Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

ИЗДАЁТСЯ С 1947 ГОДА

10

2016

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

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

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

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

УЧРЕДИТЕЛИ:

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

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

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

ООО "Издательство
"Инновационное машиностроение"

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Васюнин А.Н., Рязанова Н.Ю., Тарасенко Е.В., Тарасенко С.В. Анализ методов изменения функциональности внешних устройств в ОС Linux 3

Загидуллин Р.Р. Автоматизация принятия решений в задачах оптимизации с несколькими критериями выбора. 8

Пузанов А.В. Мультидисциплинарный анализ систем управления мобильной техники 13

Туляганов Ш.Д., Нестеров И.В. Современные системы автоматизированного управления производственными процессами переработки природного газа на Мубарекском газоперерабатывающем заводе 18

СОВРЕМЕННЫЕ ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Головешкин В.А., Жукова Г.Н., Ульянов М.В., Фомичёв М.И. Об одном обобщённом представлении классов индивидуальных задач коммивояжёра 22

Устич П.А., Иванов А.А., Мажидов Ф.А. Применение информационных технологий в системе технического обслуживания и ремонта вагонов. 29

Глазков В.В., Муратов И.В., Цисарский А.Д. Математическое моделирование процесса сопровождения воздушных объектов 38

ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Тимофеева М.С., Глазунов Д.В., Мизюков Г.С. Разработка и апробация кроссплатформенного железнодорожного симулятора 43

CONTENTS

MODERN TECHNOLOGY

Vasyunin A.N., Ryazanova N.Yu., Tarasenko E.V., Tarasenko S.V. Analysis methods of the external devices functionality changes in OS Linux 3

Zagidullin R.R. Automation of decision acceptance in optimization tasks with several selection criteria 8

Puzanov A.V. Multidisciplinary analysis of mobile equipment control system. 13

Tulyaganov Sh.D., Nesterov I.V. Modern automatic control systems for industrial process of the natural gas processing at the Mubarek gas processing plant 18

MODERN INFORMATION TECHNOLOGY

Goloveshkin V.A., Zhukova G.N., Ulyanov M.V., Fomichev M.I. About generalized representation of the individual tasks classes of traveling salesman. 22

Ustich P.A., Ivanov A.A., Mazhidov F.A. Application of information technology in the cars technical maintenance system and repair 29

Glazkov V.V., Muratov I.V., Tsisarskiy A.D. Mathematical modeling of aircraft tracking process 38

EDUCATIONAL TECHNOLOGY

Timofeeva M.S., Glazunov D.V., Mizyukov G.S. Development and testing of cross-platform railway simulator 43

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Роспечать" — 70537, по каталогу "Пресса России" — 27838, по каталогу российской прессы "Почта России — 60267) или непосредственно в издательстве по e-mail: realiz@mashin.ru, на сайте www.mashin.ru (без почтовых наценок, с любого месяца, со своего рабочего места); телефон для справок: (495) 785-60-69

Сдано в набор 03.08.2016.
Подписано в печать 22.09.2016.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Цена свободная.

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

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

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

УДК 681.3.07

А.Н. Васюнин, Н.Ю. Рязанова, канд. техн. наук, доц., **Е.В. Тарасенко, С.В. Тарасенко**
(Московский государственный технический университете им. Н.Э. Баумана)
ryaz_nu@mail.ru

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ИЗМЕНЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОСТИ ВНЕШНИХ УСТРОЙСТВ В ОС LINUX

Рассмотрены технологии изменения функциональности внешних устройств для ОС Linux: написание собственного драйвера устройства на примере USB HID драйвера мыши и подключение нового обработчика аппаратного прерывания на примере обработчика прерывания от клавиатуры. Для реализации изменения функциональности внешних устройств рассмотрены: загружаемый модуль ядра HID USB драйвер мыши и загружаемый модуль ядра, вызывающий функцию request_irq() для регистрации собственного обработчика аппаратного прерывания, постановки в очередь на выполнение его "нижней половины" и освобождения линии прерывания. Приведено написание собственных обработчиков "верхней половины" и "нижней половины" как очереди работ (workqueue).

Ключевые слова: USB HID драйвер; мышь; клавиатура; аппаратные прерывания; "верхняя половина"; "нижняя половина"; очереди работ.

The technology change of the external devices: functionality for OS Linux, writing your own device driver as an example USB HID mouse driver and connection the new hardware interruption processor as an example of the keyboard interruption processor are considered. To implement the changes of the external devices functionality are considered: a loadable nucleus module HID USB, mouse driver and a loadable nucleus module, calling the function request_irq () for registration of the your own hardware interrupt processor, queuing on the implementation of its "bottom half" and the release of the interruption line. The writing of the own processors for "upper half" and "bottom half" as the work queue (workqueue).

Keywords: USB HID driver; mouse; keyboard; hardware interruptions; "upper half"; "bottom half"; the work queue.

Введение. Задача изменения функциональности внешнего устройства решается на уровне ядра операционной системы (ОС). Для этого в ОС Windows необходимо написать драйвер, например драйвер-фильтр верхнего или нижнего уровня [1]. В ОС Linux задача может быть решена двумя способами: разработкой драйвера устройства в виде загружаемого модуля ядра или установкой на линию прерывания нескольких обработчиков прерываний. Несмотря на обилие литературы, посвящённой ядру ОС Linux, задачи написания драйвера или собственного обработчика прерывания и их регистрации в системе вызывают ряд вопросов, ответить на которые затруднительно.

Класс HID (Human Interface Device) драйверов предназначен для управления различными типами внешних устройств. Если устройство поддерживает HID интерфейс, т.е. написано в соответствии с его спецификацией, то его подключение не требует разработки нового драйвера. Однако при необходимости подключения устройства, не отвечающего HID-спецификации, необходим соответствующий HID-драйвер. Например, при использовании мыши как средства ввода символьной информации с помощью азбуки Морзе необходимо написать собственный драйвер мыши.

Другим способом изменения функциональности внешнего устройства является установка в системе собственного обработчика прерывания, разделяющего определённый номер прерывания.

Особенности HID-драйверов. Устройства класса USB HID предназначены для передачи небольших объёмов данных (не более 64 000 байт/с), но критичны к задержкам при передаче данных. Типовыми устройствами класса USB HID являются все устройства для взаимодействия с пользователем — клавиатуры, мыши, джойстики и т.д. Для работы с интерфейсом USB HID разработаны специальные кроссплатформенные библиотеки: libusb и hidapi. Библиотека libusb предоставляет универсальный интерфейс для доступа ко множеству стандартных классовых драйверов, а hidapi только интерфейс для доступа к стандартному драйверу USB HID. При этом разработчику предоставляется более удобный API-интерфейс [2]. Если внешнее устройство поддерживает HID-интерфейс, т.е. написано в соответствии с его спецификацией, то его под-

ключение не требует разработки нового драйвера. В таком случае система будет использовать уже существующий HID-драйвер. Однако при подключении устройства, не отвечающего HID-спецификации, требуется разработка соответствующего USB-драйвера. Например, при использовании компьютерной мыши для ввода символьной информации с помощью азбуки Морзе необходимо написать собственный драйвер мыши. В ОС Linux код драйвера мыши можно найти в файле usbmouse.c. Открытые коды HID-драйвера мыши находятся в файле "linux/drivers/hid/usbhid/usbmouse.c".

USB-драйвер описывается структурой struct usb_driver, которая заполняется USB-драйвером и содержит функции обратного вызова (callbacks) и переменные:

```
struct usb_driver {
struct module *owner;
const char *name;
int (*probe) (struct usb_interface *intf, const struct
usb_device_id *id);
void (*disconnect) (struct usb_interface *intf);
const struct usb_device_id *id_table;
struct device_driver driver;
...
}.
```

Функция probe() структуры USB-driver является точкой входа драйвера, которая инициализирует и регистрирует другие точки входа. Функция disconnect() вызывается, когда драйвер по какой-либо причине больше не должен управлять устройством и может быть удалён. Функции обратного вызова probe() и disconnect() вызываются в контексте потока ядра USB-хаба. В обратных вызовах probe() и disconnect(), которые выполняются подсистемой ядра USB Core, для каждого интерфейса зарегистрированного устройства, в качестве первого параметра указывается дескриптор соответствующего интерфейса struct usb_interface*, так как драйверы USB пишутся для интерфейсов устройств, а не для конкретного устройства.

Таблица *id_table структур struct usb_device_id содержит список всех типов USB-устройств, которые обслуживает драйвер. Каждый элемент этой таблицы определяет интерфейс подключаемого устройства.

Для разрабатываемого драйвера структура usb_driver заполняется следующим образом:

```
static struct usb_driver usb_mouse_driver = {
    .name = "mouse_morse";
    .probe = usb_mouse_probe;
    .disconnect = usb_mouse_disconnect;
    .id_table = usb_mouse_id_table;
    }.
```

Имя драйвера должно быть уникальным среди USB-драйверов в ядре и таким же как имя модуля. При установке одного драйвера мыши таблица usb_mouse_id_table должна содержать одну структуру, определяющую интерфейс подключаемого устройства:

```
static struct usb_device_id usb_mouse_id_table[] = {
{USB_INTERFACE_INFO
    (USB_INTERFACE_CLASS_HID,
    USB_INTERFACE_SUBCLASS_BOOT,
    USB_INTERFACE_PROTOCOL_MOUSE)}
 {}
}.
```

Если драйвер установлен, то его можно увидеть в ядре в sysfs, указав путь */sys/bus/usb/drivers/*.

Функция static int usb_mouse_probe (struct usb_interface *intf, const struct usb_device_id *id) устанавливает связь между устройством и драйвером, а затем регистрируются события, обрабатываемые данным устройством:

```
static int usb_mouse_probe (struct usb_interface
    *intf, const struct usb_device_id *id) {
    struct usb_device *dev = interface_to_usbdev(intf);
    struct usb_host_interface *interface;
    struct usb_endpoint_descriptor *endpoint;
    struct usb_mouse *mouse;
    struct input_dev *input_dev;
    ...
    input_set_drvdata(input_dev, mouse);
    input_dev->open = usb_mouse_open;
    input_dev->close = usb_mouse_close;
  usb_fill_int_urb (mouse->irq, dev, pipe, mouse->data,
(maxp > 8? 8: maxp), usb_mouse_irq, mouse, endpoint-
>bInterval);
  ...
  }.
```

Функция вызывается системой при инициализации драйвера мыши и принимает два параметра: interface — это интерфейс USB-устройства, так как USB-драйвер взаимодействует не с устройством, а с его интерфейсом. В ней регистрируются структуры usb_device, usb_host_interface, usb_endpoint_descriptor и input_dev. В input_dev задаются функции usb_mouse_open(), usb_mouse_close(), которые должны вызываться при подключении и отключении USB-устройства.

С помощью функции usb_fill_int_urb() регистрируется обработчик быстрого прерывания usb_mouse_irq(). Код USB в ядре Linux взаимодействует со всеми USB-устройствами при помощи блока запроса USB (*urb* — USB request block). Блок запроса описывается структурой *struct urb* и может быть найден в файле include/linux/usb.h. Блок запроса urb используется для передачи или приёма данных

из заданной конечной точки USB на заданное USB-устройство в асинхронном режиме.

Дополнительно драйвер, реализуемый в виде загружаемого модуля ядра, должен содержать две обязательные точки входа: init() и exit().

Обработчик прерывания static void usb_mouse_irq (struct urb *urb) вызывается при нажатии кнопок мыши:

```
static void usb_mouse_irq(struct urb *urb) {
...
input_report_key(dev, BTN_LEFT, data[0] & 0x01);
input_report_key(dev, BTN_RIGHT,data[0] & 0x02);
...
input_report_rel(dev, REL_X,data[1]);
input_report_rel(dev, REL_Y,data[2]);
...
}.
```

Если событие произошло без ошибок, то передача данных в пространство пользователя будет выполнена функциями: input_report_key(), которая передает данные о действиях пользователя с мышью, а input_report_rel() передает данные координат указателя мыши.

Для изменения стандартных действий с мышью из обработчика прерывания usb_mouse_irq() необходимо убрать её обычную функциональность, удалив функции input_report_key(), input_report_rel() и добавить функцию send_key():

```
static inline void send_key(struct input_dev *_dev, const char *_data) {... }.
```

Эта функция передает манипуляции пользователя с мышью дереву Морзе, каждый узел которого представляется структурой, содержащей информацию об описываемом символе и указателях на левый и правый узлы.

Чтобы установить свой драйвер в системе, его необходимо зарегистрировать. Для этого заполняется структура usb_driver и регистрируется в системе. Последнее можно сделать с помощью специального макроса для регистрации USB-драйверов (module_usb_driver), который принимает в качестве параметра регистрируемую структуру usb_driver. Вспомогательный макрос позволяет не писать функции module_init(), module_exit() по шаблону, а упростить код, указав данный макрос один раз.

Особенности установки драйвера в системе. Когда драйвер написан и отлажен, его устанавливают в системе. При установке собственного драйвера сначала необходимо выгрузить модуль usbhid, который автоматически регистрирует все стандартные драйверы в системе. Данный модуль устанавливает стандартный драйвер мыши и не позволяет установить свой. Только после его отключения можно установить собственный драйвер, а затем загрузить обратно для поддержания функциональности других HID-устройств.

Прерывания в Linux. При возникновении аппаратного прерывания вызванный обработчик запрещает прерывания на локальном процессоре. В результате другая работа выполняться не может. Такая ситуация в системе должна быть краткосрочной, поэтому большинство аппаратных прерываний выполняются в два этапа. В ОС Linux определено два вида аппаратных прерываний IRQ (Interrupt ReQuests): "быстрые" и "медленные". Одной из важнейших особенностей выполнения "быстрых" прерываний является то, что все другие прерывания на локальном процессоре блокируются. "Длинные" IRQ занимают довольно продолжительное время, в течение которого могут обрабатываться и другие прерывания, но не прерывания от того же самого устройства. Кроме того, на самом нижнем уровне контроллеру прерывания приказывается отключить конкретную линию IRQ. Поэтому работу "медленных" прерываний разбивают на две части: исполняемую сразу при возникновении аппаратного прерывания и работу, которая может быть отложена на некоторое время. Эти части обработчиков прерываний получили название "верхняя" (top) и "нижняя" (bottom) половины (half).

При возникновении аппаратного прерывания (IRQ) вызывается "верхяя половина" (top half), которая выполняет минимум необходимых действий. Обычно это чтение и сохранение в буфере данных или передача их из буфера в регистры контроллера. Завершается "верхняя половина" постановкой "нижней половины" в очередь на выполнение и разрешением прерываний. "Нижняя половина" (bottom half), как правило, выполняется сразу после завершения "верхней половины" и запускает все операции, для которых требуется много процессорного времени, причем ей доступно всё то, что доступно обычным модулям ядра. "Нижние половины" выполняются отдельным потоком ядра, имеют более низкие уровни приоритета (ipl — interrupt priority level) и являются отложенными действиями, которые могут быть прерваны во время их выполнения [3].

Существует несколько способов реализации "нижней половины" обработчика: гибкое прерывание (softirq), тасклет (tasklet) и очереди работ (workqueue).

Реализация обработчика прерывания. Обработчик "верхней половины" регистрируется в системе при инициализации загружаемого модуля ядра вызовом функции request_irq().

Прототип функции int request_irq (unsigned int irq, irq_handler_t handler, unsigned long flags, const char *name, void* dev_id) получает следующие параметры: irq — номер прерывания; handler — устанавливаемый обработчик прерывания; flags — флаги; *name — строковая константа, представляющая имя устройства и используемая в /proc/interrupts для отображения владельца прерывания; *dev — указатель на уникальный идентификатор устройства на линии IRQ (для не разделяемых прерываний (например шины ISA) может указываться NULL). Если значение устанавливается как NULL, то устройство невозможно идентифицировать и освободить линию прерывания от соответсвующего обработчика вызовом free_irq ().

Для обработчиков аппаратных прерываний ("верхней половины") определено несколько флагов*): IRQF_SHARED — разрешить разделение (совместное использование) линии IRQ с другими устройствами (PCI шина и устройства); IRQF_PROBE_SHARED — устанавливается, если предполагается возможность проблем совместного использования; IRQF_TIMER — флаг, обозначает прерывание от системного таймера; IRQF_PERCPU — прерывание закреплённое монопольно за отдельным процессором (CPU); IRQF_NOBALANCING — флаг, запрещающий прерыванию балансировку IRQ. При успешном завершении функция request_irq() возвращает нуль. Возврат ненулевого значения указывает на возникновение ошибки. Наиболее часто код ошибки со значением -EBUSY указывает на то, что данная линия IRQ занята при текущем вызове, или при предыдущем вызове для этой линии не был указан флаг IRQF_SHARED. Другими словами, функция request_irq() установит обработчик только в том случае, если на заданном IRQ ещё нет обработчика прерывания или существующий обработчик зарегистрировал совместную обработку прерывания флагом IRQF_SHARED.

При желании расширить функциональность клавиатуры, например, добавлением звука нажатием клавишей, необходимо зарегистрировать в системе собственный обработчик "верхней половины" прерывания. Поскольку мелодия, воспроизводимая при нажатии каждой клавиши, представлена в виде массива байт, передаваемого на устройство /dev/dsp, что занимает довольно значительное время, то эти действия должны выполняться в "нижней половине" обработчика прерывания. Поэтому "верхняя половина" должна поставить "нижнюю половину" в очередь на выполнения, например, вызвав функцию tasklet_shedule() и вернуть одно из трёх значений, объявленных в файле <linux/irqreturn.h>:

```
#ifndef _LINUX_IRQRETURN_H
#define _LINUX_IRQRETURN_H
enum irqreturn {
IRQ_NONE = (0 << 0),
IRQ_HANDLED = (1 << 0),
IRQ_WAKE_THREAD = (1 << 1),
};
typedef enum irqreturn irqreturn_t;
#define IRQ_RETVAL(x) ((x)! = IRQ_NONE)
#endif.
```

IRQ_NONE указывает, что устройство не является источником прерывания для данного обработчика, и прерывание должно быть передано другим обработчикам, зарегистрированным на данной линии IRQ. IRQ_HANDLED означает, что устройство, от которого пришло прерывание, распознано и прерывание обработано. Рекомендуется в обработчике прерывания эти значения использовать следующим образом [4]:

```
irqreturn_t irq_handler(int irq, void *dev_id, struct pt_
regs *regs)
{
  // Убеждаемся, что произошло именно нужное 12-е
  прерывание
  if (irq == MOUSEIRQ)
  {
  printk("MouseIrq12\n");
  tasklet_schedule(&my_tasklet); /* постановка тасклета
  в очередь на выполнение */
  return IRQ_HANDLED; // Прерывание обработано.
  }
  else return IRQ_NONE; // Прерывание не обработанно.
  }.
```

Регистрация данного обработчика прерывания может быть выполнена следующим образом:

```
int init_module()
  {
  return request_irq(12, (irq_handler_t)irq_handler,
  IRQF_SHARED, "test_mouse_irq_handler", (void *)
  (irq_handler));
}.
```

Освобождение линии прерывания выполняется фунцией free_irq ():

```
void cleanup_module()
{
   free_irq(12, (void *)(irq_handler)); /* передаём
              номер линии прерывания и указатель
              на идентификатор устройства, который
```

*) прототипы irq_handler_t и флаги установки обработчика существенно меняются от версии к версии, например, радикально поменялись после 2.6.19, все флаги, именуемые сейчас IRQF_* до этого именовались SA_*.

```
            использовался при регистрации, т.е.
            указатель на функцию-обработчик */
    // Удаление тасклета
    tasklet_disable(&my_tasklet);
    tasklet_kill(&my_tasklet);
}.
```

Реализация "нижней половины" обработчика прерывания. Для реализации "нижней половины" выбор делается между гибкими прерываниями, тасклетами и очередями работ. Softirq-функции реализуют только 32 статически определённые функциональности. Тасклеты (tasklet) в отличие от гибких прерываний могут быть зарегистрированы динамически и выполняться параллельно на разных процессорах в SMP-системах. При этом два тасклета одного типа не могут выполняться одновременно и блокироваться. Поэтому в них нельзя применять семафоры. Если в тасклете используются общие с "быстрым" обработчиком прерывания или другим тасклетом данные, то необходимо взаимоисключение на основе "активного ожидания". В отличие от тасклетов очереди работ выполняются в контексте супервизора. Они не обязательно должны быть полностью атомарными, могут блокироваться и использовать различные средства взаимоисключения и синхронизации для доступа к разделяемым данным [5]. Очереди работ обрабатываются специальными потоками, которые называются "вокерами", обеспечивающими асинхронное выполнение работ (work) из очереди работ (workqueue). Ими управляет основной планировщик ядра.

Workqueue создаётся в функции инициализации загружаемого модуля ядра при вызове функции alloc_workqueue ("sound_player",WQ_UNBOUND,0). Кроме этого, функция init() регистрирует обработчик "верхней половины" irq_handler(), вызывая функцию request_irq():

```
static int __init synthesizer_init(void)
  {
    printk(KERN_INFO "Init synth.");
    // регистрация обработчика прерывания
    int res = request_irq(synth.keyboard_irq, irq_handler,
    IRQF_SHARED, synth.name, &synth);
    if (res == 0)
    {
    printk(KERN_INFO "Keyboard irq handler was regi-
    stered successfully.");
    // создание очереди работ
    synth.wq = alloc_workqueue("sound_player",
    WQ_UNBOUND, 0);
    if (synth.wq)
    printk(KERN_INFO "Workqueue was allocated suc-
    cessfully");
    else
    {
      free_irq(synth.keyboard_irq, &synth);
      printk(KERN_ERR "Workqueue allocation failed");
      return -ENOMEM;
    }
  }
  else
    printk(KERN_ERR "Keyboard irq handler register
    failed.");
  return res;
}.
```

Для постановки вокера в очередь на выполнение в обработчике "верхней половины" прерывания irq_handler() вызывается queue_work():

```
static irqreturn_t irq_handler (int irq, void *dev_id){
  int loc_cur_scancode = inb(0x60);
  if (loc_cur_scancode & 0x80)
  {
  }
  else {
    char loc_char = get_character(loc_cur_scancode);
    if (loc_char! = '\0' && atomic_read(&playing) == 0)
      {
        atomic_set(&current_character, loc_char);
        queue_work(synth.wq, &work);
      }
    }
  return IRQ_HANDLED;
}.
```

Вызов inb(0 × 60) считывает скан-код клавиши, который записывается в loc_cur_scancode. После этого loc_cur_scancode & 0 × 80 проверяет нажата или отпущена клавиша, чтобы проводить обработку скан-кода только один раз. Затем скан-код преобразуется в код символа и анализируется: равен ли полученный код символа нулю и началось ли воспроизведение мелодии. Это делается вызовом функции atomic_read(&playing), где значение переменной playing является признаком воспроизведения: 1 — воспроизводится, 0 — нет. Если в текущий момент мелодия не воспроизводится и код символа отличен от нуля, то сохраняется код символа и "нижняя половина" обработчика прерывания ставится в очередь на выполнение функцией queue_work(synth.wq, &work).

