЕНИЙ ЮРЬЕВИЧ, студент 4-го курса факультета Транспортных систем ИрГУПС;

БУТОРИН ДЕНИС ВИТАЛЬЕВИЧ, ассистент кафедры «Автоматизация производственных процессов» ИрГУПС;

ВОЛОДАРСКИЙ ВЛАДИСЛАВ АФАНАСЬЕВИЧ, к.т.н., с.н.с., профессор кафедры «Транспортные системы» Красноярского института железнодорожного транспорта, г. Красноярск;

ДИЛЬ ВИКТОР ФРИДРИХОВИЧ, доцент кафедры «Авиационные электросистемы и пилотажно-навигационные комплексы» Иркутского филиала МГТУ ГА, аспирант ИрГУПС;

ЕЛИЗАРЬЕВ КИРИЛЛ ИВАНОВИЧ, магистрант 1-го года обучения факультета Транспортных систем ИрГУПС;

ЗАКАРЮКИН ВАСИЛИЙ ПАНТЕЛЕЙМОНОВИЧ, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта»;

ЗОЛБОО ТУВШИНТУР, аспирант кафедры «Автоматика, телемеханика и связь» ИрГУПС;

КОВАЛЕВА НАТАЛИЯ СЕРГЕЕВНА, магистрант 2-го года обучения факультета Транспортных систем ИрГУПС;

КОВЫРШИН СЕРГЕЙ ВЛАДИМИРОВИЧ, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов» ИрГУПС;

КРОТОВ АРТЕМ ВАДИМОВИЧ, студент 4-го курса Красноярского института железнодорожного транспорта, г. Красноярск;

КРУГЛОВ СЕРГЕЙ ПЕТРОВИЧ, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» ИрГУПС;

КРЮКОВ АНДРЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ, д.т.н., профессор, действит. член Российской академии транспорта, член-корр. Российской инженерной академии, профессор кафедры «Электроэнергетика транспорта»;

ЛЕБЕДЕВА АНАСТАСИЯ ЕВГЕНЬЕВНА, магистрант 2-го года обучения кафедры «Экономика и управление на железнодорожном транспорте ИрГУПС»;

ЛЭ ВАН ТХАО, магистрант кафедры «Электропривод и электрический транспорт» ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»;

ЛИВШИЦ АЛЕКСАНДР ВАЛЕРЬЕВИЧ, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Автоматизация производственных процессов» ИрГУПС;

МАРЮХНЕНКО ВИКТОР СЕРГЕЕВИЧ, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Автоматика и телемеханика» ИрГУПС;

МУХОПАД АЛЕКСАНДР ЮРЬЕВИЧ, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов» ИрГУПС;

ОЛЕНЦЕВИЧ ВИКТОРИЯ АЛЕКСАНДРОВНА, к.т.н., доцент кафедры «Экономика и управление на железнодорожном транспорте, ИрГУПС»;

ПУНСЫК-НАМЖИЛОВ ДАБА ЦЫРЕНОВИЧ, к.т.н., генеральный директор ООО Химтех-ЮКОС, г. Томск;

СИЗЫХ ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ, д.т.н., доцент, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов» ИрГУПС;

СОЛОДОВ ГЕРМАН СЕРГЕЕВИЧ, к.э.н., помощник генерального директора НИИ химического и нефтяного машиностроения, член - корреспондент РИА, г. Иркутск;

СТАВЕР АЛЕКСАНДР АЛЕКСАНДРОВИЧ, студент 4-го курса Красноярского института железнодорожного транспорта, г. Красноярск;

ФИЛИППЕНКО НИКОЛАЙ ГРИГОРЬЕВИЧ, к.т.н., доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов» ИрГУПС;

ХОРОВЕНЬКО АНТОН СЕРГЕЕВИЧ, магистрант 1-го года обучения факультета Транспортных систем ИрГУПС;

ШЛЫКОВА ИНГА АНДРЕЕВНА, аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов» ИрГУПС.

# **Требования к оформлению научных статей в сборник «Информационные системы контроля и управления в промышленности и на транспорте»**

## ***1. Общие требования***

1.1. Статья должна соответствовать тематике научного сборника, отражать актуальность проблем и их решение. В сборнике публикуются статьи ученых вузов, НИИ, производства по направлениям:

- системы автоматизированного управления;
- элементы и устройства систем управления;
- системы передачи информации;
- контроль и диагностика систем управления;
- моделирование информационно-управляющих систем;
- автоматизация производственных процессов.