"Нижняя половина" воспроизводит мелодии, связанные с определёнными клавишами. Обработчик "нижней половины":

```
static void work_handler(struct work_struct *loc_work)
{
   atomic_set(&playing, 1);
   char loc_cur_char = (char)atomic_read(&current_char-
   acter);
   printk(KERN_INFO "synth: work = %c", loc_cur_
   char);
```

```
  printk(KERN_INFO "synth: started playing, %c", loc_
  cur_char);
  int index_of_cur_track = get_track_index_from_
  char(loc_cur_char);
  if (index_of_cur_track! = -1)
  {
    printk(KERN_INFO "befre sleep, char = %c", loc_
    cur_char);
    msleep(TIMEOUT);
    write_file("/dev/dsp",    tracks[index_of_cur_track]->
    data, tracks[index_of_cur_track]->len, 0660);
    msleep(TIMEOUT);
    printk(KERN_INFO "after sleep, char = %c", loc_
    cur_char);
  }
 printk(KERN_INFO "synth: ended playing, %c", loc_
 cur_char);
 atomic_set(&playing, 0);
}.
```

Вызвав функцию atomic_set(&playing, 1), обработчик устанавливает, что мелодия начала воспроизводится. Затем запоминает код символа в loc_cur_char вызовом (char)atomic_read(&current_character) и по коду получает индекс мелодии в массиве мелодий. Затем функцией write_file() выводит байтовое представление мелодии, полученное из массива tracks, на устройство /dev/dsp.

Для регистрации обработчика "нижней половины" нужно заполнить структуру work_struct, определённую в <workqueue.h>. Это можно сделать статически макросом DECLARE_WORK(work, work_handler) во время компиляции. Данный вызов создает workqueue с именем work и регистрирует в очереди функцию work_handler.

Библиографические ссылки

1. **Рязанова Н.Ю., Ершов Н.Г.** Методика верификации драйверов Windows. В сб. Актуальные вопросы фундаментальных наук. Труды междунар. научн. конф. М., 2014. С. 158—161.
2. **Ершов Н.Г., Рязанова Н.Ю.** Анализ проблем верификации драйверов Windows // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013. № 6 (18). С. 7.
3. **Corbet J., Rubini A., Kroan-Hartman G.** Linux device drivers. O'Reilly Media, 2005. 567 p.
4. **Цирюлик О.И.** Модули ядра Linux. Внутренние механизмы ядра. Электронный ресурс: http://rus-linux.net/MyLDP/BOOKS/Moduli-yadra-Linux/06/kern-mod-06-26.html (Дата обращения 7.05.16).
5. **Белоус В.С., Крищенко В.А., Рязанова Н.Ю.** Обнаружение тупиков на мьютексах в многопоточных приложениях // Инженерный журнал: наука и инновации. 2013, № 6 (18). С. 8.

УДК 519.87

Р.Р. Загидуллин, д-р техн. наук, доц.
(Уфимский государственный авиационный технический университет)
polysoft@list.ru

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ЗАДАЧАХ ОПТИМИЗАЦИИ С НЕСКОЛЬКИМИ КРИТЕРИЯМИ ВЫБОРА

Предложен метод нахождения весовых коэффициентов при решении задач многокритериальной оптимизации, а также алгоритм проверки корректности используемых в математической модели системы линейных неравенств.

Ключевые слова: математическая модель; принятие решений; многокритериальная оптимизация; весовые коэффициенты; функционал; алгоритм; совместность линейных неравенств.

A method for finding the weight coefficients at the decision of multi-criteria optimization problems, as well as the correctness control algorithm of the linear inequalities sistem used in the mathematical model are proposed.

Keywords: mathematical model; decision acceptance multi-criteria optimization; weight coefficients, functional; algorithm; linear inequalities simultaneousness.

Постановка задачи. В задачах принятия решений, например, при проектировании изделия с несколькими важными параметрами, построении расписаний работы оборудования с помощью специализированных информационных систем типа MES (Manufacturing Execution Systems), APS (Advanced Planning & Scheduling), а также в задачах управления различного уровня часто возникает необходимость поиска оптимального решения с не-

сколькими критериями. В этом случае ряд критериев, которые будут действительными в решении, образуют функционал, или векторный критерий вида $F(F_1, F_2, ..., F_f)$.

Для большинства дискретных задач многокритериальной оптимизации чаще всего используют метод оптимизации с помощью весовых коэффициентов. При этом известной проблемой является определение численных значений этих коэффициентов, поскольку метод экспертных оценок характеризуется субъективностью экспертов и, как следствие, большим разбросом значений, что в итоге отражается на точности принятия решения.

Предложен метод, повышающий достоверность получения весовых коэффициентов за счёт попарного ранжирования частных критериев и последующей проверки корректности построенной математической модели.

Ранжирование частных критериев. Допустим, что есть некий вектор F, который включает в себя f частных критериев, каждый из которых должен достичь некоего максимума. Если какой-либо частный критерий F_i при этом надо минимизировать, то в вектор $F \to \max$ он войдет как $1/F_i$. Для случая $F \to \min$ такое же преобразование коснётся критерия, который надо максимизировать.

В то же время есть вектор F, в который заложили такие важные показатели производства, как: производительность, себестоимость, качество и др., т.е. продукция должна быть наилучшего качества, иметь минимальную цену и выпускаться за кратчайшее время. Ввиду разнородности и противоречивости частных критериев не всегда удаётся привести каждый из них к экстремальному виду вследствие того, что некоторые критерии хотя бы косвенно противоречат другим. Векторный критерий в первом приближении при этом имеет следующий вид:

$$F = (\alpha_1 F_1 + \alpha_2 F_2 + ... + \alpha_f F_f) \to \max, \quad (1)$$

где α_i — коэффициент значимости частного критерия F_i (весовая оценка).

Чтобы эта оценка не уходила в бесконечность, вводится соответствующее уравнение нормирования

$$\alpha_1 + \alpha_2 + ... + \alpha_f = 1. \quad (2)$$

Выражения (1) и (2), которые входят в математическую модель, являются неразрывными друг от друга.

При этом надо понимать, что, поскольку физический смысл каждого частного критерия F_i может быть разным (время, стоимость, вес, производительность и т.п.), то для корректности записи (1) в качестве значения F_i (%) выбирается его безразмерная величина

$$F_i = \frac{F_i - F_{i\min}}{F_{i\max} - F_{i\min}} 100, \quad (3)$$

где F_i — текущее значение критерия на момент оценки в (1); $F_{i\min}$ — его возможное минимальное значение; $F_{i\max}$ — его возможное максимальное значение.

В дальнейшем для упрощения не будем при обозначении F_i использовать знак процента, так как подразумеваем, что значение критерия F_i уже приведено к безразмерному виду согласно (3).

Если же значения $F_{i\min}$ и $F_{i\max}$ не удаётся определить изначально, то безразмерный характер критерию можно придать с помощью выражения

$$F_i = \frac{F_i}{F_{i0}}, \quad (4)$$

где F_{i0} — первоначальное значение критерия F_i, полученное при первом наблюдении (опыте).

Если в результате поиска оптимального решения для всех опытов, в которых полученные значения F_i для каких-либо критериев всегда подчиняются выражению

$$F_i = F_{i0}, \quad (5)$$

т.е. значения некоторых критериев не меняются, то их значения в (1) можно либо изначально положить равными 1 согласно (4), либо вовсе не учитывать.

Наиболее предпочтительным с точки зрения объективности изменения значения частного критерия F_i в (1) является случай с формой приведения (3).

Вычисление функционала (1) не представляет сложности, если за каждым частным критерием F_i стоят конкретные числа. Проблема таких задач чаще всего состоит в том, чтобы определить коэффициенты α_i. Если значения α_i могут быть определены легко, а это обычно является прерогативой группы экспертов, то задача решается без проблем. Но встречаются случаи, когда эксперты затрудняются в точной оценке значений α_i, тогда можно использовать метод оптимизации с неопределёнными значениями весовых коэффициентов. Суть этого метода состоит в следующем.

Представим натуральный ряд чисел от единицы до f, на котором расположим

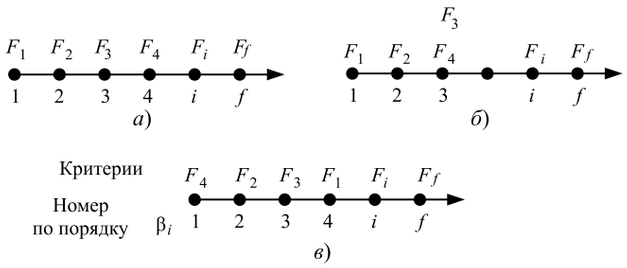

Рис. 1. Пример ранжирования критериев

частные критерии F_i (рис. 1). Положим, что чем большую важность имеет тот или иной критерий F_i в (1), тем большее значение имеет его местоположение на этой оси, тем большее значение имеет коэффициент α_i.

При этом могут возникнуть самые различные случаи упорядочения. Например, если коэффициент α_i каждого последующего критерия больше коэффициента предыдущего критерия, то номера критериев будут совпадать с его номером по порядку расположения на оси (см. рис. 1, *а*). Возможен случай, когда коэффициенты ряда критериев одинаковы (см. рис. 1, *б*). Отметим, что номер критерия не имеет никакого отношения к его номеру по порядку расположения на оси, который обозначим через β_i (см. рис. 1, *в*). При этом номер β_i будет выполнять ещё и роль веса критерия, так как изначально известно, что чем большую важность имеет тот или иной критерий F_i, тем большее значение имеет его местоположение на числовой оси.

Таким образом, вводим возможность экспертного попарного сравнения коэффициентов критериев по принципу "больше или равно", например ($\alpha_i > \alpha_j$), ($\alpha_i = \alpha_j$); $i, j \in [\overline{1, f}]$, т.е. с минимальной долей неопределённости.

Такой вариант назначения оценок наиболее характерен для случаев с большим количеством различных по своей природе частных критериев. В данном случае эксперты могут расположить критерии F_i на оси чисел так, как это выполнено на рис. 1. Такое расположение критериев можно формально отразить заполнением следующей матрицы оценок предпочтения между частными критериями:

$$B = \begin{Bmatrix} \beta_i > \beta_j \\ \beta_i = \beta_j \end{Bmatrix}; \beta_i \in F_i; \ \ i, j \in [\overline{1, f}], \qquad (6)$$

т.е. необходимо указать, какие критерии предпочтительнее других или равны им по значимости. Если $\beta_i > \beta_j$, то критерий F_i имеет вес больший, чем F_j, если $\beta_i = \beta_j$, то значения критериев F_i и F_j одинаковы в (1).

Рассмотрим метод получения весовых коэффициентов α_i с учётом матрицы (6).

Определение весовых коэффициентов методом целочисленного ранжирования оценок предпочтения. В данном случае необходимо выстроить все частные критерии из вектора

$$F = (F_1, F_2, ..., F_f) \qquad (7)$$

по принципу перечисления и каждый частный критерий будет иметь какую-либо целочисленную оценку, равную значимости в силу отношений (6). При этом какая-либо минимальная оценка x_i соответствует критерию с минимальной значимостью и некоторые критерии могут иметь равные оценки в случае равенства их значимости в (6).

При требовании целочисленности к оценкам x_i получим следующую модель в виде задачи целочисленного линейного программирования (ЗЦЛП) с неизвестными значениями x_i:

$$W = \sum_{i=1}^{f} x_i \to \min; \qquad (8)$$

$$\begin{cases} x_i - x_j \geqslant 1, \beta_i > \beta_j; \ \ i, j \in [\overline{1, f}]; \\ x_i - x_j = 0, \beta_i = \beta_j; \ \ i, j \in [\overline{1, f}]; \end{cases} \qquad (9)$$

$$x_i \geqslant 1, i = [\overline{1, f}]. \qquad (10)$$

После нахождения значений x_i вычисляются значения весовых коэффициентов

$$\alpha_i = \frac{x_i}{\sum_{j=1}^{f} x_j} \qquad (11)$$

при выполнении условия нормирования (2).

Данный метод даёт однозначное распределение весовых коэффициентов согласно "баллам" — оценкам x_i, которые получили те или иные частные критерии функционирования в процессе ранжирования, и предназначен для тех случаев, когда удаётся лишь попарно сравнить значимость критериев, входящих в (7).

Разберём модель (8—11) более подробно.

Целевая функция W, по сути, выполняет роль ограничения сверху, так как при её отсутствии получим бесконечное число решений. Выражение (9) представляет собой, в общем случае, не что иное, как систему линейных алгебраических неравенств вида

$$a_i x_i - a_j x_j \geqslant b_k, \qquad (12)$$

где значения коэффициентов a_i равны либо 1, либо −1, а значения b_k равны 1.

Согласно (6) могут встречаться и равенства типа $a_i x_i - a_j x_j = 0$, но акцентируем внимание именно на то, что основное в (9) — это неравенства. Тем более что система (9) должна содержать хотя бы одно неравенство, в противном случае задача нахождения коэффициентов α_i сводится к весьма тривиальному решению $\alpha_i = 1/f$ для всех i. Количество всех уравнений (неравенств и равенств) в (9) определится как

$$m = \sum_{i=1}^{f} (f - i), \qquad (13)$$

где f — количество частных критериев.

Значение α_i в (11) вычисляется по аналогии с критерием оптимальности Шепли [1], когда выигрыш каждого игрока равен его среднему вкладу в благосостояние некой общей коалиции, по сути — математическое ожидание. По той же аналогии с распределением выигрышей в (10) оговаривается, что все значения переменных x_i должны быть не меньше единицы, тем более, что изначально воспользовались числовой осью, где единица — минимальное знакоместо для частных критериев (см. рис. 1).

Задача (8—11) легко решается с помощью различных математических пакетов, например, её решение для одного из ранее рассмотренных вариантов (см. рис. 1) с помощью пакета символьной математики Maple даёт следующий результат:

```
> restart;
> with(Optimization):
> MyCon: = {x[4]-x[3]> = 1,x[4]-x[2]> = 1,x[4]-x[1]> = 1, x[3]-x[2]> = 1,
x[3]-x[1]> = 1,x[2]-x[1]> = 1,x[4]> = 1, x[3]> = 1,x[2]> = 1, x[1]> = 1}:
> MyF: = x[1] + x[2] + x[3] + x[4];
> LPSolve(MyF,MyCon, assume = {nonnegative, integer});
```

$$[10,[x_1 = 1,\ x_2 = 2,\ x_3 = 3,\ x_4 = 4]],$$

где число 10 в итоговой строке — это значение критерия (8).

При этом результате, согласно (11), значения коэффициентов определяются как

$$\alpha_1 = \frac{1}{10};\ \alpha_2 = \frac{2}{10};\ \alpha_3 = \frac{3}{10};\ \alpha_4 = \frac{4}{10}.$$

Для случая, представленного на рис. 1, *б*, характеризующегося тем, что неравенство

```
x[4]-x[3]> = 1
```

приобретает вид

```
x[4]-x[3] = 0,
```

имеем соответствующие результаты

$$[9,[x_1 = 1,\ x_2 = 2,\ x_3 = 3,\ x_4 = 3]],$$
$$\alpha_1 = \frac{1}{9};\ \alpha_2 = \frac{2}{9};\ \alpha_3 = \frac{3}{9};\ \alpha_4 = \frac{3}{9}.$$

Проблема корректности модели. Таким образом, решение задачи (8—11) и последующее нахождение значения коэффициентов α_i не вызывает затруднения за исключением одной небольшой "мелочи". Дело в том, что при составлении системы неравенств (9) можно легко ошибиться, так как при написании очередного неравенства, суть которого — сравнение важности пары критериев, зачастую, особенно при большом количестве частных критериев, выпадают из поля зрения те неравенства (отношения критериев), которые написаны ранее. На рис. 2 представлены четыре системы неравенств.

Первая из них (вариант *а*) соответствует варианту ранжирования критериев *а*, вторая система — варианту *б*, третья система — варианту *в* (см. рис. 1), но в четвёртой системе допущена сознательная, в качестве демонстрации, ошибка (ошибочное неравенство выделено утолщённым шрифтом) — вместо неравенства

```
x[2]-x[1]> = 1,
```

которое взяли за основу из третьей системы, "случайно" написали

```
x[1]-x[2]> = 1.
```

В результате такой ошибки математический пакет выдаст сообщение, что система не имеет решения. Причина этого — *несовместность* четвёртой системы. Несовместными называются системы неравенств, например, типа

$$x_1 - x_2 < 0;$$
$$x_1 > 0;$$
$$x_2 > 0.$$

Действительно, если рассмотреть вариант *г*, то окажется, что переменная x_1 в выражении $x_1 - x_2 \geqslant 1$ ставит критерий F_1 важнее крите-

$x_4 - x_3 \geqslant 1$	$x_4 - x_3 = 1$	$x_4 - x_3 \geqslant 1$	$x_4 - x_3 \geqslant 1$
$x_4 - x_2 \geqslant 1$	$x_4 - x_2 \geqslant 1$	$x_4 - x_2 \geqslant 1$	$x_4 - x_2 \geqslant 1$
$x_4 - x_1 \geqslant 1$	$x_4 - x_1 \geqslant 1$	$x_4 - x_1 \geqslant 1$	$x_4 - x_1 \geqslant 1$
$x_3 - x_2 \geqslant 1$	$x_3 - x_2 \geqslant 1$	$x_2 - x_3 \geqslant 1$	$x_2 - x_3 \geqslant 1$
$x_3 - x_1 \geqslant 1$	$x_3 - x_1 \geqslant 1$	$x_2 - x_1 \geqslant 1$	$x_1 - x_2 \geqslant 1$
$x_2 - x_1 \geqslant 1$	$x_2 - x_1 \geqslant 1$	$x_3 - x_1 \geqslant 1$	$x_3 - x_1 \geqslant 1$
а)	*б*)	*в*)	*г*)

Рис. 2. Системы неравенст

рия F_2, но в то же время критерий F_2, благодаря неравенству $x_2 - x_3 \geqslant 1$, важнее критерия F_3, который важнее критерия F_1, т.е. последние три неравенства в варианте *г* являются несовместными, а значит, несовместной является и вся система неравенств.

Традиционные методы определения совместности неравенств методами, которые используются, например, при определении совместности систем линейных алгебраических уравнений, в частности, с помощью теоремы Кронекера—Капелли [2], когда сравниваются ранги основной и расширенной матриц, не подходят. Можно обратиться к дополнительным материалам [3, 4], где рассматриваются вопросы совместности линейных алгебраических неравенств, но проблема состоит не только в том, чтобы определить несовместность системы линейных неравенств, но и в том, чтобы её своевременно избежать при написании неравенств. Можно ли ещё до решения задачи (8—11) при создании систем неравенств указать на их несовместность и показать, какое неравенство к этому приводит? Можно, если использовать следующий алгоритм, тем более что представленные неравенства имеют достаточно простой и повторяющийся вид — все коэффициенты при неизвестных составляют множество {1, −1}, каждое неравенство имеет только два коэффициента, отличных от нуля, так критерии сравниваются парами (см. рис. 2). Рассмотрим предложенный алгоритм.

Алгоритм определения совместности линейных алгебраических неравенств.

Шаг 1. Положим множество *A* как множество частных критериев, упорядоченное по их номерам — $A = \{F_1, F_2, ..., F_f\}$. Напишем для них систему неравенств. Положим множество *B* как пустое — $B = \{\varnothing\}$. Введём флаг ошибки Error: = false.

Шаг 2. Выберем из множества *A* первый критерий, например, F_1 и положим его во множество *B* с номером $\beta = 1$. Из множества *A* этот критерий удалим.

Шаг 3. Выберем из множества *A* следующий $i + 1$-й критерий по порядку и припишем ему временный номер $\beta' = 0$.

Шаг 4. Составим множество неравенств *C*, необходимых для анализа положения текущего критерия во множестве *B*. При этом если в каком-либо неравенстве данный номер критерия отсутствует (например, нет переменной x_{i+1}, если рассматриваем критерий F_{i+1}), то пропускаем это неравенство. Пропускаем также те неравенства, где номер критерия присутствует, но в этом неравенстве нет критерия из множества *B*. Если есть неравенство, содержащее номер текущего анализируемого критерия и в этом неравенстве есть критерий из множества *B*, то включаем это неравенство во множество *C*.

Шаг 5. Если множество *C* содержит более одного неравенства, то переходим на шаг 6. В противном случае определяем местоположение рассматриваемого критерия во множестве *B* по следующему правилу:

$$\begin{cases} \beta(x_{i+1}) = \beta(x_j), \beta(x_j) = \beta(x_{i+1}) + 1, \\ \text{если } x_{i+1} - x_j \geqslant 1; \\ \beta(x_{i+1}) = \beta(x_j) + 1, \\ \text{если } x_j - x_{i+1} \geqslant 1; \\ \beta(x_{i+1}) = \beta(x_j), \\ \text{если } x_j - x_{i+1} = 0 \text{ или } x_{i+1} - x_j = 0, \end{cases} \tag{14}$$

где x_j — переменная в неравенстве, сравниваемая с текущей x_{i+1}.

Текущий критерий F_{i+1} вносится во множество *B* с номером $\beta(x_{i+1})$ и удаляется из множества *A*. При этом все номера остальных критериев во множестве *B* изменяются в соответствии с тем, что был введён ещё один критерий, например, если новый критерий во множестве *B*, в котором ранее было три элемента, стал вторым по списку, то порядковые номера элементов этого множества, начиная с третьего, увеличатся на единицу. Если номера критериев совпадают (случай $x_j = x_{i+1}$), например $\beta(x_{i+1}) = \beta(x_j) = 3$, то они занимают две соседние позиции во множестве *B*, начиная с номера 3 (позиции 3 и 4).

Если множество *A* пустое, то система совместна и следует перейти на шаг 7 со значением флага Error: = false. Если множество *A* не пустое, то переход на шаг 3.

Шаг 6. По порядку рассматриваем систему неравенств во множестве *C* согласно правилу (14). При этом если для какого-либо неравенства из *C* нашли очередное значение $\beta(x_{i+1})$ и это значение для x_{i+1} ранее для любого из неравенств множества *C* не было равно нулю, то это вновь найденное значение $\beta(x_{i+1})$ должно быть больше или равно предыдущему ненулевому значению $\beta(x_{i+1})$, т.е. значение $\beta(x_{i+1})$ не должно убывать, так как множество *B*, как только в нём появятся первые два элемента, является упорядоченным. В противном случае система несовместна и следует прекратить вычисления с флагом Error: = true и перейти на шаг 7.

Если для всего множества *C* при анализе каждого неравенства значения $\beta(x_{i+1})$ не убы-

вают, то на данный момент система совместна, необходимо, как и на шаге 5, внести рассматриваемый критерий во множество *B*, удалить его из множества *A*, флагу присвоить значение Error: = false.

Если множество *A* пустое, то необходимо перейти на шаг 7, если не пустое, то перейти на шаг 3.

Шаг 7. Если флаг Error имеет значение false, то система совместна и можно решать задачу (8—10). Если флаг Error имеет значение true, то система несовместна и необходимо обратить внимание на анализируемую пару x_j, x_{i+1} в целях переопределения неравенств как отношения критериев.

Конец работы алгоритма.

Данный алгоритм, поскольку работает по принципу перебора всех неравенств, является аналитическим. Тем не менее, его вычислительная сложность не так высока и в худшем случае определяется как

$$O = m(f - 1), \qquad (15)$$

где m — количество уравнений; f — количество критериев.

Выводы. Таким образом, в работе решена проблема определения значения весовых коэффициентов с минимальной долей неопределённости, когда экспертам необходимо сравнивать лишь пары критериев, определяя значимость одного из них относительно другого. Кроме того, предложен алгоритм проверки корректности математической модели на предмет совместности получаемых линейных алгебраических неравенств модели. Предложенные метод и алгоритм могут быть использованы в различных задачах автоматизации принятия решений при использовании функционалов с весовыми коэффициентами.

Библиографические ссылки

1. **Оуэн Г.** Теория игр. М.: Мир, 1971. 230 с.
2. **Карпелевич Ф.И., Садовский Л.Е.** Элементы линейной алгебры и линейного программирования. М.: Физматгиз, 1963. 274 с.
3. **Зоркальцев В.И., Киселёва М.А.** Системы линейных неравенств. Иркутск. Изд-во ИГУ, 2007. 99 с.
4. **Солодовников А.С.** Системы линейных неравенств. М.: Наука, 1977. 112 с.

УДК 65.011.56

А.В. Пузанов, канд. техн. наук
(ОАО "Специальное конструкторское бюро приборостроения и автоматики", г. Ковров)
avp@oao-skbpa.ru

МУЛЬТИДИСЦИПЛИНАРНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНОЙ ТЕХНИКИ

Рассмотрены основные проблемы, возникающие при разработке мобильной техники и систем управления. Предложен подход к модельным исследованиям приборов и систем управления мобильной техники с учётом процессов, имеющих разнофизичный характер: кинематика, трибомеханика, прочность, температура, гидромеханика и т.д. Рассмотрен также программный комплекс, позволяющий проводить исследования на виртуальных моделях с учётом данных факторов воздействия на проектируемый объект. Приведены практические примеры решения задач из обозначенной области.

Ключевые слова: система автоматизации проектирования; инженерный анализ; мультидисциплинарный анализ; мультифизика; системы управления; мобильная техника; гидропривод.

The main problems encountered in the development of mobile equipment and control systems are considered. An approach to modeling research of the apparatus and control systems of mobile equipment, taking into account the processes that have various physically character: kinematics, tribomehanika, strength, temperature, hydromechanics, etc — is proposed. We also consider The software complex that allows you to carry out research on virtual models, taking into account given influence factors on the projected object is considered. The practical examples of problem solving from the designated area are adduced.

Key words: automation design system; engineering analysis; multidisciplinary analysis; multiphysics; control systems; mobile equipment; hydraulic drive.

Уменьшение габаритов и снижение массы мобильной техники в целях повышения её удельной мощности влечёт за собой нарушение многих устоявшихся принципов, методик и средств проведения проектных работ. На смену многочисленным тестам и натурным испытаниям, расчётам по таблицам, экспериментальным и эмпирическим коэффициентам приходят новые, более точные методики и виртуальные модели.

Получение результатов, более подробно отражающих суть физических явлений, в минимальные сроки возможно при помощи современного аналитического мультидисциплинарного программного обеспечения.

Мультидисциплинарный (мультифизичный) анализ призван объединить в единой реализации математический аппарат различной физической природы: механики, кинематики, гидромеханики, электромагнетизма, теплотехники и т.д.

В природе физические явления не происходят изолированно, вне связи между собой и с внешними факторами воздействия, о чём свидетельствуют мультидисциплинарные расчёты. Более точные виртуальные модели позволят снизить коэффициент запаса как меру несовершенства математического аппарата и сумму допущений.

Применение мультидисциплинарного подхода к исследованиям, однако, влечёт за собой изменение устоявшихся принципов проведения работ (декомпозиция систем по специализированным подразделениям, сформированным по обособленным направлениям, например отдел теплотехники, аэродинамики, прочности и т.п. [1]).

Тем самым многогранный спектр решаемых задач определяет требования к системе конструкторско-технологической подготовки производства в целом и модельному сопровождению жизненного цикла изделия (ЖЦИ) в частности. В данном контексте немаловажным является принцип бесшовности (АВП: различный функционал в одном программном окне) на уровне интерфейсов и форматов данных, используемых по всему циклу подготовки производства и ЖЦИ. Взаимосвязь программных комплексов в мультидисциплинарных задачах — залог их эффективности. Поэтому необходимо иметь соответствующий инструмент анализа: либо набор из узкоспециализированных программ (как правило, наследие прошлых лет), либо один универсальный программный комплекс.

В нашем случае применение Autodesk Simulation Multiphysics позволяет использовать единый формат данных, без промежуточных файлов обмена, а прямая ассоциативная связь Autodesk Inventor — Autodesk Simulation Multiphysics — сократить количество промежуточных конструктивных вариантов проработки изделий.

Аналитический аппарат Autodesk Simulation Multiphysics включает в себя следующие типы расчётов: статические напряжения и линейная динамика; статическая и динамическая прочность; комбинированный прочностной и кинематический анализ; моделирование динамики многомассовых систем с поддержкой крупномасштабного движения и сильных деформаций с учётом их контактного взаимодействия; электростатика; вычислительная гидродинамика; теплоперенос и теплопередача, моделирование комплексных физических процессов (исследование нескольких физических процессов сопоставлением результатов разных видов анализа) [2].

Наибольшим сочетанием одномоментных мультифизичных эффектов обладают изделия ядерной энергетики, авиации и космоса. Для мобильной техники (военной, дорожно-строительной, лезозаготовительной и т.п.) наиболее сложными с точки зрения многофакторности воздействий являются изделия электрогидропривода (как отдельной силовой части систем управления, так и комбинированной). Электрогидравлические приводы — неотъемлемый элемент высокоэффективной техники, обладающие большой удельной мощностью, высоким быстродействие, малыми габаритами, экономичностью и сочетаемостью с микропроцессорной техникой управления, что обеспечило их широкое распространение в системах управления мобильной техникой.

Рассмотрим использование мультидисциплинарного программного обеспечения на примере моделирования рабочих процессов высоконагруженных аксиально-поршневых гидромашин (АПГМ) (рис. 1, см. обложку) как основного элемента электрогидропривода, определяющего качество и надёжность всей системы.

Принцип работы гидромашины основан на преобразовании механической энергии приводного двигателя в гидравлическую энергию рабочей жидкости (или наоборот — для гидромотора). Преобразование энергий вне зависимости от конструктивных схем и исполнений предполагает взаимодействие элементов конструкции (изделия) посредством рабочей жид-

кости для обеспечения жидкостного трения. В таком случае срок службы (ресурс) машины практически неограничен. Однако в процессе эксплуатации (перегрузки, ударные нагрузки, работа в жёстких климатических условиях при высоких или низких температурах, старт-останов, переходные режимы и т.д.) элементы гидромашины приходят в непосредственный контакт, что в результате резко сокращает ресурс.

Особенности рабочего процесса гидромашин в том, что при контакте сопряжённых поверхностей деталей локально повышается температура, которая влияет на изменение линейных размеров механической системы, а также на изменение свойств материалов: в большей степени свойств рабочей жидкости, в меньшей — механических элементов [3].

Ранее, при использовании узкоспециализированного монодисциплинарного программного обеспечения на некоторых режимах работы гидромашины не удавалось достичь сходимости, используя разумную (5...10 %) погрешность промежуточных расчётов. Тем самым снижались эксплуатационные характеристики (и конкурентоспособность), а проведение многоэтапных эксплуатационных доработок увеличивало стоимость и время производства серийного образца.

Таким образом, в моделях рабочих процессов гидроприводов происходит взаимовлияние дисциплин: теории прочности, механики, гидродинамики, теплообмена.

При анализе моделей учитывали факторы деформации, упругие и упругопластические взаимодействия, контакт деталей с учётом гидромеханики, температуры, различных моделей трения, шероховатости и т.д.

Исходными данными являлись параметрическая 3D-модель деталей гидромашины, свойства рабочей жидкости и конструкционных материалов, параметры окружающей среды, внешние воздействия, регламентированные техническим заданием.

По результатам мультидисциплинарного моделирования был проведён анализ работоспособности механизма АПГМ: доработаны элементы конструкции в направлении повышения жёсткости; определён вероятностный износ, проведена его минимизация; снижены пики, повышена равномерность напряжений для повышения усталостной прочности [3].

На рис. 2 (см. обложку) представлена совмещённая картина напряжённо-деформированного состояния ходовой части гидромашины и гидромеханика потока рабочей жидкости в рабочей камере насоса в зоне всасывания.

На следующем примере рассмотрим моделирование гидромеханических процессов в проточной части гидромашины для определения оптимальных соотношений перепада давления и расхода утечек через данный элемент. При подаче давления из магистрали нагнетания через дроссель в поршне под гидростатическую опору поршня происходит её "всплытие". Низкое давление под гидростатической опорой поршня приведёт к продавливанию опорой масляной плёнки и при контакте — к быстрому износу и выходу из строя всей конструкции насоса; при большом давлении будет увеличиваться расход утечек, что снизит КПД насоса. Кроме того, локальное увеличение скорости потока приводит к локальному снижению давления, что инициирует кавитацию — "вскипание" (выделение растворённого газа) в рабочей жидкости. Это приводит к снижению характеристик рабочей жидкости и кавитационному износу сопряжённых кромок.

При заданной погрешности расчётов 5 % на эксперименте получали либо прижоги сопряжённых деталей и их увеличенный износ, либо за счёт увеличения утечек гидравлический КПД гидромашины выходил за пределы значений, установленных в техническом задании (ТЗ).

Мультидисциплинарный эффект заключается в следующем. Воздействие рабочей жидкости определяет деформацию механической системы, которая, изменяя форму сопряжённых поверхностей (на рис. 3 — слева), изменя-

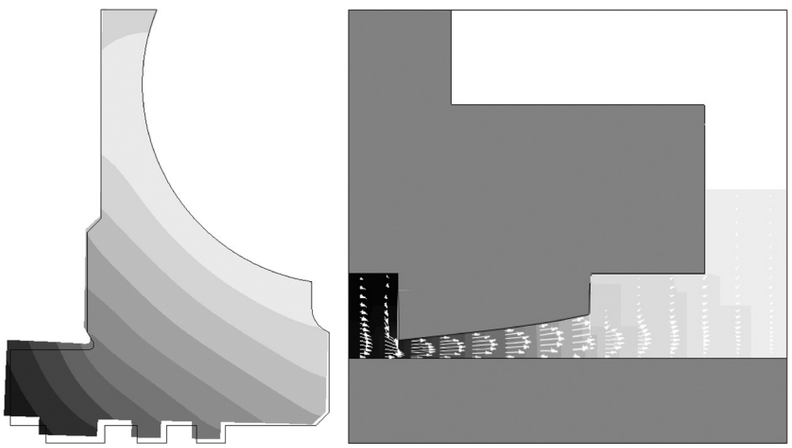

Рис. 3. Деформация гидростатической опоры и изменение гидромеханики опорной жидкостной плёнки

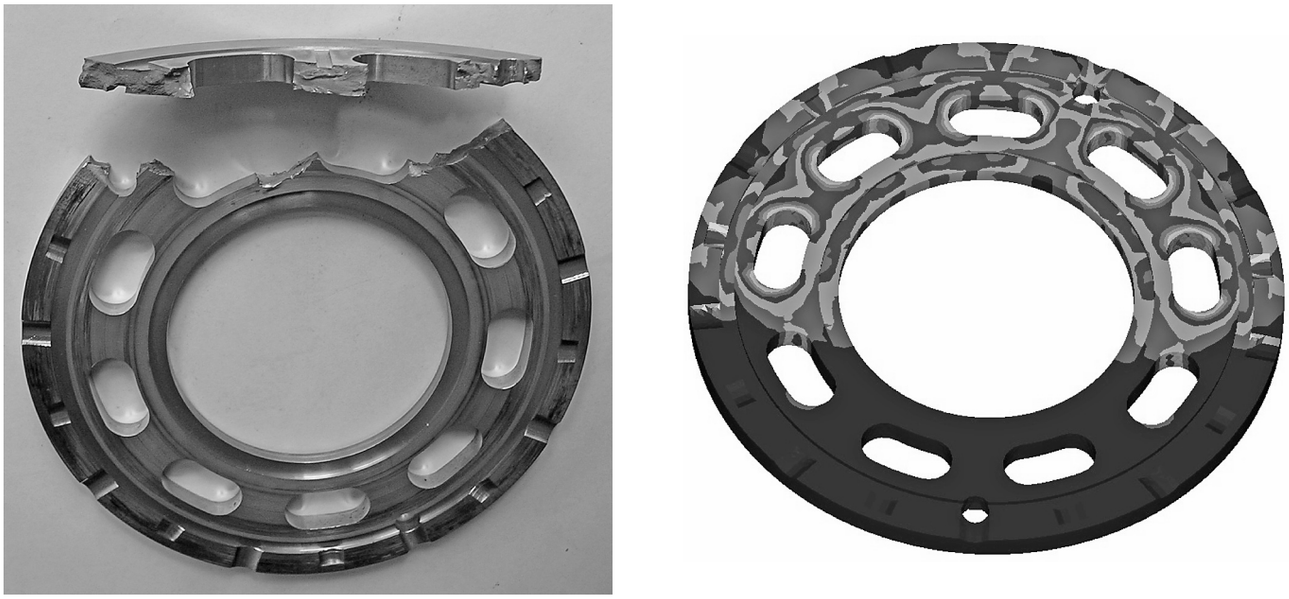

Рис. 4. Анализ причин разрушения латунного накладного дна

ет граничные условия протекания жидкости (на рис. 3 — справа) и, соответственно, её реактивное воздействие на детали.

В результате модельных исследований были подобраны конструктивные параметры дросселя поршня (комбинацией из двух типов дросселей — квадратичного и линейного), что позволило обеспечить заданный уровень давления рабочей жидкости в опорной части гидростатического подшипника и снижение максимальной скорости потока жидкости ниже кавитационной в широком диапазоне рабочих режимов насоса.

Пример использования мультидисциплинарного программного обеспечения — анализ причин разрушения — показан на рис. 4.

Для данной модели, перебирая варианты того или иного фактора воздействия (увеличивая или уменьшая их влияние), был проведён анализ причин разрушения детали. На основании подобного моделирования выносится решение о степени виновности участников ЖЦИ.

Использование результатов данного исследования позволяет не только проводить оценку причин разрушения, но и прогнозировать степень возможного форсирования и ресурс [4].

Следующий пример относится не столько к применению мультидисциплинарного программного обеспечения, сколько к использованию его результатов для определения запаса надёжности (по критерию усталости), что позволяет виртуализировать реальные ресурсные испытания.

Для анализа усталостной прочности (приводного вала гидромашины, изображённой на рис. 1) использованы результаты мультидисциплинарного анализа напряжений и деформации и задание диаграммы нагружения.

Результаты моделирования запаса надёжности (по критерию усталости) при заданном в ТЗ количестве циклов нагружения приведены на рис 5.

Как следует из результатов моделирования (см. рис. 5), запас данной конструкции меньше 1 (красным показан запас <1, жёлтым <1,3, зелёным >1,3), следовательно, данное конструктивное исполнение вала гидромашины не удовлетворяет критерию надёжности для заданного срока службы. Для этой модели возможно решение обратной задачи — определение количества циклов до разрушения при заданном значении коэффициента запаса.

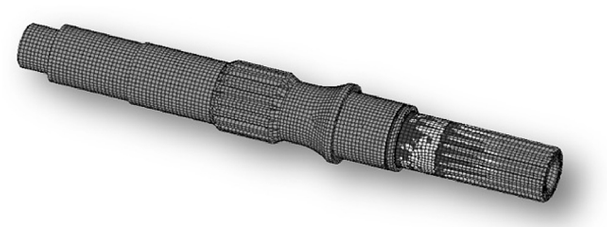

Рис. 5. Запас надёжности при заданном числе циклов нагружения

Кроме силовых элементов, системы управления мобильной техники содержат комплекты и изделия, которые также подвержены воздействию нагрузок, имеющих мультифизичный характер.

При изменении температуры (внешней или от электронных компонентов системы) происходит температурная деформация, а при сопряжении деталей из разных материалов — расслоение, таким образом возникают внутренние напряжения, вызванные температурной деформацией. При этом для систем управления мобильной техникой необходимо обеспечить либо снижение температурных напряжений, либо конструктивно плотное прилегание радиаторной системы к источнику тепла.

В данном примере в качестве тепловой нагрузки приложена максимальная мощность тепловыделения по паспорту электронных компонентов, а также естественная конвекция по свободным поверхностям модуля. Результаты моделирования представлены на рис. 6 (см. обложку).

Кроме приведённого примера, электронные блоки и механические системы мобильной техники испытывают воздействие вибрации либо при транспортировании, либо в процессе функционирования. Под действием нагрузки (механической или тепловой) собственные (резонансные) частоты изменяют свои значения. Совпадение собственных частот с внешними недопустимо, поскольку это событие приводит к резонансу всего компонента и его преждевременному выходу из строя [5].

На следующем примере (рис. 7, см. обложку) представлены результаты моделирования устойчивости пульта управления мобильным транспортным средством к ударному воздействию (дроп-тест) на морозе.

В данном случае при изменении температуры происходит изменение линейных размеров механической системы, что предопределяет образование внутренних напряжений. При изменении температуры изменяются и свойства материалов. Тем самым погрешность моделирования без учёта данных воздействий может достигать кратных величин.

Заключение. Качественным результатом применения мультифизичного программного обеспечения явился сам факт многофакторного мультидисциплинарного моделирования силовых и управляющих систем и элементов мобильной техники, получение рабочих характеристик, наиболее полно приближенных к реальным условиям работы объекта; определение степени влияния каждого из факторов; моделирование специальных аварийных режимов его работы (например, режим страгивания, стоп-режим, режим перегрузки, запуск на морозе и т.п.).

Исследования с использованием мультидисциплинарного математического аппарата позволили аналитически получить оптимальные соотношения конструкторско-технологических параметров для снижения себестоимости производства без значимого ухудшения рабочих параметров.

Полученные результаты дали возможность перейти на качественный уровень моделирования рабочих процессов электрогидроприводов, значительно сократить (за счёт сокращения количества фальш-итераций) сроки проектирования новых изделий, модернизировать, увеличив ресурс, и форсировать существующий номенклатурный ряд, повысить надёжность и долговечность серийно выпускаемой продукции, обеспечить устойчивость к воздействиям на мобильный объект факторов различной физической природы.

Проведённый сравнительный анализ аналитических и экспериментальных данных (для модели гидромашины) выявил их совпадение с погрешностью 0,8...1,5 % в количественном выражении и полное качественное совпадение результатов.

Библиографические ссылки

1. **Пузанов А.В., Куванов К.Е., Часовских А.Н.** Автоматизация конструкторско-технологической подготовки производства в ОАО "СКБ ПА" // САПР и графика. 2009. № 11. С. 25—28.

2. **Пузанов А.В.** Инженерный анализ в Autodesk Simulation Multiphysics: Методическое руководство. — М.: ДМК Пресс, 2013. 912 с.

3. **Пузанов А.В.** Исследование влияния нелинейных факторов взаимодействия конструктивных элементов на рабочие процессы высоконагруженных аксиально-поршневых гидромашин // Конструктор-машиностроитель. 2008. № 1. С. 42—47.

4. **Пузанов А.В.** Опыт использования современного мультифизичного ПО в разработке электрогидроприводов // САПР и графика. 2008. № 4. С. 75—79.

5. **Пузанов А.В., Архипова О.А.** Расчёт устойчивости к механическим воздействиям информационной системы бронетанковой техники // Материалы IV Всероссийской науч.-техн. конф. "Информационно-измерительные и управляющие системы военной техники". Владимир, 2014 г. М.: Издательство РАРАН, 2014. С. 136—139.