1.2. В редакцию сборника представляются печатный текст статьи в одном экземпляре и электронный дубликат статьи в формате текстового процессора MS Word (любая версия).

1.3. Текст статьи на белой бумаге формата А4 (210×297мм) общим объемом не более 8 страниц должен быть тщательно отредактирован и подписан всеми авторами. Превышение указанных объемов предоставленного материала статей должно быть обосновано и согласовано с редакцией журнала.

1.4. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности: инициалы и фамилии авторов, полное название статьи, краткая (5-10 строк) аннотация, ключевые слова (5-10 слов), текст статьи и список литературы.

1.5. На отдельной странице должны быть представлены краткие сведения об авторах статьи: название учреждения (кафедры), фамилия, имя, отчество, ученая степень, звание и должность, контактный телефон и электронный адрес.

1.6. Используемые в статьях термины, единицы измерения и условные обозначения должны быть общепринятыми. Аббревиатуры без разъяснений не допускаются, за исключением принятых сокращений единиц измерения, физических, технических и математических величин и терминов (единицы измерения даются в русской транскрипции). Редакция просит не использовать нестандартные символы и выделения (рамки, затенения и т.п.).

## ***2. Требования к текстовой части статьи***

2.1. Компьютерную подготовку статей следует проводить с использо-

ванием текстового процессора MS Word одной из версий.

2.2. Инициалы и фамилия автора(ов) набираются строчными буквами курсивом с выравниванием по правому краю жирным шрифтом. Через один интервал – название статьи прописными буквами жирным шрифтом с выравниванием по центру. Через два интервала – текст аннотации и ключевые слова (начертание – курсив, размер шрифта – 12 пунктов). Через два интервала следует текст статьи.

2.3. Перед набором на компьютере текста статьи необходимо установить в текстовом процессоре следующие параметры:

Параметры страницы:

размер бумаги – А4; ориентация – книжная; поля – все 2,5см; от края до колонтитула: верхнего – 0 см, нижнего – 1,7 см (пункт меню Файл/Параметры страницы/вкладка Источник бумаги).

Параметры форматирования абзаца:

стиль – обычный (normal); шрифт – Times New Roman Cyr, размер шрифта – 14 пунктов;

интервал одинарный, отступ первой строки – 1см, выравнивание – по ширине.

Расстановка переносов автоматическая (пункт меню Сервис/Язык/Расстановка переносов/флажок Автоматическая расстановка переносов).

2.4. Нумерация страниц средствами текстового процессора не выполняется (страницы статьи должны быть пронумерованы с обратной стороны листа).

2.5. Простые внутрискладочные и однострочные формулы могут быть набраны без использования специальных редакторов — символами (шрифт Symbol). Специальные сложные символы, а также сложные и многострочные формулы, которые не могут быть набраны обычным образом, должны быть набраны в редакторе формул Microsoft Equation 3.0.

2.6. Набор формул в пределах всего текста должен быть единообразен: греческие символы – прямым шрифтом, латинские – курсивом, русские обозначения – прямым; размер обычного символа – 14 пт, крупный индекс – 9 пт, мелкий индекс – 7 пт, крупный символ – 14 пт, мелкий символ – 9 пт. Индексы и субиндексы должны быть четко позиционированы.

2.7. Формулы вводятся в одном окне для каждой отдельной формулы. Знаки препинания после формул и номера формул в круглых скобках вводятся в основном тексте, а не в редакторе формул. Формулы, набранные отдельными строками, располагаются по центру. Нумерация формул дается в круглых скобках с выравниванием по правому краю; нумеруются только те формулы, на которые есть ссылки в тексте.

2.8. Ссылки на литературные или иные источники оформляются числами, заключенными в квадратные скобки (например, [1]). Ссылки должны быть последовательно пронумерованы.

2.9. Библиографический список помещается после основного текста. Ниже основного текста через интервал прописными буквами печатается по центру заглавие «**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**» и помещается пронумерованный перечень источников размером 12 пт. Для книг необходимо указывать фамилию и инициалы автора или всех авторов, название книги, наименование издательства и город, в котором оно находится, год издания, общее число страниц, а для журнальных статей – фамилии и инициалы авторов, название статьи, наименование журнала или сборника, год издания, том, номер журнала и номера страниц. Ссылки на иностранную литературу даются в латинской транскрипции без сокращений.