УДК 658.012.011.56

Ш.Д. Туляганов
(Ташкентский государственный технический университет имени Абу Райхана Беруний),
И.В. Нестеров
(ООО "ASU-Engineering", г. Ташкент)

asueng@mail.ru

СОВРЕМЕННЫЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМИ ПРОЦЕССАМИ ПЕРЕРАБОТКИ ПРИРОДНОГО ГАЗА НА МУБАРЕКСКОМ ГАЗОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩЕМ ЗАВОДЕ

Рассмотрено создание высокоинтеллектуализированных автоматизированных систем управления технологическими процессами (ИАСУТП), построенных на современной программно-аппаратной базе, позволяющих обеспечить существенное снижение энергетических затрат и ресурсосбережение производств. Предложенная автоматизированная система управления технологическими процессами оперативно-диспетчерского управления (АСОДУ) на Мубарекском газоперерабатывающем заводе позволяет переложить на неё большую часть ответственных операций, повысив качество продукции, продлить срок службы производственного оборудования, увеличить объём производства, снизить производственные потери, улучшить условия труда.

Ключевые слова: автоматизация; система управления; энергетические затраты; оперативно-диспетчерское управление; ресурсосбережение; производство; учёт газа.

The creation of a highly intellectual automatic system for technological processes control (APCS) is considered. The systems are built on modern software and hardware base, allowing to provide a significant reduction in energy consumption and resource-saving. The proposed automatic control system for technological processes of the efficiently dispatching management (ADCS) at the Mubarek gas processing plant allows shifting on this system most of the important operations improve product quality, extend the service life of production equipment, increase production volume, reduce production losses and improve working conditions.

Keywords: automation; control system; energy costs; efficiently dispatching management; resource-saving; production; gas accounting.

Введение. Реализуемые широкомасштабные программы модернизации и реконструкции отраслей промышленности и социально-экономического сектора требуют создания высокоэффективных производств, обеспечивающих выпуск продукции с высокой добавленной стоимостью.

Необходимо создание высокоинтеллектуальных автоматизированных систем управления технологическими процессами (ИАСУТП), построенных на современной программно-аппаратной базе, позволяющих обеспечить существенное снижение энергетических затрат и ресурсосбережение производств.

Автоматизированные системы управления должны в органическом единстве генерироваться с принципиально новыми системами оперативного анализа технологических, организационно-технических ситуаций для прогнозирования эффективности протекания технологических процессов, предупреждения возникновения нештатных ситуаций и оперативной их ликвидации.

Создаваемые ИАСУТП должны разрабатываться в полном соответствии с законодательными актами "О промышленной безопасности" и обеспечивать промышленную безопасность производств.

В Республике Узбекистан накоплен значительный опыт в теоретическом обосновании внедрения систем автоматизации технологических процессов и регулирования технологических режимов эксплуатации производств.

Остро стоит вопрос о необходимости практического использования результатов научных исследований в отраслях промышленности, при разработке конкретных проектов автоматизации производств.

Требуется создавать автоматизированные системы управления технологическими процессами (АСУТП), основанные на разработке и внедрении современных систем управления технологическими процессами (SCADA), что обеспечит существенную экономию финансовых ресурсов в процессе проектирования и строи-

тельства объектов, а также, что немаловажно, при длительной эксплуатации этих систем.

Характеристика объекта управления. Сырьём для унитарного дочернего предприятия (УДП) "Мубарекский газоперерабатывающий завод", является природный сероводородсодержащий газ, поступающий на завод от УДП "Мубарекнефтегаз".

Текущая производительность завода (приём на переработку): 26 549 млн м^3/г сернистого газа. Выход товарной продукции: сухой очищенный газ 24 349 млн м^3/г, стабильный конденсат 65,0 тыс. т/г., сжиженный газ 235 тыс. т/г., сера газовая 240 тыс. т/г.

Завод имеет 18 блоков аминовой сероочистки, 5 блоков получения серы по методу Клауса, установку стабилизации конденсата, 2 аммиачно-холодильные установки, установку доочистки хвостовых газов Сульфрен, установку получения серы методом прямого окисления, пропаново-холодильную установку (ПХУ), установку получения пропан-бутановой смеси (УППБС), товарный прирельсовый парк (ПРП).

Очищенный и осушенный газ направляется в систему магистральных газопроводов акционерной компании "УзТрансГаз", г. Ташкент. Стабильный конденсат, сера и сжиженный газ отгружаются потребителям по железной дороге и автомобильным транспортом.

Анализ недостатков существующей системы диспетчерского управления производством и связанных с ними производственных потерь показывает следующие основные недостатки существующей системы диспетчерского управления производством в УДП "Мубарекский ГПЗ":

отсутствие единой комплексной системы учёта газа для автоматизации сведения баланса между газодобывающим предприятием УДП "Мубарекнефтегаз", газоперерабатывающим предприятием УДП "Мубарекский ГПЗ" и газотранспортной компанией АК "Узтрансгаз". Основной проблемой коммерческих отношений между этими предприятиями является дисбаланс, возникающий при физическом учёте объёма газа от поставщика к потребителю. Внедрение единой системы учёта газа (учёт газа на входе МГПЗ с замерного узла, учёт газа на входе и выходе из цехов, учёт газа на выходе с МГПЗ) с автоматизированной системой сбора и обработки информации и алгоритмами расчёта материального баланса подачи, распределения и потребления газа, позволят достоверно прогнозировать дисбаланс, анализировать нештатные ситуации (выявление возможных утечек и т.д.), оптимизировать непроизводственные потери;

отсутствие системы комплексного учёта энергоресурсов (вода, электроэнергия, пар);

отсутствие системы комплексного учёта СУГ (сжиженный газ), конденсата. Здесь под комплексным учётом и контролем понимается учёт и контроль на всем производственном цикле от производства, хранения и отпуска продукции СУГ и конденсата и расчёт производственных потерь и баланса;

ограничение возможности оперативного доступа к необходимой информации, вследствие чего управленческие решения приходится принимать часто по необъективным и неполным данным, что существенно влияет на правильность принимаемых решений по управлению производством;

длительная периодичность оперативного контроля за ходом производства (каждые 2 ч), что не позволяет принимать эффективные решения по управлению производством;

большой объём бумажного документооборота.

Характеристики создаваемой АСОДУ ЦДС МГПЗ. Автоматизированная система оперативно-диспетчерского управления производством (АСОДУ) предназначена для автоматизации деятельности центрального диспетчера МГПЗ.

Функции, реализуемые АСОДУ ЦДП МГПЗ:

мониторинг параметров технологических процессов в реальном времени, автоматическая корректировка;

диалоговая поддержка решений, формирование, принятие и исполнение управленческих решений.

Анализ производительности — предоставление подробных отчётов о реальных результатах производственных операций. Сравнение плановых и фактических показателей.

На рис. 1 приведена мнемосхема реализуемой АСОДУ ЦДП МГПЗ.

Контроль состояния и управление ресурсами производства: технологическим оборудованием, сырьём, выводом на мониторы диспетчера ("видеостенды") основных параметров с технологических установок производственных цехов.

Оперативное планирование — расчёт производственных планов производства, исходя из текущей производственной ситуации.

Управление качеством продукции — анализ данных измерений качества продукции в режиме реального времени на основе инфор-

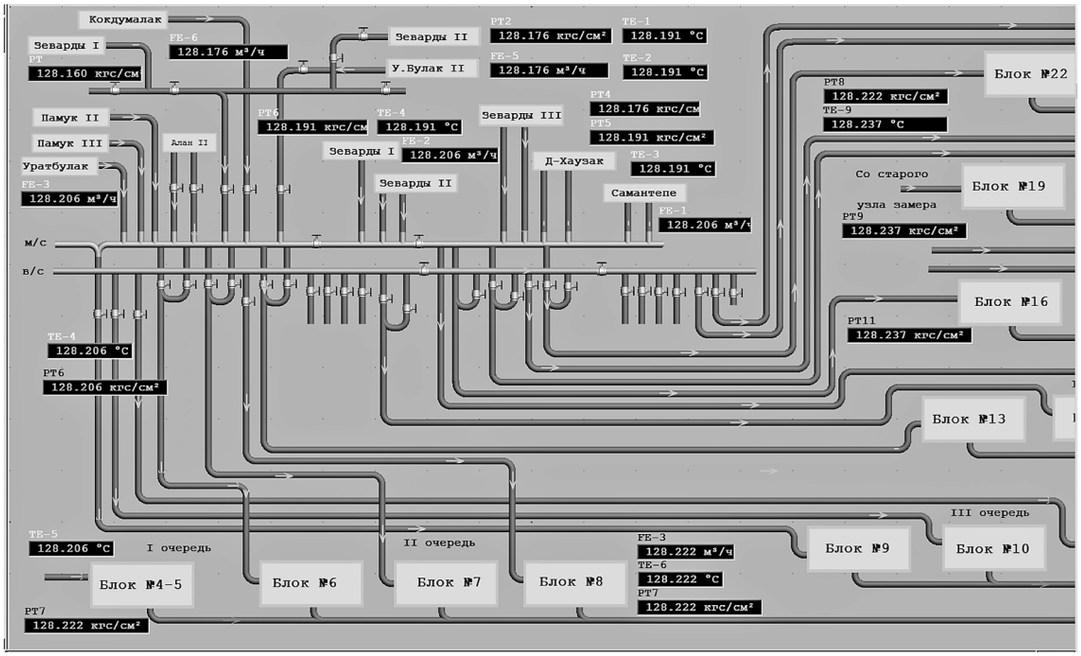

Рис. 1. Мнемосхема реализуемой АСОДУ ЦДП МГПЗ

мации, поступающей с технологических установок производственных цехов, обеспечение должного контроля качества, выявление критических точек и проблем, требующих особого внимания.

Комплексный учёт и контроль продукции. Контроль текущего дисбаланса конденсата (суточного, месячного): между произведённой продукцией (установка получения пропан-бутановой смеси, установка стабилизации конденсата), остатков (в резервуарах) и отпуском их на прирельсовом парке (ПРП) (автомобильные и железнодорожные весы) и учёт технологических потерь.

В настоящее время на предприятиях компании "Узбекнефтегаз" (УДП "Мубарекский ГПЗ", УДП "Шуртаннефтегаз", УДП "Газлинефтегаздобыча") при управлении технологическими процессами переработки газа, производства сжиженного углеводородного газа и резервуарных парков эксплуатируются АСУТП, созданные на базовом программно-техническом комплексе (ПТК) SCADA-Integrator [1]. На рис. 2 представлена информационная структура АСОДУ МГПЗ, реализуемая при помощи SCADA-Integrator.

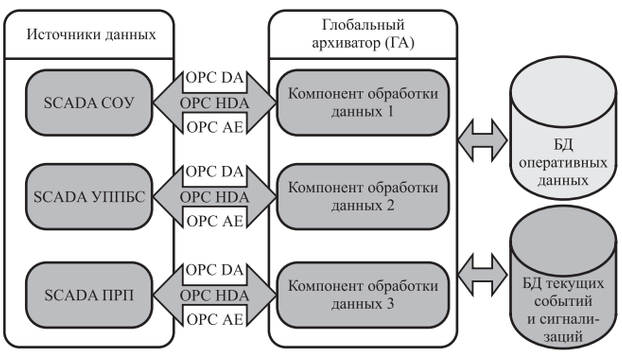

Рис. 2. Информационная структура АСОДУ МГПЗ, реализуемая с помощью SCADA-Integrator

Программный пакет SCADA-Integrator разработан специалистами Узбекистана (ООО ASU-Engineering, г. Ташкент). До настоящего времени этот продукт, являющийся национальным продуктом Республики Узбекистан (сертификат соответствия № UZ. SMT.01.031.1618720), является единственным законченным программным продуктом, на базе которого имеется возможность создания АСУТП для различных производств технологического профиля.

SCADA-Integrator изначально проектировалась как модульная и открытая система. Открытость системы — это поддержка стандартов OPC (OLE for Process Control — промышленный стандарт, созданный консорциумом всемирно известных производителей оборудования и программного обеспечения при участии Microsoft), ODBC (Open Database Connectivity) — открытый интерфейс доступа к базам данных, протоколов МЭК-61850, МЭК-60870-101/103/104, ModBus.

Преимущества внедрения системы АСОДУ ЦДП МГПЗ. Создание АСОДУ ЦДП позволяет переложить на неё большую часть ответственных операций, повысив качество продукции, продлить срок службы производственного оборудования, увеличить объём производства, снизить производственные потери, улучшить условия труда [2].

Фактор эффективности АСОДУ:

повышение эффективности и непрерывности эксплуатации за счёт уменьшения внеплановых простоев вследствие оперативного контроля за аварийными ситуациями;

увеличение выпуска продукции за счёт контроля в реальном времени за основными технико-экономическими и плановыми показателями;

уменьшение количества брака продукции вследствие централизованного оперативного контроля за качеством продукции и сырья;

комплексный автоматизированный технологический и коммерческий учёт продукции позволяет существенно сократить потери продукции и наладить её чёткий учёт;

повышение эффективности и непрерывности эксплуатации благодаря уменьшению внеплановых простоев и оперативному контролю за аварийными ситуациями;

увеличение выпуска продукции за счёт контроля в реальном времени за основными технико-экономическими и плановыми показателями;

уменьшение количества брака продукции вследствие централизованного оперативного контроля за качеством продукции и сырья;

комплексный автоматизированный технологический и коммерческий учёт продукции, который позволяет существенно сократить потери и наладить чёткий учёт продукции.

Проектом предполагается вывод в центральную диспетчерскую всех учётных параметров от установленных систем технического и коммерческого учёта продукции и сырья в реальном времени.

Оперативное прослеживание учётных параметров по полному комплексу технологических систем (вход сырья—процесс—выход продукции) позволяет оперативно анализировать производство продукции совместно с работой технологических систем.

На рис. 3 представлена мнемосхема АСУТП парка хранения сжиженного углеводородного газа (СУГ) на МГПЗ.

При обеспечении контроля технологических режимов эксплуатации полного комплекса систем сероочистки и УПБС будет достигнуто снижение простоев технологических установок по всему технологическому комплексу МГПЗ в среднем на 100 ч в год.

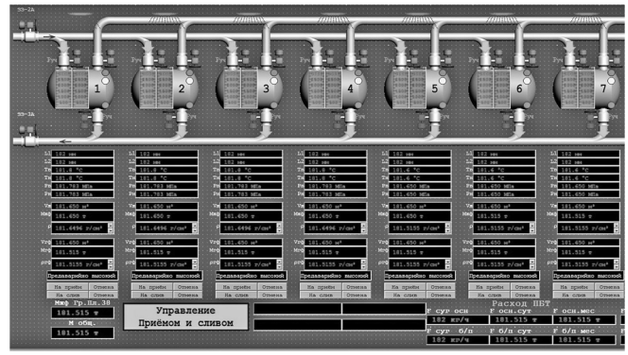

Рис. 3. АСУТП парка хранения сжиженного углеводородного газа (СУГ) на МГПЗ

Заключение. Предложенная АСОДУ на Мубарекском ГПЗ обеспечит:

получение оперативной информации о состоянии и параметрах работы оборудования завода для дальнейшего анализа эффективности его работы;

повышение надёжности, безопасности и качества функционирования оборудования МГПЗ;

автоматизацию диагностики и контроля за периодичностью обслуживания оборудования;

сокращение затрат на обслуживание оборудования и энергоресурсы;

уменьшение времени диагностирования неисправностей различного инженерного оборудования.

Рассмотренный вариант решения диспетчеризации МГПЗ реализуем и не требует больших затрат на сбор данных и настройку сложных моделей с нуля, а также приобретения дорогостоящих SCADA-пакетов зарубежного производства.

Библиографические ссылки

1. **Нестеров И.В., Туляганов Ш.Д., Назаров А.У.** Инновационные системы автоматизированного управления объектами добычи нефти и газа, их роль в ресурсо-энергосбережении производства // Тр. Восьмой всемирной конф. "Интеллектуальные системы для индустриальной автоматизации", г. Ташкент. 2014 г. 320 с.

2. **Назаров У.С., Куртов М.Н., Садиев Х.Ф.** Информационно-аналитическая система оперативного анализа и контроля эффективности эксплуатации подземных хранилищ // Тр. Междун. науч.-техн. конф. "Современные проблемы и развитие нефтегазового потенциала недр", г. Ташкент, 2012 г. 250 с.

УДК 519.854.2

В.А. Головешкин, д-р техн. наук, проф.,
(Институт прикладной механики РАН, Московский технологический университет),
Г.Н. Жукова, канд. физ.-мат. наук, доц.,
(Московский государственный университет печати им. Ивана Фёдорова),
М.В. Ульянов, д-р техн. наук, проф.
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН,
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова)
М.И. Фомичёв,
(Национальный исследовательский университет "Высшая школа экономики")

muljanov@mail.ru

ОБ ОДНОМ ОБОБЩЁННОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ КЛАССОВ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ ЗАДАЧ КОММИВОЯЖЁРА

Рассмотрено новое обобщённое представление для классов индивидуальных задач коммивояжёра — матрица номеров порядка, предназначенное для выделения классов задач, обладающих близкой сложностью. Полученный результат направлен на решение задачи прогнозирования сложности для индивидуальных задач коммивояжёра. Сформулированы две гипотезы относительно мощности предложенного обобщения. Приведены метод получения матрицы номеров порядка и ряд предварительных экспериментальных результатов, не противоречащих одной из выдвинутых гипотез.

Ключевые слова: матрица номеров порядка; задача коммивояжёра; метод ветвей и границ; сложность.

The article is devoted to a new generic representation of classes of particular travelling salesman problems (TSP), we call it "index number matrix". This representation is intended for a separation of problem classes of similar complicity. This result is destined to solve a problem of particular TSP's complicity prediction. Two hypotheses are given regarding to an appliance of the representation, that is proposed in the article. A method of index number matrix construction is also given. Some results are obtained by experiments, which didn't interfere with one of our hypotheses.

Keywords: index number matrix; travelling salesman problem; branch and bound method; complicity.

Введение. Для современных наукоёмких технологий актуальной и практически интересной является проблема прогнозирования временных характеристик задач большой размерности и вычислительной сложности. К этому типу относится, очевидно, и задача коммивояжёра (TSP), принадлежащая в терминологии теории сложности к классу NP-трудных задач. Несмотря на более чем полувековые исследования этой задачи, точные методы её решения имеют экспоненциальную сложность, а принадлежность алгоритмов, доставляющих её точные решения к классу NPRH [1] — классу алгоритмов с сильной параметрической зависимостью трудоёмкости при фиксированной размерности, — не позволяет эффективно быстро получить априорные прогнозы времени выполнения индивидуальной задачи.

Многообразие практических ситуаций, связанных с необходимостью прогнозирования временных характеристик для программных реализаций метода ветвей и границ для решения асимметричной задачи коммивояжёра, обусловливает актуальность модификации существующих и разработки новых методов исследований и анализа индивидуальных постановок задачи коммивояжёра. Поскольку для актуальных размерностей задачи коммивояжёра ожидаемое время решения достаточно велико, то указанная проблематика связана, в первую очередь, с необходимостью обеспечения заданных показателей качества по прогнозу времён в условиях различных требований, диктуемых областями применения точных решений задачи коммивояжёра.

Прогнозирование временных характеристик индивидуальных задач может быть основано, в том числе, и на построении различных обобщений, т.е. построении классов задач. Основная идея данной статьи базируется на

известном подходе анализа алгоритмов, основанном на методе классов входных данных, применение которого позволило получить значимые результаты для ряда алгоритмов. На основе данного метода разрабатывается обобщённое представление, объединяющее ряд индивидуальных задач с близкими порождёнными деревьями решений. Последующее исследование полученных представлений методами спектрального анализа матриц может лечь в основу кластеризации обобщённых представлений по сложности, и, тем самым, кластеризации индивидуальных задач коммивояжёра по трудоёмкости.

Задача коммивояжёра и метод ветвей и границ. Содержательная постановка задачи состоит в том, что коммивояжёр должен посетить ряд городов для рекламы и продажи товаров. Предполагается, что между каждой парой городов существует собственное транспортное сообщение. Будем называть туром такой порядок посещения, при котором каждый город посещается ровно один раз. Стоимости проезда между городами известны, причём, в общем случае, стоимость проезда туда и обратно может отличаться. Математическая постановка задачи заключается в отыскании гамильтонова цикла (тура) минимальной стоимости в полном ориентированном графе с нагруженными дугами. Очевидно, что количество туров — конечно, и задачу можно решить прямым перебором. Но полное множество будет содержать $(n - 1)!$ туров. Такой алгоритм решения становится для реальных размерностей задачи совершенно неприемлемым.

Пусть $A = \{a_{ij}\}$ — матрица стоимостей, описывающая полный ориентированный граф с n вершинами без собственных петель ($a_{ii} = \infty \ \forall i = \overline{1,n}$). Далее рассматривается асимметричная задача коммивояжёра, т.е. $a_{ij} \neq a_{ji}$ хотя бы для некоторых i и j [2].

Общая идея метода ветвей и границ предполагает разделение всего множества допустимых решений на подмножества для дальнейшего сокращения перебора — это процедура ветвления. С каждым таким подмножеством должна быть связана оценка (нижняя граница при поиске минимума), обеспечивающая отсечение тех подмножеств, которые заведомо не содержат оптимального решения — это процедура построения границ. Таким образом, метод позволяет исследовать древовидную модель пространства решений. В рассматриваемой задаче таким исходным множеством является множество всех туров коммивояжёра, на котором минимизируется целевая функция, задающая стоимость тура. Представленные ниже идеи [3] — это своего рода классика метода ветвей и границ. Для построения алгоритма необходимо предложить две основные процедуры — ветвление и построение границ. Рассмотрим процедуру ветвления, предложенную в работе [3]. Построение поискового дерева решений начинается с корня, который будет соответствовать множеству "всех возможных туров", т. е. корень дерева представляет множество R всех $(n - 1)!$ возможных туров в задаче с n городами. Ветви, выходящие из корня, отличаются наличием у одной и отсутствием у другой некоторого ребра, например ребра (k, l), что позволяет разделить текущее множество туров на два множества: одно — которое, весьма вероятно, содержит оптимальный тур, и другое — которое, вероятно, этого тура не содержит. Для этого предлагается специальный алгоритм выбора ребра (k, l), которое, вполне вероятно, входит в оптимальный тур. Множество R разделяется на два множества $\{k, l\}$ и $\{\overline{k,l}\}$. Во множество $\{k, l\}$ входят все туры из R, проходящие через ребро (k, l), а во множество $\{\overline{k,l}\}$ — туры, не содержащие это ребро. Заметим, что идея данного алгоритма перспективна — если так организовать процесс ветвления, что на каждом шаге выбирается "правильное" ребро, то весь процесс будет завершён за n шагов. Пример фрагмента такого дерева приведён на рис. 1 [2].

С каждой вершиной дерева связывается нижняя граница стоимости любого тура из этого множества. Очевидно, что задача состоит в получении как можно более точных нижних границ. Причина этого следующая. Предположим, что уже получен конкретный полный тур T стоимостью $S(T)$. Если нижняя граница, связанная с множеством туров, представленных некоторой вершиной поискового дерева, больше, чем $S(T)$, то до конца процесса поиска не нужно рассматривать эту и все следующие за ней вершины. В реали-

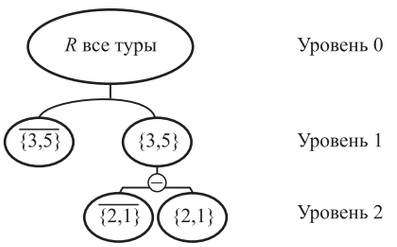

Рис. 1. Фрагмент поискового дерева решений

зации это приводит к усечению поискового дерева решений отбрасыванием всех листьев поискового дерева, имеющих стоимость большую, чем $S(T)$. Подробное изложение других этапов метода приведено в работах [3] и [2].

Краткий обзор и вопросы прогнозирования для TSP. Впервые детализация метода ветвей и границ для решения задачи коммивояжёра предложена в работе [3], хотя предварительные результаты и общие формулировки идей были представлены в более ранних работах [4—8], где рассматриваются как симметричная (неориентированный полный граф), так и асимметричная (ориентированный полный граф) постановки задачи коммивояжёра. Хорошо исследован частный случай, так называемая геометрическая (планарная, евклидова) задача коммивояжёра с матрицей расстояний, для которой выполняется неравенство треугольника [9].

В дальнейшем для решения задачи коммивояжёра применялись эвристические эволюционные, в основном генетические и муравьиные алгоритмы [10—12], а также комбинации метода ветвей и границ с генетическими алгоритмами [11]. Генетические и муравьиные алгоритмы использовались для повышения точности оценки снизу, что позволило более эффективно исключать бесперспективные подзадачи. Многочисленные усовершенствования метода ветвей и границ сводятся к повышению точности нижней оценки стоимости тура [13—16].

Собственно задача коммивояжёра достаточно хорошо исследована, однако прогнозирование трудоёмкости или временных характеристик для конкретной задачи вызывает существенные трудности в связи со значительным разбросом времени при фиксированном размере матрицы стоимостей. Экспериментальные исследования показывают, что при фиксированной длине входа разброс времён значителен. Приведём данные из работы [17]: "... при $n = 45$ для варианта без хранения матриц имеем размах от 3,38 мс до 54058,1 мс при выборочном среднем 1039,08 мс", т.е. времена лучшего и худшего случаев в эксперименте различаются почти в 16 000 раз!

Известны исследования по прогнозированию времени, требующегося для решения задачи коммивояжёра методом ветвей и границ [18—21]. Так, в работе [18] предлагается оценивать количество вершин дерева решений на основе случайного выбора. В работах [19—21] исследуется вопрос о прогнозе количества вершин дерева решений на основе анализа поддерева решений, полученного на начальном этапе расчётов. В работе [19] предложена процедура построения такого прогноза, проведены вычислительные эксперименты. Показано, что на основе анализа начальной стадии вычислений можно с удовлетворительной точностью оценивать время работы всего алгоритма. Особенностью перечисленных методов прогноза является зависимость прогноза от конкретного экземпляра задачи, а также то, что прогноз может быть получен только спустя какое-то время после начала расчётов.

Проведено исследование вероятностного распределения времени, требующегося для решения задачи коммивояжёра методом ветвей и границ [25], что может быть использовано для прогнозирования времени поиска оптимального тура в индивидуальной задаче коммивояжёра.

В известной литературе исследуется вопрос о параллельной реализации метода ветвей и границ [22], а также проблематика, связанная с обобщённой задачей коммивояжёра [23], которые не рассматриваются ниже.

Метод классов входных данных. В рамках исследования трудоёмкости компьютерных алгоритмов рассматриваются разнообразные методы их анализа. Приведём более подробное описание одного из таких методов, в основе которого лежит выделение различных классов входных данных во множестве входов фиксированной длины. Метод классов входных данных [1, 24] требует, чтобы разбиение на классы было проведено таким образом, что для каждого входа из фиксированного класса исследуемый алгоритм задавал бы одинаковое количество базовых операций принятой модели вычислений (трудоёмкость). Метод предполагает проведение следующих этапов анализа алгоритма:

на первом этапе выполняется разбиение множества D_n (множества всех входов алгоритма, имеющих длину n) на классы входных данных. Это разбиение должно быть выполнено таким образом, чтобы на всех входах одного класса трудоёмкость алгоритма (количество базовых операций) была одинакова, и не совпадала с трудоёмкостью в других классах. Тем самым получаем действительно разбиение (в смысле теории множеств) D_n на непересекающиеся классы эквивалентности по трудоёмкости. Такое разбиение позволяет существенно уменьшить количество рассматриваемых возможных входов. Отметим, что

метод не содержит указаний по выполнению такого разбиения;

на втором этапе анализа находится вероятность появления входа, принадлежащего каждому классу. Эта вероятность определяется особенностями входных данных и зависит, в частности, от распределения случайных или псевдослучайных чисел, подаваемых на вход;

на третьем этапе определяется количество базовых операций, задаваемых алгоритмом для входов из каждого класса.

Определённые ограничения, накладываемые данным методом, состоят в том, что необходимо выполнить разбиение множества D_n на классы эквивалентности по трудоёмкости. При этом метод не содержит указаний по выполнению такого разбиения [24]. Если такое разбиение удалось выполнить, то трудоёмкость алгоритма в среднем по данному методу запишется в виде

$$\overline{f_A}(n) = \sum_{i=1}^{m} p_i f_i(n), \quad \sum_{i=1}^{m} p_i = 1,$$

где n — длина конкретного входа $D \in D_n$; m — количество полученных исследователем классов входных данных; p_i — вероятность того, что входные данные принадлежат классу i; $f_i(n)$ — трудоёмкость, т.е. количество базовых операций, задаваемых алгоритмом при обработке входов из класса с номером i, т.е. "частная" трудоёмкость алгоритма для данного класса.

Преимущество этого метода состоит в том, что, вместо анализа трудоёмкости для каждого входа фиксированной длины и определения вероятности его появления, выполняется анализ трудоёмкости для классов входных данных, что значительно упрощает процедуру анализа. Модифицируем метод классов входных данных таким образом, что все возможные входы разбиваются на классы не с одинаковой, а лишь с близкой в некотором смысле трудоёмкостью.

Понятие сложности индивидуальной задачи коммивояжёра. Понятие сложности индивидуальной задачи коммивояжёра тесно связано с методом ветвей и границ, первая реализация которого для этой задачи была предложена в 1963 г. [3]. Несимметричная задача коммивояжёра (индивидуальная задача) на графе G размерности n задаётся квадратной матрицей смежности $A(n \times n)$, элементы которой определяют веса дуг между вершинами полного графа

$$A = \left\{ a_{ij} \middle| a_{ii} = \infty,\ a_{ij} > 0,\ i \neq j,\ i, j = \overline{1, n} \right\}.$$

В общем случае это положительные, не обязательно различные действительные числа. Диагональные элементы матрицы формально не рассматриваются или считаются условно равными бесконечности, поскольку в задаче коммивояжёра у вершин запрещены собственные петли.

Сложность индивидуальной задачи коммивояжёра [18] есть количество порождённых вершин поискового дерева решений стандартным (классическим) алгоритмом метода ветвей и границ. Под примитивным стандартным алгоритмом (обозначаемым далее как APS) будем понимать классический алгоритм [3], в котором вместо предложенного оригинального метода [3] реализован примитивный подалгоритм выбора ребра ветвления путём поиска первого нулевого элемента последовательным проходом по строкам в текущей приведённой матрице. Введём обозначение $C_X(A)$ для сложности индивидуальной задачи, заданной матрицей A. Значение $C_X(A)$ определяется экспериментально прогонкой алгоритма APS для данной индивидуальной задачи. Собственно прогнозирование значения $C_X(A)$ и составляет основную задачу, для решения которой и строится предлагаемое обобщённое представление.

Применение метода классов к задаче коммивояжёра — матрица номеров порядка. Представляет интерес построение такого обобщения для индивидуальных задач коммивояжёра, которое объединило бы задачи с одинаковой или близкой сложностью. Описанный выше метод классов входных данных предполагает построение классов эквивалентности по трудоёмкости на множестве входов фиксированной длины.

Рассмотрим применение этого метода к несимметричной задаче коммивояжёра. Основная идея обобщения заключается в том, что процедура приведения матрицы стоимостей в классическом алгоритме метода ветвей и границ работает с минимальными элементами в строках и столбцах. Тем самым полученное расположение нулей в приведённой матрице зависит более от отношения порядка между числами, нежели от их конкретных значений. Полученное на основе этой идеи обобщённое представление класса индивидуальных задач коммивояжёра получило название матрицы номеров порядка. Отметим, что поскольку диагональные элементы матрицы вообще не рассматриваются ввиду запрета собственных петель, то для формализации изложения полагаем их в начале равными нулю $a_{ii} = 0$ и за-

меняем на бесконечность в конце процедуры. Построение матрицы номеров порядка включает в себя четыре этапа:

1. Построение мультимножества $\tilde{B}$ по исходной матрице A.

Матрица A размерности $n \times n$ с $a_{ii} = 0$ разворачивается построчно (с возможными повторениями) в мультимножество $\tilde{B}$:

$$\tilde{B} = \left\{ \tilde{b}_k \middle| \tilde{b}_k = a_{ij}, \forall i = \overline{1,n}, \forall j = \overline{1,n}\ k = (i-1)n + j \right\}.$$

2. Построение множества B по мультимножеству $\tilde{B}$.

Полученное мультимножество $\tilde{B}$ преобразуется в обычное (без повторений) множество B с индексацией элементов, начиная с нуля. По определению обычного множества все элементы во множестве B различны

$$B = \left\{ b_k \middle| k = \overline{0,m},\ 1 < m \leqslant n^2 - n + 1 \right\}.$$

По построению множество B содержит $(m + 1)$ несовпадающих элементов.

3. Построение сортированного кортежа B_s из элементов множества B.

Пусть B^{m+1} — $(m + 1)$-я декартова степень множества B, элементы B^{m+1} — упорядоченные кортежи длины $m + 1$. Среди них существует кортеж, содержащий упорядоченные по возрастанию элементы множества B, который обозначим B_s:

$$\exists B_s \in B^{m+1}: B_s = (b_0, b_1, \ldots, b_m): b_k < b_{k+1},$$
$$\forall k = \overline{0, m-1}.$$

Поскольку все элементы исходной матрицы, за исключением диагональных элементов, строго положительны, то по построению элемент b_0 кортежа B_s равен нулю.

4. Построение собственно матрицы номеров порядка $N = (n_{ij})$ для матрицы A.

Введём в рассмотрение функцию нумерации (нумератор):

$$f_N(a_{ij}, B_s) = k,\ k{:}a_{ij} = b_k,\ k \in [0, m],\ b_k \in B_s.$$

Содержательно значение функции нумерации k есть номер элемента a_{ij} матрицы A в отсортированном без повторов массиве значений. На основе нумератора элементы матрицы номеров порядка определяются следующим образом:

$$n_{ij} = f_N(a_{ij}, B_s), \forall i \neq j;\ i, j = \overline{1,n};$$
$$n_{ii} = f_N(a_{ii}, B_s) = 0, \forall i = \overline{1,n}.$$

Объединим построение кортежа B_s и обобщение функции нумерации на всю матрицу A в оператор F_N, отображающий матрицу A в матрицу номеров порядка N: $F_N(A) = N$. Далее полагаем $a_{ii} = \infty$ в целях формального запрета петель.

Приведём для наглядности простой числовой пример. Пусть исходная матрица A индивидуальной задачи имеет вид (после обнуления диагональных элементов):

0	0,76	0,34
0,15	0	0,43
0,67	0,23	0

Тогда соответствующая матрица номеров порядка $N = F_N(A)$ (значение 1 соответствует минимальному ненулевому элементу в A — 0,15 и т.д.):

0	6	3
1	0	4
5	2	0

Гипотезы и предварительные результаты. Очевидно, что различные исходные матрицы A (индивидуальные задачи коммивояжёра) могут порождать одинаковые матрицы номеров порядка. Собственно говоря, каждая матрица номеров порядка и есть обобщённое представление некоторого класса индивидуальных несимметричных задач коммивояжёра. Таким образом, вводим отношение R

$$ARB \Leftrightarrow F_N(A) = F_N(B),\ A,\ B \in D_n,$$

которое разбивает множество D_n всех возможных матриц размерности n на соответствующие классы эквивалентности. Задачу коммивояжёра, заданную матрицей номеров порядка N, будем называть обобщённой. Необходимо показать, что сложности обобщённой задачи и индивидуальных задач из соответствующего класса эквивалентности в определённых смыслах коррелированы.

Предложенная матрица номеров порядка обладает обобщающими свойствами в силу следующих рассуждений. Первый шаг примитивного классического алгоритма метода ветвей и границ — приведение матрицы стои-

мостей — состоит в том, что из каждой строки вычитается минимальный элемент в строке, и затем эта процедура повторяется для столбцов, не имеющих нулевых элементов. Очевидно, что нулевые диагональные элементы не рассматриваются в этой процедуре. Именно полученные после приведения нулевые элементы (рёбра с нулевым весом) могут служить рёбрами ветвления в методе ветвей и границ.

Описанная процедура приведения и метод построения матрицы номеров порядка гарантируют, что для всех задач данного обобщённого класса (заданного матрицей N) нули приведённой индивидуальной матрицы A и матрицы N совпадают на первоначальном приведении. Следовательно, первое ребро ветвления, выбранное алгоритмом APS (в силу указанного выше принципа выбора ребра этим алгоритмом), будет одним и тем же для всех задач этого класса. На следующих шагах построения поискового дерева решений вполне вероятно выбор ребра ветвления не будет совпадать для индивидуальных и обобщённой задач. Возможные расхождения порождаются различиями в оценках вершин поискового дерева решений в силу различия числовых значений и, следовательно, возможным изменением в порядке выбора вершин ветвления алгоритмом APS. На основе введённого обобщения — матрицы номеров порядка — выдвигаются следующие гипотезы.

I. Сильная гипотеза об общении. Собственно, эта гипотеза состоит в том, что сложности индивидуальных задач в классе, определяемом данной матрицей номеров порядка, незначимо различаются друг от друга и лежат в достаточно узком диапазоне около сложности обобщённой задачи. Формально, пусть множество A_N есть множество всех индивидуальных задач, имеющих матрицу номеров порядка N, т.е. принадлежащих одному классу эквивалентности:

$$A_N = \{A | F_N(A) = N\},$$

т.е. A_N есть прообраз $F_N^{-1}(N)$ во множестве D_n всех возможных индивидуальных задач размерности n. Пусть $C_X(N)$ — сложность обобщённой задачи, тогда гипотеза I состоит в том, что:

$$C_X(A) \in [C_X(N) - \varepsilon,\ C_X(N) + \varepsilon],\ \forall A \in A_N,\quad \varepsilon \ll C_X(N).$$

II. Вероятностная гипотеза об общении. В этой гипотезе утверждается, что, несмотря на возможные отклонения в сложностях индивидуальных задач от сложности обобщённой задачи, имеет место "сходимость" в среднем: средняя сложность индивидуальных задач близка к сложности обобщённой задачи. Пусть m — статистически достаточное количество экспериментов (обеспечивающее заданную ширину доверительного интервала для математического ожидания при фиксированной доверительной вероятности). Тогда значение выборочной средней сложности в классе индивидуальных задач A_N

$$\overline{C}_X(A) = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} C_X(A^{(i)}),\ A^{(i)} \in A_N,$$

а гипотеза состоит в том, что

$$\overline{C}_X(A) \in \left[C_X(N) - \varepsilon,\ C_X(N) + \varepsilon\right],\ \varepsilon \ll C_X(N).$$

Очевидно, что эта гипотеза более слабая, чем гипотеза I, и если гипотеза I верна, то из нее автоматически следует гипотеза II, обратное, очевидно, не верно.

Результаты предварительных экспериментов[1] при $m = 1000$ для матриц размером 20×20 приведены в таблице. Для случайно сгенерированной (стандартным равномерным псевдослучайным генератором) матрицы номеров порядка сложность $C_X(N)$ определена прогонкой алгоритма APS. Затем генерировалось $m = 1000$ случайных матриц, имеющих такую же матрицу номеров порядка, для каждой из которых сложность вычислялась экспериментально по алгоритму APS. Полученное выборочное среднее $\overline{C}_X(A)$ приведено в третьей строке таблицы. Последние две строки содержат абсолютную и относительную погрешности.

Дополнительно приведена гистограмма сложностей индивидуальных задач для 5-й матрицы номеров порядка $C_X(N) = 4493$, чис-

Экспериментальные результаты

Номер матрицы порядка	1	2	3	4	5
$C_X(N)$	1367	1171	617	2105	4493
$\overline{C}_X(A)$	1127,89	1201,42	743,08	1916,09	4428,91
$\lvert\varepsilon\rvert$	239,11	30,42	126,08	188,91	64,09
$\lvert\varepsilon\rvert/C_X(N)$ %	17,49 %	2,60 %	20,43 %	8,97 %	1,43 %

[1] Экспериментальное исследование выполнено М.И. Фомичёвым.

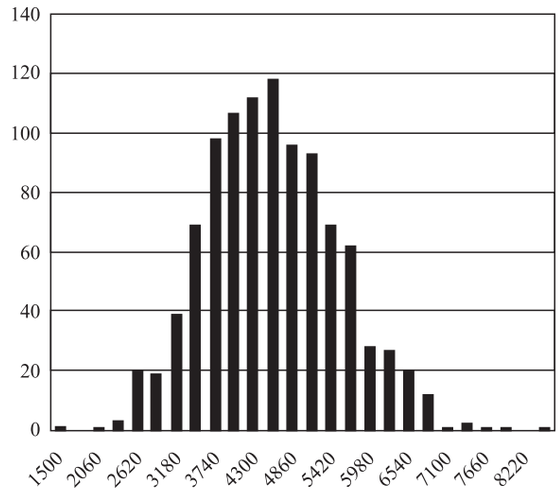

Рис. 2. Гистограмма распределения сложностей индивидуальных задач при фиксированной матрице номеров порядка

ло сегментов гистограммы — 25, минимальное значение — 1478, максимальное — 8496 (рис. 2).

Анализ полученных предварительных результатов показывает, что значения $C_X(N)$ и $C_X(A)$ различаются не более чем вдвое. Средняя сложность на классе A_N — $\overline{C}_X(A)$ достаточно хорошо согласуется с $C_X(N)$, что не противоречит гипотезе II. Для задач с "большими" поисковыми деревьями решений эти значения существенно более близки, что, возможно, позволит идентифицировать плохие (по времени решения, т.е. обладающие большой сложностью) индивидуальные задачи на основе детального изучения и анализа соответствующих матриц номеров порядка.

Заключение. Актуальность проблематики прогнозирования задач большой вычислительной сложности не вызывает сомнений. В части задачи коммивояжёра современные исследования по прогнозированию времён не удовлетворяют требованию априорности. Для получения априорных оценок необходима разработка полиномиальных по времени методов получения оценок сложности индивидуальной задачи коммивояжёра. Предложено обобщённое описание классов индивидуальных задач на основе введённых матриц номеров порядка. Предварительные результаты экспериментальных исследований говорят в пользу гипотезы II или не противоречат ей. Дальнейшие исследования позволят проверить эту гипотезу на основе статистически значимых экспериментальных результатов. Вполне возможно, что исследование характеристик введённых в данной статье обобщённых описаний позволит построить на их основе кластеры "простых" и "сложных" индивидуальных задач.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 16-07-00160.

Библиографические ссылки

1. **Ульянов М.В.** Ресурсно-эффективные компьютерные алгоритмы. Разработка и анализ. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 304 с.

2. **Гудман С., Хидетниеми С.** Ведение в разработку и анализ алгоритмов. М.: Мир, 1981. 368 с.

3. **Little J.D.C., Murty K.G., Sweeney D.W., Karel C.** An algorithm for the traveling salesman problem // Operations Research. 1963. V. 11. P. 972—989.

4. **Dantzig G.B., Fulkerson D.R., Johnson S.M.** Solution of a large scale traveling salesman problem. Technical Report P-510. RAND Corporation, Santa Monica, California, USA, 1954.

5. **Dantzig G.B., Fulkerson D.R., Johnson S.M.** On a linearprogramming, combinatorial approach to the traveling-salesman problem // Operations Research. 1959. V. 7. P. 58—66.

6. **Eastman W.L.** Linear Programming with Pattern Constraints. Ph.D. Thesis. Department of Economics, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, USA, 1958.

7. **Land A.H., Doig A.G.** An automatic method of solving discrete programming problems // Econometrica. 1960. V. 28. P. 497—520.

8. **Manne A.S., Markowitz H.M.** On the solution of discrete programming problems. Technical Report P-711. RAND Corporation, Santa Monica, California, USA, 1956.