### **3. Требования к графической части статьи**

3.1. Рисунки выполняются средствами компьютерной графики с кодировкой в черно-белом изображении векторных (\*.eps, \*.cdr, \*.wmf, \*.ai) или растровых (\*.psx, \*.bmp, \*.tif, \*.png, \*.jpg) графических форматов. Иллюстрации могут быть сканированными с оригинала (в градациях серого с разрешением 150 dpi).

3.2. Изображение на иллюстрациях должно быть контрастным, с резкой проработкой деталей, учитывая, что при печати иллюстрации будут уменьшены.

3.3. Текстовую информацию и условные обозначения следует выносить в подрисуночную подпись, заменяя их на рисунке цифрами или буквами, соответствующими обозначениям в тексте статьи. Размерности величин и другие текстовые фрагменты на рисунках должны быть даны исключительно в русской транскрипции.

3.4. Иллюстрации должны быть введены в текст, последовательно пронумерованы и содержать подрисуночную подпись с выравниванием по центру размером 12 пт. (например, «Рис. 1. Структурная схема блока дистанционного управления»).

3.5. Рисунки, полученные в результате работы с САД или расчетными программами (NASTRAN, MATLAB и т.п.), для использования в публикации должны быть доработаны с учетом требований пп. 3.2 и 3.3 и представлены в форматах, указанных в п. 3.1.

3.6. Таблицы, рисунки, диаграммы и формулы не должны выходить за текстовое поле (необходимо выдерживать размеры полей по всей странице).

3.7. Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Таблицы должны быть последовательно пронумерованы (например, «Таблица 1» с выравниванием вправо) и ниже – озаглавлены (таблица с выравниванием вправо и заглавие по центру набираются шрифтом размером 12 пт). Если таблица имеет большой объем, она может быть помещена на отдельной странице, а в том случае, когда она имеет значительную ширину, – на

странице с альбомной ориентацией. Графы в таблицах должны иметь краткие заголовки и должны быть центрированы. Упоминаемые в заголовках величины сопровождаются соответствующими единицами измерения (в сокращенной форме).

3.8. Статья не может заканчиваться рисунком, формулой, таблицей.

**Статьи, оформленные с нарушением перечисленных выше требований, редакцией не рассматриваются.**

Авторы вносят оплату, покрывающую затраты редакции на подготовку и издание сборника статей. Объем оплаты определяется количеством страниц публикации и стоимостной оценкой затрат издания сборника на момент публикации.

Редакция оставляет за собой право производить редакционные изменения, не искажающие основное содержание статьи.

Датой поступления статьи считается день получения редакцией доработанного с учётом всех требований текста статьи.



Образец оформления статьи:

УДК 681.5

*В.А. Иванов, С.Ю. Бояринцев*

**СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНОЙ ПО БЫСТРОДЕЙСТВИЮ  
СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ ТРЕТЬЕГО ПОРЯДКА**

*Решена актуальная задача синтеза оптимального по быстродействию управления линейным объектом третьего порядка, дифференциальное уравнение которого содержит производную в правой части. Рассмотрена задача перевода произвольного начального состояния объекта управления в начало координат и удержания объекта в нулевом состоянии. Полученные результаты применимы для синтеза алгоритма управления любыми линейными объектами третьего порядка, уравнения которых содержат производную входного воздействия.*

*Ключевые слова: управление, регулятор, переходной процесс, фазовые траектории, поверхность переключения.*

(текст статьи)

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. *Лебедев А.А.* Динамика полёта. – М.: Машиностроение, 1973. – 616 с.
2. *Атанс М., Фалб П.* Оптимальное управление / Под ред. Ю.И. Топчиева. – М: Машиностроение, 1968. – 352 с.
3. *Иванов В.А., Кожевников С.А.* Задача оптимального быстродействия для систем второго порядка общего вида // Изв. РАН. Сер. Теория и системы управления. – 1995. – № 3. – С. 76-83.
4. *Holmes J.K.* Performance of a first-order transition sampling digital phase-locked loop using random-walk models // IEEE Trans. – 1972. – V. COM-20. – № 2. – P. 119-131.

Научное издание

**ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ  
КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ  
В ПРОМЫШЛЕННОСТИ НА ТРАНСПОРТЕ**

*Выпуск 27*

Сборник научных трудов

Редактор *Л.В. Докукина*  
Компьютерная верстка *В.Н. Сизых*

Подписано в печать 09.11.2016.  
Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.  
Усл. печ. л. 10,03. Уч.-изд. л. 10, 03.  
План 2016. Тираж 500 экз. Заказ №

Типография ИрГУПС, г. Иркутск, ул. Чернышевского, 15