9. **Charikar M., Goemans M.X., Karloff H.** On the Integrality Ratio for the Asymmetric Traveling Salesman Problem // Mathematics of Operations Research. 2006. V. 31. № 2. P. 245.

10. **Oliver I., Smith D., Holland J.** A study of permutation crossover operators on the traveling salesman problem. Proceedings of the 2nd International Conference on Genetic Algorithms, Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale NJ. 1987. P. 224—230.

11. **Cotta C., Aldana J., Nebro A., Troya J.** Hybridizing genetic algorithms with branch and bound techniques for the resolution of the TSP // Artificial Neural Nets and Genetic Algorithms 2 (Eds. Pearson D., Steele N., Albrecht R.), Springer-Verlag, Wien New York. 1995. P. 277—280.

12. **Goldberg D., Lingle R.J.** Alleles, loci, and the travelling salesman problem. // Proceedings of an International Conference on Genetic Algorithms (Ed. Grefenstette J.), Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale NJ, 1985.

13. **Sergeev S.** Nonlinear resolving functions for the travelling salesman problem // Automation & Remote Control. 2013. V. 74. № 6. P. 978.

14. **Sergeev S.** The symmetric travelling salesman problem II. New low bounds // Automation & Remote Control. 2010. V. 71. № 4. P. 681.

15. **Chou Chang-Chien.** On the Shortest Path Touring n Circles // International Journal of Advancements in Computing Technology. 2012. V. 4. № 10. P. 356.

16. **Toriello A.** Optimal toll design: a lower bound framework for the asymmetric traveling salesman problem // Mathematical Programming. 2014. V. 144. № 1/2. P. 247.

17. **Ulyanov M.V., Fomichev M.I.** Resource characteristics of ways to organize a decision tree in the branch-and-bound method for the traveling salesmen problem // Business Informatics. 2015. V. 4. № 34. P. 38—46.

18. **Knuth D.E.** Estimating the efficiency of backtracking programs // Mathematics of Computing. 1975. V. 29. P. 121—136.

19. **Cornuéjols G., Karamanov M., Li Y.** Early estimates of the size of branch-and-bound trees // INFORMS Journal on Computing. 2006. V. 18. № 1. P. 86—96.

20. **Lobjois L., Lemaitre M.** Branch-and-bound algorithm selection by performance prediction. American Association for Artificial Intelligence, Menlo Park, CA, 1998.

21. **Purdom P.W.** Tree size by partial backtracking // SIAM Journal on Computing. 1978. V. 7. № 4. P. 481—491.

22. **Сигал И.Х., Бабинская Я.Л., Посыпкин М.А.** Параллельная реализация метода ветвей и границ в задаче коммивояжёра на базе библиотеки BNB-Solver // Труды ИСА РАН. 2006. Т. 25. С. 26—36.

23. **Dimitrijevic V., Milosavljevic M., Markovic M.** Branch and bound algorithm for solving a generalized traveling salesman problem // Univ. Beograd. Publ. Elektrotehn. Fak. Ser. Mat. 1996. V. 7. P. 31—35.

24. **Макконелл Дж.** Основы современных алгоритмов. 2-е изд., доп. М.: Техносфера, 2004. 368 с.

25. **Головешкин В.А., Жукова Г.Н., Ульянов М.В., Фомичёв М.И.** Сравнение ресурсных характеристик традиционного и модифицированного метода ветвей и границ для TSP // Современные информационные технологии и ИТ-образование. 2015. Т. 2. № 11. С. 150.

УДК 629.46—192

П.А. Устич, д-р техн. наук, **А.А. Иванов,** канд. техн. наук, доц. **Ф.А. Мажидов**
(Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ))

firuz.majidov.2013@yandex.ru

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ В СИСТЕМЕ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ И РЕМОНТА ВАГОНОВ

Для повышения эффективности функционирования системы технического обслуживания и ремонта вагонов решается задача прогнозирования на основе вероятностных моделей технического состояния деталей и узлов, имеющих внезапные отказы. Рассмотрены проблемы и направления развития систем технического обслуживания и ремонта подвижного состава железнодорожного транспорта с учётом внедрения современных информационных технологий. Предложена методика оценки остаточного срока службы деталей для определения периодичности проведения их глубоких диагностик в стационарных условиях ремонтных предприятий, технологию оценки которого можно реализовать на базе существующей отраслевой информационной системы. Разработанная технология позволит на принципиально ином уровне организовать систему технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов и работу всего вагонного комплекса.

Ключевые слова: система технического обслуживания и ремонта вагонов; стратегия ремонта; управление техническим состоянием вагона; остаточный срок службы детали; отказ; надёжность; вероятность безотказной работы; автоматизированные системы вагонного хозяйства.

The prediction problem from the technical condition probability models of parts and units that have sudden failures is decided for improving the fuctioning efficiency of the cars system maintenance and repair The development problems and directions of maintenance and repair systems of railway transport rolling-stock by taking into account the modern information technologies implementation is considered. The valuation methodology of the parts residual service life for determining the periodicity of their deep diagnostics implementation in stationary conditions of the repair enterprises is proposed. The valuation technology of the repair enterpriscan can be implemented on the basis of current industry information system. The developed technology will permit to organize the maintenance and repair system of goods cars and operation of all rolling complex on fundamentally different level.

Keywords: cars maintenance and repair system; repair strategy; car technical condition management; the remaining service life of parts; failure; safety; probability of the faultless work; car economy automatic systems.

Введение. Для обеспечения перевозочного процесса достаточным количеством исправных грузовых вагонов, а также безопасности движения поездов на отечественных железных дорогах организована сеть специализированных предприятий, осуществляющих

контроль их технического состояния, техническое обслуживание, ревизии и ремонты различного объёма.

Функционирование системы технического обслуживания и ремонта влияет не только на показатели готовности подвижного состава к перевозкам, но и на стоимость жизненного цикла конструкций, что в конечном итоге определяет себестоимость перевозок и эффективность работы всего железнодорожного транспорта. Существующая на отечественных железных дорогах система технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов представляет собой комплекс линейных предприятий, путей, оборудования, персонала, нормативно технической документации, стоимость основных фондов которой составляет примерно 15 % основных фондов всего железнодорожного транспорта [1].

Сложность системы объясняется обезличенностью эксплуатации грузового вагона, т.е. отсутствием (в отличие от локомотивов, электропоездов и пассажирских вагонов) приписки и к конкретному маршруту следования, и к конкретному ремонтному предприятию. Эта особенность эксплуатации связана с необходимостью снижения порожнего непроизводительного пробега вагона. При этом существенно снижается качество и эффективность выполняемых технического обслуживания и ремонтов.

В настоящее время с внедрением информационных технологий на железнодорожном транспорте появляются новые возможности управления фактическим техническим состоянием вагонов грузового парка, позволяющие принципиально изменить организацию технического содержания подвижного состава, процесса обеспечения безопасности движения, снабжения запасными частями и т.п.

Действующая система технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов. Процесс старения изделий зависит от свойств, заложенных при их проектировании и изготовлении, но этим процессом можно управлять, осуществляя профилактические ремонты и обслуживание. Набор распределённых во времени управлений такого рода, чередующихся с периодами использования изделия по назначению, называют стратегией.

Под стратегией ремонта будем понимать правило, согласно которому изделие ставится в ремонт. Возможны три правила постановки в ремонт:

после отказа изделия;

по достижении предельно допустимого состояния;

после заранее установленной наработки изделия.

При организации технической эксплуатации сколько-нибудь сложных машин и конструкций прибегают к комбинации указанных трёх стратегий. Достигается это благодаря использованию нескольких типов ремонта и технического обслуживания. Правила взаимодействия стратегий соответствующих ремонтов во времени, по месту проведения ремонтных работ, по коммерческому состоянию вагона и т.п. составляют стратегию системы технического обслуживания и ремонта.

Под системой технического обслуживания и ремонта (ТОиР) в технике понимается совокупность взаимосвязанных средств, документации, исполнителей, необходимых для поддержания и восстановления качества изделий, входящих в эту систему. Основной задачей системы ТОиР является поддержание заложенных показателей надёжности конструкции при использовании её по значению. В табл. 1 приведена классификация видов ремонта техники.

Возможны две принципиальные стратегии (рис. 1).

Пассивная — ждать появления отказа, а затем восстанавливать работоспособность. В этом

Таблица 1

Классификация видов ремонта

№	Признак классификации	Виды ремонтов
1	Степень восстановления ресурса	Капитальный Средний Текущий
2	Планирование	Плановый Неплановый
3	Регламентация выполнения	Регламентированный По техническому состоянию
4	Сохранение принадлежности ремонтируемых частей	Обезличенный Необезличенный
5	Организация выполнения	Агрегатный Поточный Ремонт эксплуатирующей организацией Ремонт специализированной организацией Ремонт предприятием-изготовителем

случае проводимый ремонт называют неплановo-аварийным (НАР), который может, в свою очередь, быть регламентированным (НАР-Р) или нерегламентированным (НАР-Н).

Активная — не дожидаясь выхода из строя вагона, прекращать на время использование его по назначению и проводить частичный или полный ремонт.

Если момент времени постановки вагона в ремонт заранее запланирован, то последующий ремонт называют плановым (например, по времени или пробегу), который может быть либо предупредительным (ППР), либо аварийным (ПАР).

Возможны случаи, когда моменты постановки вагонов в ремонт определяются по каким-либо косвенным признакам приближения его к неработоспособному состоянию. Упомянутое приближение можно уловить по значению определяющего параметра — температура, зазор, звук, цвет, химический состав выхлопных газов и т.п.

При этом следует иметь в виду два случая. Если оценка технического состояния конструкции происходит в заранее запланированные моменты времени, то последующий ремонт называют планово-диагностическим (ПДР). Если идентификация технического состояния конструкции происходит по показаниям встроенной диагностической аппаратуры, то последующий ремонт называют неплановo-профилактическим (НПР).

Стоит отметить, что неплановo-аварийный ремонт противопоказан для изделий, отказ которых может привести к серьёзным невосполнимым последствиям для человека, природной среды или экономики. Такая стратегия ремонта характерна для бытовой техники (стиральных машин, электробытовых приборов, часов и т.п.).

На железных дорогах России система ТОиР является основным руководящим документом, согласно которому организована работа вагонного комплекса, осуществляющего техническое содержание грузовых вагонов [2]. Для грузовых вагонов предусмотрены работы, приведённые в табл. 2.

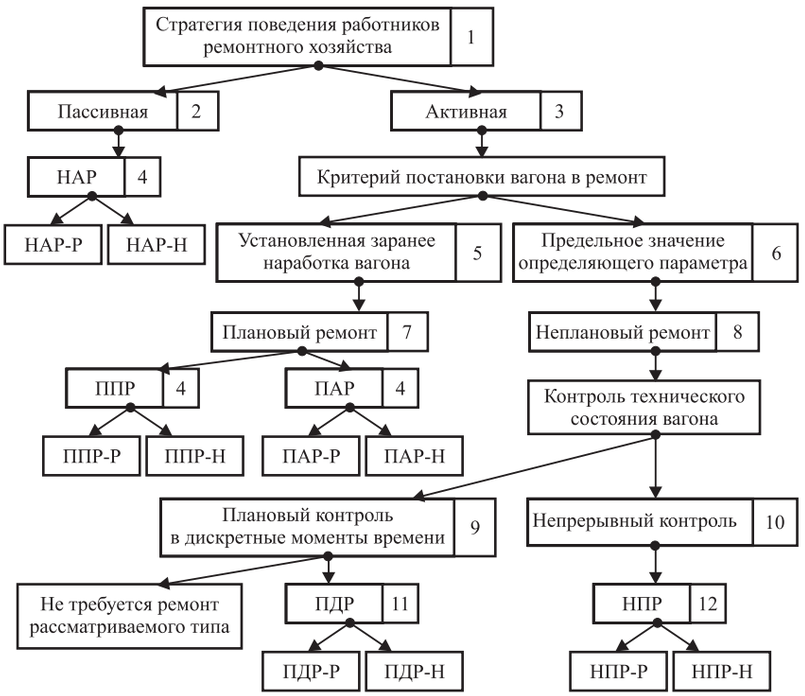

Рис. 1. Стратегии проведения ремонтов в системе ТОиР

Таблица 2

Виды работ по техническому обслуживанию и ремонту грузовых вагонов

№	Вид ремонта	Стратегия	Периодичность проведения
1	Техническое обслуживание — ТО	Плановая	На каждом ПТО в пути следования (600 км)
2	Техническое обслуживание с диагностированием — ТОД	Неплановая	Периодичность не установлена
3	Текущий отцепочный ремонт, подразделяющийся на: ТР-1 при подготовке к перевозкам ТР-2 в пути следования	Неплановый аварийный ремонт	Периодичность не устанавливается
4	Деповской ремонт — ДР	Плановый ремонт	Установлена периодичность по календарю или пробегу
5	Капитальный ремонт — КР	Плановый ремонт	Установлена периодичность по календарю
6	Капитальный ремонт с продлением срока службы — КРП	То же	То же

Относительно ДР установлено несколько допустимых критериев постановки вагона в ремонт:

по критерию календарной продолжительности эксплуатации;

по комбинированному критерию, т.е. по достижению допустимого пробега, но не более установленного календарного периода времени. Можно сказать, что действующая на железных дорогах России стратегия выполнения ремонтов крупного объёма (деповского и капитального) имеет плановый характер.

Такая стратегия для грузовых вагонов существует с 1881 г., изменяется лишь периодичность проведения ремонтов, а с 2000 г. введён комбинированный критерий, позволяющий сокращать издержки на содержание вагонного парка в случае больших непроизводительных простоев подвижного состава. Однако плановая стратегия является устаревшей, кроме того, отсутствует обоснование периодичности проведения таких ремонтов.

Основная проблема действующей системы ремонта состоит в том, что при постановке вагона в ремонт не учитывается его фактическое техническое состояние конструкции. Более совершенной считается стратегия ремонта с непланово-профилактическими ремонтами (см. рис. 1), к которой следует стремиться. Однако в настоящее время в силу объективных причин можно реализовать лишь планово-диагностическую стратегию. В её основе лежит технология проведения глубоких диагностик, по результатам которых вагон направляется в ремонт или продлевается период его использования в перевозочном процессе с назначением даты следующей глубокой диагностики.

Системы технического обслуживания и ремонта вагонов за рубежом. За рубежом можно выделить несколько стратегий ТОиР вагонов.

На железных дорогах Германии основным документом, регламентирующим систему ремонта вагонов, является промышленный стандарт DIN 31051 "Техническое обслуживание. Наименование операции и технология выполнения". В соответствии с этим документом техническое содержание включает в себя комплекс операций по поддержанию и восстановлению технического состояния, а также оценке фактического технического состояния вагона. В документе регламентированы: техническое обслуживание, технические осмотры, ремонт и модернизация. Сроки между ремонтами устанавливают в зависимости от запаса "износа" основных узлов и деталей [3]. Наличие установленных сроков между ремонтами свидетельствует о плановой стратегии проведения ремонтов, аналогичной используемой на отечественных железных дорогах.

На железных дорогах Британии применяется система ремонта грузовых вагонов, которая предусматривает выполнение периодического генерального, промежуточного и текущего ремонтов. Выполнение ремонтов вагонов осуществлялось частной фирмой по договорам, которая на своих предприятиях проводила технические осмотры и ремонты вагонов в интервалах между рейсами. Цель такого осмотра — предотвратить создание аварийных ситуаций, которые могут возникнуть в пути следования из-за технических неисправностей вагонов. Кроме того, вагоны один раз в два месяца подаются в мастерские для проведения (в ранее оговоренном объёме) технического обслуживания [3], что также свидетельствует о плановой стратегии при выполнении ремонтов крупного объёма.

Во Франции техническое обслуживание железнодорожного подвижного состава выполняют в основном подразделения Национальной компании французских железных дорог (SNCF). Различают пять уровней технического обслуживания и ремонта:

1-й — ежедневный технический осмотр и экипировка;

2-й — межрейсовое техническое обслуживание с устранением небольших дефектов;

3-й — ремонт малого объёма с плановой заменой некоторых узлов и деталей;

4-й — ремонт среднего объёма (восстановительный);

5-й — ремонт большого объёма (капитальный) с улучшением технических и эксплуатационных параметров или модернизацией.

Для каждого уровня установлена периодичность в единицах календарной продолжительности и/или наработки (табл. 3).

При ремонте среднего объёма ремонтируют или заменяют отдельные элементы, каждый из которых имеет свой жизненный цикл, и основные усилия сосредоточены на работах по ремонту кузова с восстановлением требуемого состояния его несущей конструкции и ряда компонентов (например, полов и дверей), а также внутреннего оборудования. Периодичность этих работ составляет 15—20 лет.

При капитальном ремонте, входящем в уровень 5, осуществляется полная замена технически устаревших элементов и/или переделка кузова с учётом изменившихся требований

Таблица 3

Периодичность проведения ремонтов на французских железных дорогах

Вид	Периодичность	Техническое обслуживание
ES	5000 км	Технический осмотр без отвлечения от эксплуатации
ECC	8 дней	Технический осмотр оборудования без отвлечения от эксплуатации
ATS	22 дня	Периодическое техническое обслуживание
ECF/EMN	37 дней	Плановый осмотр оборудования / плановый осмотр механической части
ATS1	52 дня	Периодическое техническое обслуживание 1
ATS2	168 дней	Периодическое техническое обслуживание 2
VL	450 000 км или 10 мес.	Ремонт малого объёма
VG	900 000 км или 19 мес.	Общий ремонт
GVG	1 800 000 км или 37 мес.	Общий ремонт увеличенного объёма

Таблица 4

Элементы системы ТОиР высокоскоростного поезда "Сапсан"

Вид	Межремонтный пробег	Минимальное время простоя	Примечание
L	4000 км ± 10 %	1 ч	Выполняется в условиях депо
N	20 000 км ± 20 %	4 ч	
IS 510	120 000 км ± 10 %	11 ч	
IS 520	240 000 км ± 20 %	23 ч	
IS 530	480 000 км ± 20 %	35 ч	
R1	1 250 000 км ± 20 %	10 рабочих дней	Выполняется в условиях завода
R2	2 500 000 км ± 20 %	14 рабочих дней	
R3	3 750 000 км ± 20 %	26 рабочих дней	
R4	5 000 000 км ± 20 %	28 рабочих дней	
R5	7 500 000 км ± 20 %	48 рабочих дней	

клиентов и появления новых нормативов. Тогда же, если это целесообразно, проводится модернизация с перекомпоновкой единиц подвижного состава. Сроки этих работ определяются в индивидуальном порядке для каждой серии подвижного состава [4]. В системе ТОиР железных дорог Франции при планировании ремонтов используется комбинированный критерий (километровой и календарной наработки).

Система ТОиР играет важную роль при эксплуатации высокоскоростных поездов. Так, например, для высокоскоростного поезда "Сапсан" (поезда немецкой платформы "Velaro") стратегия ремонта ориентирована на оценку фактического технического состояния оборудования и предполагает несколько подходов к выполнению различных видов работ. При разработке конструкции предусмотрена проверка элементов оборудования с целью установления срока их службы в зависимости от условий эксплуатации с учётом воздействий, вызывающих износ, а также как выполняется оптимизация расходов на обслуживание и ремонт. Кроме того, предусмотрен периодический (регулярный) контроль состояния отдельных компонентов и групп оборудования, что позволяет использовать полученные данные для прогнозирования показателей надёжности. Планирование и проведение технического обслуживания осуществляется в автоматизированном режиме с помощью системы (CMMS) [5]. Установленные виды ремонтов и обслуживаний и их периодичность приведены в табл. 4.

Работоспособность поезда, его узлов и систем в условиях депо восстанавливается агрегатным методом, т.е. блочно-модульной заменой неисправного узла (блока) узлом (блоком) из состава оборотных комплектов. Несмотря на предусмотренную оптимизацию межремонтных периодов на базе оценки показателей надёжности, в конкретных эксплуатационных условиях система ремонта имеет плановый характер, и планирование осуществляется в единицах километровой наработки.

В Японии ремонт высокоскоростных поездов осуществляется по планово-аварийной системе [3]. Отличительной особенностью данной системы является то, что межремонтные периоды в Японии меньше, чем на железных дорогах других стран. Общий осмотр, выполняемый на вагоноремонтных заводах, проводится через 1—4 года с простоем в ремонте 2,2 дня. Частный ремонт проводится

в условиях депо через 8 месяцев, периодический осмотр — через 35—55 дней, а осмотр поезда — через каждые 16 часов.

Особое внимание заслуживает система ТОиР итальянских железных дорог, основанная на плановом принципе. Каждая единица подвижного состава рассматривается как комплекс отдельных узлов и деталей, занесённых в базу данных и контролируемых по установленным параметрам. В первую очередь внимание уделяется ремонту узлов и деталей, непосредственно влияющих на безопасность движения поездов. Таким образом, необходимость контроля технического состояния всего вагона отпадает. Требуется только своевременно осуществлять ремонт ответственных элементов по специально разработанному графику, исходя из среднего срока службы каждого узла. В информационной базе указывается срок службы узлов и деталей, по истечении которого они в дальнейшем не используются. Элемент заменяют и либо отправляют в ремонт, либо утилизируют [6]. Несмотря на плановую стратегию ремонтов крупного объёма, периодичность их проведения оценивается по показателям долговечности наиболее ответственных узлов.

В Австралии функционирует автоматизированная система контроля, осуществляющая слежение за узлами и деталями подвижного состава, оценивающая техническое состояние вагонов по десяти параметрам. Система ведёт историю каждого ответственного элемента вагона с указанием обнаруженных повреждений, сроков и объёмов проведённых ремонтов, номеров вагонов, на которые элемент устанавливался. Это позволяет прогнозировать поведение того или иного элемента конструкции в эксплуатации, а на основе этих прогнозов планируются загрузка производственных ремонтных мощностей, материально-технического обеспечения, закупка новых узлов и деталей [6]. Такой подход к организации системы технического обслуживания и ремонта уже не является плановым в отличие от систем, рассмотренных выше. Однако он ориентирован на прогнозирование индивидуальных показателей повреждаемости элементов конструкции. Его можно реализовать лишь только для узлов и деталей, которые имеют внешние признаки приближения к неработоспособному состоянию. С помощью контрольных измерений можно оценить темп деградации конструкции и прогнозировать ремонтные работы.

Однако проведение ремонтов крупного объёма и глубоких диагностик необходимо, прежде всего, для выявления повреждений, которые могут иметь внезапные отказы в процессе использования вагона по назначению и привести при роковом стечении обстоятельств к крушениям и авариям. К таким отказам относятся, например, усталостные трещины основных несущих элементов вагонных конструкций [7], которые, в отличие от постепенных, не имеют внешних признаков приближения к неработоспособному состоянию. Поэтому упомянутая выше автоматизированная система не позволит оценить темп деградации конструкции, у которой возможны внезапные отказы.

Как видно, на отечественных железных дорогах, а также зарубежных системах ТОиР много общего. В большинстве стран используют плановую стратегию проведения ремонтов, в том числе при обслуживании высокоскоростных поездов. Для определения периодичности проведения ремонтов используют различные автоматизированные системы, имеющие информацию о техническом состоянии отдельных, наиболее ответственных деталей и узлов. Такой подход становится возможным с внедрением современных информационных технологий.

При этом стоит отметить, что в системах ТОиР вагонов недостаточно развиты бортовые системы диагностики, следящие за техническим состоянием ответственных элементов. Примером таких систем является система контроля нагрева букс (СКНБ) пассажирских вагонов или аналогичная система и датчики ускорений высокоскоростных поездов "Сапсан".

В настоящее время на железных дорогах России на базе Главного вычислительного центра ОАО "РЖД" действует отраслевая информационная сеть, внедрена система сбора, передачи (подъёма с линейного уровня), централизованного хранения и обработки первичной информации о техническом состоянии каждого вагона.

Информационные системы на железных дорогах России. Основу информационной системы для вагонного комплекса, выполняющего техническое обслуживание и ремонт грузовых вагонов, составляет так называемая картотека вагонов. Это автоматизированная база данных паспортов вагонов (АБДПВ), в которой хранится информация о технических характеристиках и особенностях каждого вагона парка. Кроме того, ведётся журнал технического состояния вагонов (ЖТСВ). Он представляет собой централизованную информа-

ционную базу данных о случаях перевода вагонов в нерабочий парк, с указанием их причин по каждому вагону. К таким причинам относятся обнаруженные неисправности, требующие ремонта на специализированных ремонтных путях, либо необходимость проведения планового ремонта. Ещё одним из элементов сетевой информационной системы является система автоматической идентификации подвижного состава (САИПС), которая совместно с системой дислокации парка вагонов (ДИСПАРК) определяет положение вагона на сети железных дорог в реальном масштабе времени. Система САИПС представляет собой бортовые идентификационные датчики и стационарные напольные устройства, считывающие информацию о номере проходящего мимо них вагона.

В силу объективных причин возможности этих систем используются не полностью. Эти системы могут стать составной частью автоматизированной системы управления фактическим состоянием вагонов в эксплуатации.

Элементы системы управления фактическим состоянием грузовых вагонов. Для организации системы технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов и управления их техническим состоянием необходима статистическая информация об отказах деталей и узлов. При этом одной из актуальных задач становится обоснование периодичности проведения глубоких диагностик вагона. Необходимость таких глубоких диагностик объясняется наличием элементов, непосредственно влияющих на безопасность движения. Как показано в [7], наиболее опасными отказами являются незарезервированные (в смысле надёжности) отказы, которые могут немедленно привести к сходу вагона с рельсов. К таким отказам относятся усталостные трещины (изломы) основных несущих элементов конструкции (колеса, оси, боковины тележки, надрессорной балки, пятника, автосцепки, тягового хомута и др.).

Поскольку перечисленные отказы имеют нулевую контролепригодность, то оценивать период между ремонтами с помощью моделей темпа (скорости) их деградации не представляется возможным. Для таких отказов требуется принципиально иной подход. Он основан на построении вероятностных моделей надёжности и оценке остаточного срока службы детали, в течение которого опасный отказ не возникнет с заданной (требуемой) вероятностью. Решение этой задачи невозможно без статистической информации об отказах деталей каждой партии.

Для этого потребуется:

вести сбор информации об отказах по каждой ответственной детали. Эта технология возможна, поскольку каждая ответственная деталь имеет уникальный идентификационный номер, кроме того, в системе ЖТСВ предусмотрено ведение ремонтно-эксплуатационного паспорта вагона, в котором фиксируются все случаи замены основных элементов вагона;

в базе ЖТСВ осуществлять сбор информации не только о причинах перевода вагона в состав неисправных, но и о реально выполненных ремонтных работах, поскольку на специализированных ремонтных путях текущего ремонта могут быть выявлены отказы, информация о которых в настоящее время теряется. Такая возможность существует, поскольку в системе вагонного комплекса предусмотрена специальная вагонная учётная форма (ВУ-22) — дефектная ведомость, которая оформляется на каждый вагон при его ремонте и служит основой для расчёта оплаты за выполненный ремонт;

в информационной системе фиксировать все случаи браковки перечисленных выше деталей, в том числе по результатам дефектоскопирования, в вагонных ремонтных депо независимо от формы собственности предприятия.

Использование вероятностных моделей позволит в системе ТОиР управлять техническим состоянием вагона, используя более эффективную планово-диагностическую стратегию, решая следующие взаимосвязанные задачи:

оценивать нормативный срок службы вагона рассматриваемого типа и параметры системы ТОиР;

оценивать периодичность проведения глубоких диагностик на основе оценки остаточного срока службы деталей, влияющих на безопасность движения;

оценивать остаточный срок службы вагона;

оценивать показатели безопасности движения вагона;

оценивать с заданным уровнем риска величину гарантийного участка пункта технического обслуживания грузовых вагонов (периодичность контроля технического состояния);

решать вопрос о возможности, целесообразности и допустимости использования деталей (ранее отработавших некоторый период времени) при агрегатном методе ремонта;

оценивать величину гарантийного срока работы детали, установленной при текущем ремонте;

оценивать рациональные параметры и режимы работы предприятий вагонного комплекса (количество ремонтных позиций, параметры складского хозяйства, материально-технического снабжения) и другие задачи.

Оценка остаточного срока службы деталей вагона в системе управления техническим состоянием грузового вагона. При агрегатном методе ремонта грузовых вагонов основные элементы конструкции не закреплены за конкретным вагоном. Вследствие этого в вагонах одного года выпуска со временем могут оказаться детали совершенно разного возраста. Не вызывает сомнения, что деталь, безотказно проработавшая некоторое время t и пригодная к работе по результатам неразрушающего контроля, потенциально может использоваться в составе вагона. Однако если её остаточный ресурс меньше установленного периода до глубокой диагностики, то допускать эксплуатацию такой детали в составе данного вагона нельзя. Другими словами, если при деповском ремонте в результате неразрушающего контроля детали зафиксировано её исправное состояние, то этого недостаточно, чтобы без дополнительного анализа оставить её в составе отремонтированного вагона.

При этом остаётся актуальным вопрос: как определить тот остаточный срок службы для детали вагона, отработавшей некоторый период времени? Знание этого срока позволит использовать следующий принцип при выполнении ремонтов различного вида — не допускать эксплуатацию деталей, для которых остаточный срок службы меньше гарантийного периода (например, между глубокими диагностиками). Основные положения методики приведены в работе [8].

Введём в рассмотрение случайную величину ξ_t — остаточный срок службы рассматриваемого изделия при условии его безотказной эксплуатации в течение времени t; $\xi_t = \xi - t$, при условии $\xi > t$, где ξ — наработка изделия до отказа. Выражение вероятности события $\{\xi_t \geqslant x\}$, где x — требуемый срок службы изделия (например, до глубокой диагностики или до следующего ДР или КР), имеет вид

$$P\{\xi_t \geqslant x\} = \frac{\overline{F}(t+x)}{\overline{F}(t)}, \qquad (1)$$

где $\overline{F}(t)$ — функция надёжности (вероятность безотказной работы детали).

Однако требует решения обратная задача: найти тот остаточный срок службы изделия (обозначим x), в течение которого оно не откажет с наперёд заданной вероятностью, например, 95 %. Получить такое выражение не составляет труда, используя методы теории надёжности.

При решении этой задачи необходимо определить, что следует понимать под отказом детали. Рассмотрим, например, боковину тележки грузового вагона. Под отказом будем понимать событие, состоящее в появлении в материале этого изделия первой и только первой трещины.

С математической точностью доказано, что наработка изделия до указанного выше события имеет закон распределения Вейбулла—Гнеденко:

$$F(t) = e^{-\left(\frac{t}{a}\right)^b},$$

где a и b — параметры этого классического закона распределения наработки изделия до отказа.

Эти параметры можно определить, опираясь на данные наблюдений за эксплуатацией совокупности боковин вагонов одного типа и года изготовления, используя данные системы ЦПУВ, соответствующие стандартному плану испытаний на надёжность [NUT], под которым понимается, что под наблюдением находились N боковин в течение времени T. При этом предполагается, что при отказе боковины она заменялась на новую, на что указывает второй символ U в шифре рассматриваемого плана испытаний.

Точечные оценки параметров закона распределения наработки боковины до отказа по результатам эксперимента можно получить, например, с помощью метода максимального правдоподобия [9].

Зная параметры a и b, решим следующее уравнение относительно x:

$$0,95 = \frac{\overline{F}(t+x)}{\overline{F}(t)} = \frac{e^{-\left(\frac{t+x}{\hat{a}}\right)^{\hat{b}}}}{e^{-\left(\frac{t}{\hat{a}}\right)^{\hat{b}}}} = \ldots, \qquad (2)$$

откуда получаем выражение

$$x = \left[t^{\hat{b}} - a^{\hat{b}} \ln 0,95\right]^{\frac{1}{\hat{b}}} - t. \qquad (3)$$

Таким образом, x — это тот остаточный срок службы рассматриваемого изделия, за который оно не откажет с вероятностью 95 % (или с риском 5 % за время x изделие откажет).

Так, например, для боковины тележки грузового вагона был проведён эксперимент, соответствующей стандартному плану [NUT]. Период наблюдения $T = 20$ мес, начиная от даты постройки вагона. В эксперименте участвовало $N = 9395$ вагонов и было зафиксировано 8 отказов боковин (трещин и изломов). При этом учитывалось условие, что в результате неразрушающего контроля отказ боковой балки подтверждён. Полученные методом максимального правдоподобия точечные оценки параметров упомянутого выше закона распределения наработки до отказа имеют значения: оценка параметра $\hat{a} = 304$ мес, оценка параметра $b = 2{,}4$.

Тогда остаточный ресурс боковины, безотказно проработавшей в течение периода $t = 20$ мес, с учётом требуемой вероятности работы без отказа в период между глубокими диагностиками $y = 0{,}99$ составит:

$$x = \sqrt[2,4]{\left(\left(\frac{20}{304}\right)^{2,4} - \ln 0{,}99\right)304^{2,4}} - 20 = \\ = 27{,}3 \text{ мес.}$$

По истечении этого срока вновь потребуется принимать решение о величине остаточного ресурса боковины, но уже проработавшей безотказно 47,3 мес. При условии того, что параметры вероятностной модели a и b не изменились, он составит 14,1 мес. Продолжая эти рассуждения, можно построить график изменения остаточного ресурса детали по мере её старения (рис. 2). Точки на графике соответствуют плану проведения необходимых глубоких диагностик детали при заданном риске отказа 0,01 (требуемом уровне вероятности отсутствия отказа 0,99).

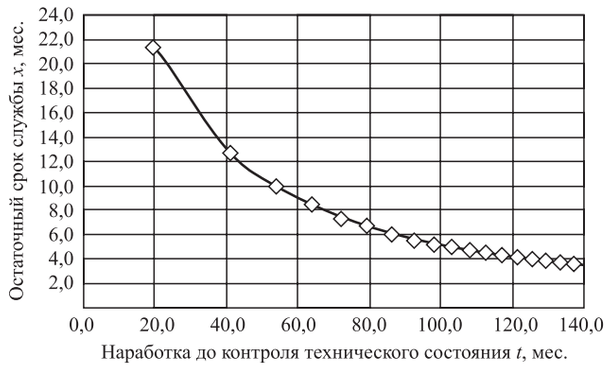

Рис. 2. Изменение остаточного срока службы боковины тележки грузового вагона по мере её старения

В реальных условиях система должна в автоматическом режиме отслеживать состояние деталей одной партии, по мере накопления статистической информации пересчитывать параметры функции надёжности и величину остаточного срока службы, а также давать рекомендации о необходимости направления вагона на глубокую диагностику.

Заключение. Таким образом, с внедрением современных информационных технологий актуальна задача перехода от устаревшей плановой стратегии проведения ремонтов крупного объёма к планово-диагностической системе ТОиР. Для такой организации требуется обосновывать периодичность проведения глубоких диагностик, по результатам которых (на основе фактического технического состояния) принимается решение о необходимости отправки вагона в ремонт или продолжении его использования с установлением срока службы до следующей глубокой диагностики (остаточного срока службы). При этом для его оценки необходимо учитывать усталостные трещины основных несущих узлов и деталей вагонов. В отличие от прогнозирования индивидуального срока службы каждой детали вагона на основе оценки темпа её деградации (например, скорости износа), при оценке остаточного срока службы деталей по усталостным повреждениям требуется другой подход. Он основан на получении вероятностных моделей безотказности по данным эксплуатационных наблюдений за группой однотипных изделий в соответствии со стандартным планом испытаний на надёжность.

Прогнозируемое значение остаточного срока службы детали оценивают с учётом требуемой вероятности её безотказной работы в период до следующей глубокой диагностики. Приведённую технологию достаточно просто автоматизировать и реализовать в условиях вагонных депо. По мере накопления статистической информации автоматизированная система сможет обеспечивать корректировку значений остаточного срока службы детали и передавать значения в систему управления фактическим состоянием вагона. Такая система совместно с автоматизированным комплексом, отслеживающим темпы износов основных элементов вагонов, позволит на принципиально ином уровне организовывать работу системы ТОиР в вагонном комплексе.

Библиографические ссылки

1. **Устич П.А., Хаба И.И., Ивашов В.А.** Вагонное хозяйство: учеб. для вузов ж.-д транспорта [под ред. П.А. Устича]. М.: Маршрут, 2003. 560 с.

2. "**Положение** о системе технического обслуживания и ремонта грузовых вагонов, допущенных в обращение на железнодорожные пути общего пользования в международном сообщении, введено в действие распоряжением ОАО "РЖД" № 2759 от 29.12.2012 г.

3. **Морчиладзе И.Г., Никодимов А.П., Соколов М.М., Третьяков А.В.** Железнодорожные цистерны: учеб. пособ. для работников железнодорожного транспорта. М.: ИБС-Холдинг, 2006. 516 с.

4. **Техническое** обслуживание и ремонт подвижного состава во Франции // Железные дороги мира: материалы SNCF (www.sncf.fr). 2011. № 3. С 46—53.

5. **Техническое** обслуживание высокоскоростных поездов в Испании // Железные дороги мира материалы компании Nertus (www. nertus.es) / J.R. Lopez, M. Hofmann. RTR. 2011. № 1. P. 12—15

6. **Тычков А.С.** Диагностирование тяговых электродвигателей грузовых электровозов по параметрам магнитного поля. Дисс. ... канд. техн. наук. М.: 2009. С. 183.

7. **Устич П.А., Карпычев В.А., Овечников М.Н.** Надёжность рельсового нетягового подвижного состава. М.: ИГ "Вариант", 1999. 415 с.

8. **Устич П.А., Иванов А.А., Мажидов Ф.А.** Оценка остаточного срока службы деталей на основе данных об отказах // "Мир транспорта-2015" № 6. Т. 13. С. 196—205.

9. **Котуранов В.Н., Хусидов В.Д., Устич П.А.** и др. Нагруженность элементов конструкции вагона: учеб. для вузов [под ред. В.Н. Котуранова]. М.: Транспорт, 1991. 238 с.

УДК.621.396

В.В. Глазков, И.В. Муратов, А.Д. Цисарский
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
wave@sm.bmstu.ru

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА СОПРОВОЖДЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ ОБЪЕКТОВ

Рассмотрена задача сопровождения летящего объекта с неподвижного наземного локатора. Приведена математическая модель системы сопровождения. Получена передаточная функция системы сопровождения. Определены ошибки сопровождения по азимуту и углу места. Показана взаимосвязь формы функции ошибки со второй производной входного воздействия.

Ключевые слова: система сопровождения; ошибка сопровождения; передаточная функция; численные методы.

The problem of tracking a flying object with fixed ground-based radar is considered. The mathematical model of tracking system is adduced. the transmission function of tracking system is received. The tracking errors in azimuth and place angle are determined. The relationship of the error function form with the second derivative of the input exposure is shown.

Keywords: tracking system; tracking error; transmission function; numerical methods.

Введение. В настоящее время с появлением беспилотных летательных аппаратов, а также увеличением скоростей классических воздушных объектов на новый уровень выходит задача сопровождения этих объектов средствами радиолокации [1—5]. Проектирование таких систем следует начинать с разработки математической модели и анализа её поведения при различных внешних условиях.

Часть задач анализа следящих систем требует решения дифференциальных уравнений и осуществления интегрирования различных функций. Если для функции $f(x)$ можно найти первообразную $F(x)$, так что $F'(x) = f(x)$, то задача вычисления определённого интеграла может быть решена аналитически.

Однако нахождение первообразной функции возможно только для ограниченного класса функций. Часто первообразную функцию $F(x)$ для заданной $f(x)$ найти не удаётся. Примером может служить плотность распределения по нормальному закону (распределение Гаусса).

В таких случаях необходимо осуществлять численное интегрирование. Но если даже первообразную функцию можно найти, она часто оказывается настолько сложной, что гораздо выгоднее с точки зрения затраты труда воспользоваться численной процедурой [6].

Постановка задачи. Рассмотрим задачу сопровождения объекта, летящего с постоянной скоростью v на высоте H по прямолинейной траектории lm. Расстояние между проекцией траектории $l'm'$ на плоскость местного горизонта и точкой O, из которой проводится наблюдение за объектом, обозначим p (рис. 1). В качестве сопровождающего устройства используется следящая система с астатизмом второго порядка (рис. 2) [7], состоящая из сельсинной пары, управляющего серводвигателя, корректирующего элемента и гидропривода. Необходимо оценить величину ошибки сопровождения как в угловом, так и в линейном измерении.

Обозначенные на рис. 2 элементы имеют следующие передаточные функции:

сельсинная пара —
$W_1(s) = k_s$;

управляющий серводвигатель —
$$W_2(s) = \frac{k_d}{(1+T_d s)s};$$

корректирующий элемент —
$$W_3(s) = \frac{k_{\text{cor}}(1+\tau s)s}{1+\theta s};$$

гидропривод —
$$W_4(s) = \frac{k_{hyd}}{(1+T_{hyd}s)s},$$

где k_s, k_d, k_{cor}, k_{hyd} — коэффициенты усиления соответствующего звена; T_d, τ, θ, T_{hyd} — постоянные времени соответствующего звена.

Определение ошибки сопровождения следящей системы. Для получения передаточной функции всей следящей системы найдем передаточную функцию $W_{in}(s)$ внутреннего контура следящей системы [8]:

$$W_{in}(s) = \frac{W_2(s)}{1+W_2(s)W_3(s)},$$

или, согласно обозначениям для передаточных функций элементов *2* и *3*,

$$W_{in}(s) = \frac{k_d(1+\theta\ s)}{s[1+k_d k_{cor} + s(T_d+\theta+k_d k_{cor}\tau)+s^2 T_d\theta]}.$$

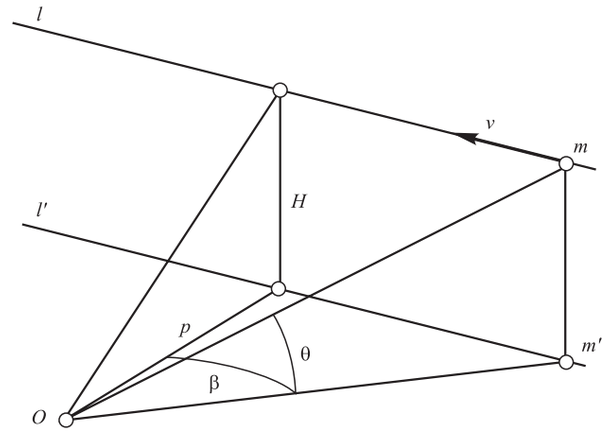

Рис. 1. Задача сопровождения движущегося объекта:
m — начальная точка траектории; l — конечная точка траектории; m' — проекция начальной точки траектории на плоскость местного горизонта; l' — проекция конечной точки траектории на плоскость местного горизонта; H — высота объекта над плоскостью местного горизонта; p — расстояние между точкой наблюдения и проекцией траектории на плоскость местного горизонта; v — скорость объекта; β — азимут; θ — угол места

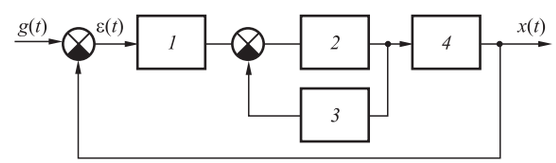

Рис. 2. Схема следящей системы с астатизмом второго порядка:
1 — сельсинная пара; *2* — управляющий серводвигатель; *3* — корректирующий элемент; *4* — гидропривод

Введём обозначения для преобразования передаточной функции к каноническому виду:

$$\mu = \frac{k_s k_{hyd} k_d}{1+k_d k_{cor}};$$

$$T^2 = \frac{T_d\theta}{1+k_d k_{cor}};$$

$$\zeta = \frac{T_d+\theta+k_d k_{cor}\tau}{2T(1+k_d k_{cor})}.$$

В указанных обозначениях передаточная функция следящей системы с разомкнутой главной обратной связью имеет компактный вид, состоящий из комбинации передаточных функций элементарных звеньев:

$$W(s) = \frac{\mu(1+\theta\ s)}{s^2(1+T_{hyd}s)(1+2\zeta Ts+T^2s^2)}. \quad (1)$$

Соответственно, передаточная функция замкнутой системы приобретает вид:

$$W(s) = \frac{\mu(1+\theta s)}{s^2(1+T_{hyd}s)(1+2\zeta\ Ts+T^2s^2)+\mu(1+\theta s)}. \quad (2)$$

Для дальнейших вычислений необходимо сделать дополнительные предположения о параметрах передаточной функции (1), так как, согласно теореме Абеля, алгебраическое уравнение степени порядка $n \geqslant 5$ не имеет решения в общем виде в полных радикалах.

Положим: $T_{hyd} = 0{,}03$ с; $T = 0{,}015$ с; $\theta = 1{,}5$ с; $\zeta = 0{,}2$; $\mu = 22$ с$^{-2}$.

Анализ передаточной функции (2) проведём в пакете MatLab [9, 10]. М-сценарий для создания передаточной функции будет иметь следующий вид:

```
T = 0.015;
Thyd = 0.03;
zeta = 0.2;
mu = 22;
theta = 1.5;
W = tf([mu*theta, mu],[T^2*Thyd,T^2 +
2*zeta*T*Thyd,2*zeta*T + Thyd,1,mu*theta,mu]).
```

Полюса передаточной функции (2) можно получить следующим образом:

```
pole(W)
ans =
-28.2531 + 43.7321i
-28.2531 -43.7321i
-1.4086 + 49.2066i
-1.4086 -49.2066i
-0.6766 + 0.0000i.
```

Из решения видно, что длительность переходного процесса в следящей системе в основном определяется вещественным корнем — 0,6766. Сам процесс обладает колебательностью, судя по двум парам комплексно-сопряжённых корней. Внешний вид импульсной характеристики (рис. 3) можно получить при помощи команды: `impulse(W)`.

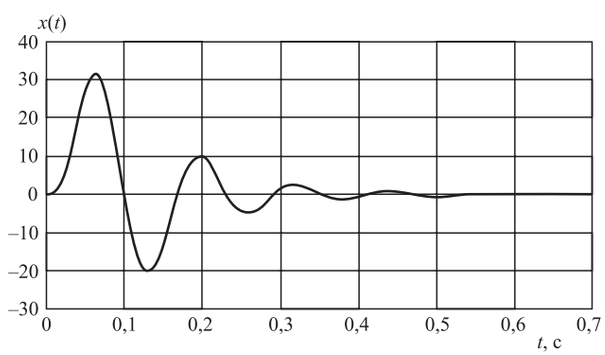

Рис. 3. Импульсная характеристика следящей системы

Для решения задачи о точности сопровождения необходима передаточная функция замкнутой системы по отношению к ошибке:

$$\Phi_\varepsilon(s) = \frac{E(s)}{G(s)} = \frac{1}{1+W(s)} = \frac{s^2(1+T_{hyd}s)(1+2\zeta Ts+T^2s^2)}{s^2(1+T_{hyd}s)(1+2\zeta\ Ts+T^2s^2)+\mu(1+\theta\ s)}. \quad (3)$$

Обычно вычисление текущего значения ошибки сводится к определению оригинала для изображения $E(s)$. Но в данном случае препятствие для такого прямого решения — это сложный характер изображения входного воздействия, которое не принадлежит к классу целых полиномов. Как видно из рис. 1, входные воздействия по двум каналам имеют вид:

$$\beta = \arctan(Vt/p);\ \theta = \arctan(H\cos\beta/p).$$

Несмотря на то, что математические пакеты позволяют найти изображение функции arctan(t), дальнейшие операции становятся затруднительными, так как преобразование Лапласа этой функции имеет вид:

$$L\{\arctan(t)\} = \frac{\mathrm{Ci}(s)\sin(s) - \mathrm{Ssi}(s)}{s},$$

где $\mathrm{Ssi}(s) = \int_0^s \frac{\sin t}{t}dt - \frac{\pi}{2}$ — сдвинутый интегральный синус; $\mathrm{Ci}(s) = c + \ln s + \int_0^s \frac{\cos t - 1}{t}dt$ — интегральный косинус.

Кроме того, здесь присутствует постоянная Эйлера:

$$c = \lim_{n\to\infty}\left(\sum_{i=1}^{n}\frac{1}{i} - \ln n\right).$$

Достичь аналитических результатов при дальнейших преобразованиях такого сочетания специальных функций практически невозможно. Поэтому уместно использование численных методов интегрирования.

Для нахождения ошибки воспользуемся вместо аппарата передаточных функций (3) интегралом свёртки:

$$\varepsilon_\beta(t) = \int_0^\infty k_\varepsilon(\tau)\beta(t-\tau)d\tau;$$

$$\varepsilon_\theta(t) = \int_0^\infty k_\varepsilon(\tau)\theta(t-\tau)\ d\tau,$$

где $k_\varepsilon(\tau)$ — импульсная функция по отношению к ошибке.

Импульсная функция по отношению к ошибке легко находится из передаточной функции (3), будучи оригиналом по отношению к ней. Однако этого нельзя сделать в общем виде, так как невозможно разложить (3) на элементарные дроби.

Во избежание появления δ-функции вместо передаточной функции по отношению к ошибке для последующих вычислений следует использовать выражение

$$\varepsilon(t) = g(t) - \int_0^\infty k(\tau)g(t-\tau)d\tau,$$

где в качестве входного воздействия *g(t)* выступает $\theta(t)$ или $\beta(t)$.

Сначала осуществим расчёт ошибки слежения по каналу азимута. Для определённости примем скорость перемещения объекта $v = 220$ м/с и параметр $p = 500$ м. Расчёт ошибки слежения по азимуту проведём в пакете MatLab. М-сценарий для этого анализа будет иметь следующий вид:

```
syms s t tau; T = 0.015; Thyd = 0.03;
zeta = 0.2; mu = 22; theta = 1.5; V = 220;
p = 500; tnum = -15:0.01:15;
num = mu*(1 + theta*s);
den = s^2*(1 + Thyd*s)*(1 + 2*zeta*T*s + s^2*T^2);
w = num/(num + den); k = ilaplace(w, tau);
betta _ t = atan(V*t/p);
betta = atan(V*(t-tau)/p); er _ betta = betta _ t -
- int(k*betta,tau,0,inf);
er _ betta _ num = double(subs(er _ betta,t,tnum)).
```

В результате в переменной `er _ betta _ num` будут находится числовые значение ошибки по каналу угла азимута для временных отсчётов `tnum`.

Характер изменения ошибки слежения почти в точности повторяет график второй производной входного воздействия (рис. 4). Это объясняется наличием астатизма второго

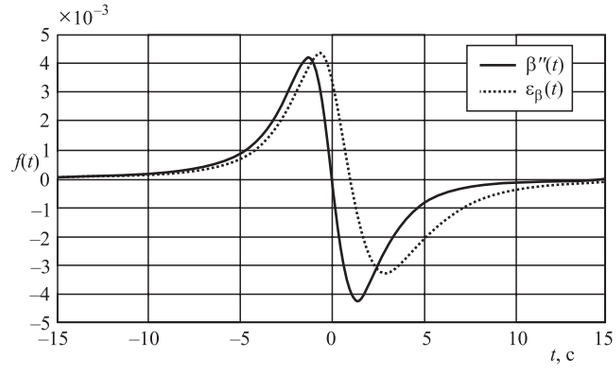

Рис. 4. Сравнение изменения ошибки слежения и второй производной входного воздействия по каналу азимута

порядка в следящей системе. Для построения графика дважды продифференцируем входное воздействие по каналу азимута:

$$\beta''(t) = \frac{-2V^3pt}{(p^2+V^2t^2)^2}.$$

Для построения графиков на одном рис. 4 ввиду различия масштабов следует значения второй производной разделить на 30.

Проведём аналогичный расчёт для канала угла места. Вторая производная от угла места по времени имеет вид:

$$\theta''(t) = \frac{hV^2[(Vtp)^2 + 2(Vt)^4 - p^4 - (hp)^2]}{[p^2+(Vt)^2]^{3/2}[p^2+(Vt)^2+h^2]^2}.$$

В остальном алгоритм вычисления интеграла не отличается от предыдущего за исключением вида входного воздействия и дополнительного предположения о высоте полёта $H = 1000$ м. Расчёт ошибки слежения по углу места проведём в пакете MatLab. М-сценарий для этого анализа будет иметь следующий вид:

```
syms s t tau; T = 0.015; Thyd = 0.03; zeta = 0.2;
mu = 22; theta = 1.5; V = 220;
p = 500; H = 1000; tnum = -15:0.01:15;
num = mu*(1 + theta*s);
den = s^2*(1 + Thyd*s)*(1 + 2*zeta*T*s + s^2*T^2);
w = num/(num + den);
k=ilaplace(w,tau);g _ t=atan(H*cos(betta _ t)/p);
g = atan(H*cos(betta)/p);
er _ g = g _ t - int(k*g,tau,0,inf); er _ g _ num =
= double(subs(er _ g,t,tnum)).
```

В результате в переменной `er _ g _ num` будут находится числовые значение ошибки по каналу угла места для временных отсчётов `tnum`. Построение графиков (рис. 5) обнару-

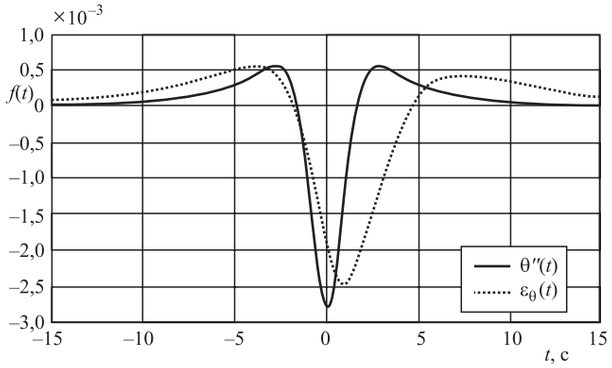

Рис. 5. Сравнение изменения ошибки слежения и второй производной входного воздействия по каналу угла места

живает ту же закономерность — ошибка слежения с точностью до масштаба и некоторого сдвига по времени повторяет изменение второй производной.

Заключение. Таким образом, решена задача оценки величины ошибки сопровождения летящего объекта по азимуту и углу места. Так как аналитическое решение задачи затруднено, то на основе численных методов интегрирования получена зависимость ошибки от времени. Из рис. 4 и 5 видно, что ошибки сопровождения не превышают 0,0028 рад по углу места и 0,0042 рад по азимуту. Так как дальность до объекта в этот момент составляет около 1120 м, то линейные ошибки равны соответственно 2,2 м и 4 м.

Кроме этого, форма ошибок по двум каналам близка к форме второй производной входного воздействия.

Библиографические ссылки

1. **Муратов И.В., Лихоеденко К.П., Хохлов В.К.** Моделирование бортового радиолокационного координатора цели миллиметрового диапазона радиоволн // Электромагнитные волны и электронные системы. 2014. Т. 19. № 11. С. 18—22.

2. **Муратов И.В.** Математическая модель пеленгационной характеристики следящего координатора цели // Электромагнитные волны и электронные системы. 2013. Т. 18. № 11. С. 34—38.

3. **Журавлев Ю.В.** Синтез адаптивного следящего идентификатора прямым методом Ляпунова // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Естественные науки. 2010. № 2. С. 3—15.

4. **Верба В.С., Меркулов В.И., Соколов Д.А.** Сопровождение интенсивно маневрирующих целей инерционными следящими системами // Радиотехника. 2014. № 5. С. 101—106.

5. **Баринов С.П., Карпухин В.И., Щербаков А.Н.** Вероятностные характеристики следящего радиолокационного измерителя угловых координат при воздействии уводящей помехи // Телекоммуникации. 2005. № 12. С. 32—36.

6. **Шахтарин Б.И., Асланов Т.Г.** Анализ систем синхронизации численными методами // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2011. № 4. С. 101—110.

7. **Астапов Ю.М.** Теория управления летательными аппаратами: учеб. пособие. М.: МАТИ, 2006. 276 с.

8. **Первачев С.В.** Радиоавтоматика. М.: Радио и связь. 1982. 296 с.

9. **Мэтьюз Джон Г., Финк Куртис Д.** Численные методы. Использование MATLAB. Пер. с англ. М.: Вильямс, 2001. 713 с.

10. **Андреев В.В., Семенов М.И.** Создание и использование системы обработки и анализа данных с применением пакета MatLab. // Прикладная информатика. 2008. № 2. С. 85—92.

Вниманию авторов!

Требования к оформлению статей, присылаемых для публикации, можно найти на сайте www.mashin.ru

УДК 004.94

М.С. Тимофеева, канд. экон. наук, доц., **Д.В. Глазунов,** канд. техн. наук, **Г.С. Мизюков**
(Ростовский государственный университет путей сообщения)
mara1512@yandex.ru

РАЗРАБОТКА И АПРОБАЦИЯ КРОССПЛАТФОРМЕННОГО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО СИМУЛЯТОРА

Разработан кроссплатформенный симулятор 2D RailWay Simulator для оптимизации образовательного процесса, позволяющий оценивать уровень подготовки обучающихся как при подготовке к экзамену, так и в качестве итоговой аттестации студентов по профессии помощник машиниста электровоза. Симулятор можно адаптировать при изучении элементов управления электровоза по дисциплине "Подвижной состав железных дорог" для специальности 23.05.03 (190300) Подвижной состав железных дорог всех форм обучения.

Ключевые слова: кроссплатформенный железнодорожный симулятор; федеральный государственный образовательный стандарт; учебный процесс; компетенция; апробация; тренажёр; специальность.

A cross-platform simulator 2D RailWay Simulator for the educational process optimization is developed. Simulator allows to evaluate the level of students training both in preparing for the exam, as well as the final students certification for the profession as assistant locomotive driver. The simulator can be adapted for the discipline "Railway rolling stock", the specialty 23.05.03 (190300), at study of the electric locomotive control elements for all forms of learning.

Keywords: cross-platform railway simulator; federal state educational standard; educational process; competence; approbation; trainer; specialty.

Одним из приоритетных направлений в решении многочисленных проблем в теоретической и практической подготовке студентов системы высшего образования является внедрение в учебный процесс железнодорожных симуляционных программ и тренажёров. В соответствии с законом об образовании [1] образовательные программы подготовки специалистов железнодорожного транспорта включают в себя теоретическую, тренажёрную и практическую подготовку по эксплуатации объектов транспортной инфраструктуры и транспортных средств. По мнению работодателей ОАО "РЖД", результатом обучения в вузе должно быть не усвоение выпускниками определённого набора теоретических знаний, а подготовка их к успешному выходу на рынок труда, для чего знания должны сочетаться с практическим опытом, навыками поведения в профессиональной среде и соответствующими поведенческими установками и компетенциями.

Тренажёрные комплексы управления подвижным составом получили широкое распространение как в нашей стране, так и за рубежом. Например, в Ростовском государственном университете путей сообщения в учебном процессе широко используется лабораторно-тренажёрный комплекс "Виртуальная железная дорога". Лабораторный комплекс состоит из восьми лабораторий. На базе комплекса проводятся масштабные деловые игры с отработкой навыков взаимодействия и слаженной работы в штатных ситуациях, при отказе технических средств, а также в различных нештатных ситуациях, возникающих на железной дороге. Например, для оптимального управления подвижным составом оборудована лаборатория, состоящая из учебного тренажёра рабочего места машиниста высокоскоростного электропоезда "Сапсан" с полноразмерной имитацией кабины на динамической платформе (рис. 1).

На тренажёрном комплексе отрабатываются рациональные и энергосберегающие режимы вождения поездов, навыки поведения в нештатных ситуациях, после чего присуждается и подтверждается классность машиниста—студента или слушателей курсов повышения квалификации. Но приобретение, обслуживание и ремонт тренажёров требуют выделения дополнительных помещений и

а)

б)

Рис. 1. Учебный тренажёр рабочего места машиниста высокоскоростного электропоезда "Сапсан" с полноразмерной имитацией кабины на динамической платформе: *а* — фрагмент кузова высокоскоростного наземного транспорта "Сапсан"; *б* — пульт управления "Сапсан"

вложения существенных финансовых затрат. К тому же в рамках учебного занятия (80 мин) каждому студенту или специалисту в группе, состоящей из 20—25 человек, невозможно полноценно освоить тренажёр.

Аналогами механического, учебно-тренировочного устройства могут быть симуляционные тренажёры с использованием компьютерных программ. Как правило, эти программы обладают хорошей физической моделью и весьма неплохой графикой. Примеры существующих симуляторов поезда: Southern Belle (1985 г.), Shortline (1992 г.), Train Simulator (1995 г.), 3D Railroad Master (1998 г.), MaSzyna (2001—2006 гг.), Trainz (2001—2012 гг.), Microsoft Train Simulator (2001 г.), Rail Simulator (2007 г.) др. [2]. На базе Центра мониторинга качества образования Ростовского государственного университета путей сообщения разработан железнодорожный симулятор 2D RailWay Simulator, предназначенный для студентов специальности 23.05.03 (190300) Подвижной состав железных дорог. Симулятор создан с использованием гибкой и мощной платформы разработки кроссплатформенных 3D-2D-игр и интерактивного контента Unity 3D Personal Edition, языка программирования C# с применением объектно-ориентированного подхода, графического редактора векторной графики Inkscape и среды Microsoft Visual Studio Community 2015. На рис. 2 представлен фрагмент диаграммы классов проекта 2D RailWay Simulator, полученных с помощью обратного проектирования в среде Microsoft Visual Studio Community 2015. Данные классы условно мож-

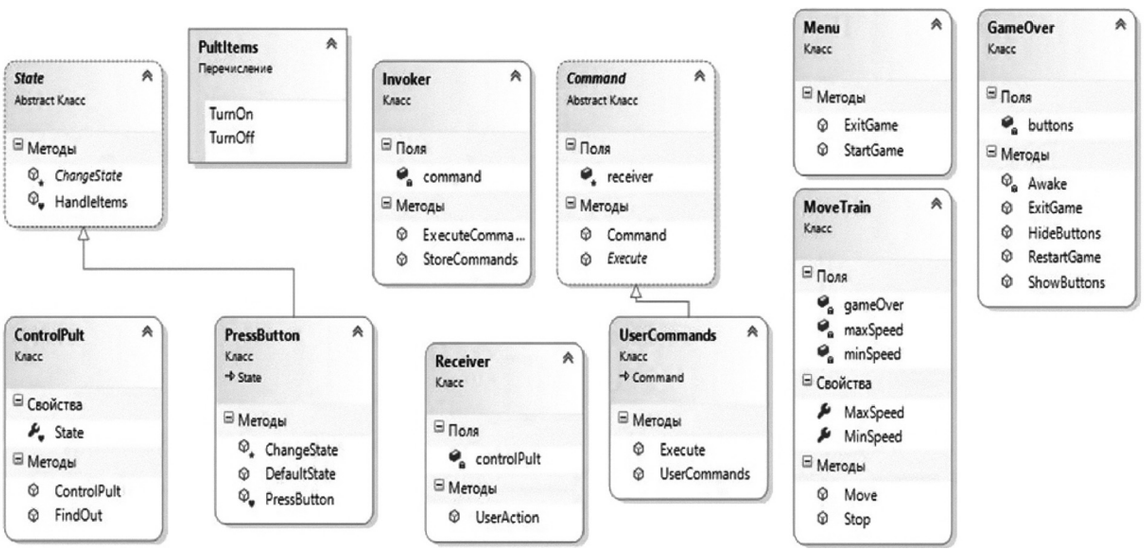

Рис. 2. Фрагмент диаграммы классов проекта 2D RailWay Simulator

но разделить на три составляющие части проекта. Первая часть состоит из классов: Menu и GameOver, отвечающие за запуск, выход и перезапуск приложения. Ко второй части относятся классы: Invoker, Command, UserCommands и Receiver, построенные на базе шаблона проектирования Command и отвечающие за обработку полученных от пользователя команд. Классы State, PultItems, ControlPult, PressButton входят в третью часть проекта [3, 4].

При проектировании классов третьей части проекта был взят шаблон проектирования State, основанный на конечных автоматах Мили, который можно выразить в виде формулы (1) и графа, представленного на рис. 3,

$$A = <S, X, Y, s0, \delta, \lambda>, \qquad (1)$$

где S — конечное непустое множество (состояние, в котором могут находиться элементы управления); X — конечное непустое множество входных сигналов (действия пользователя); Y — конечное непустое множество выходных сигналов (реакция на действия пользователя); $s0 \in S$ — начальное состояние; $\delta: S \times X \rightarrow S$ — функция перехода; $\lambda: S \times X \rightarrow Y$ — функция выхода.

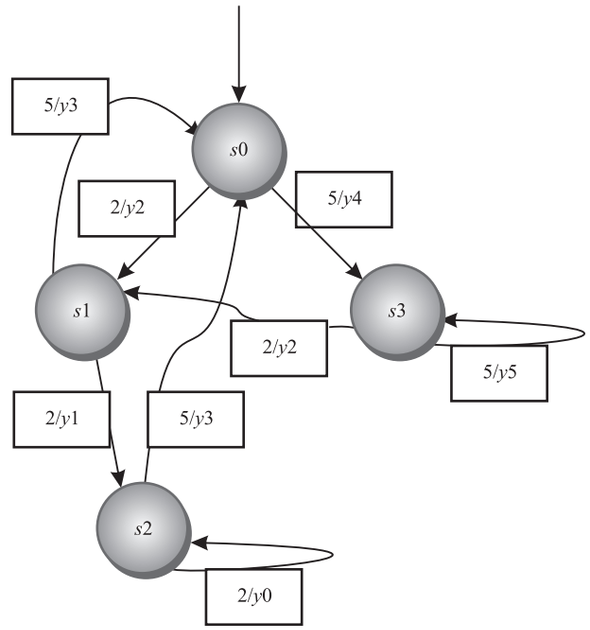

Рис. 3. Изображение автомата Мили в виде графа

В разработанном симуляторе присутствуют следующие объекты: модель электровоза, пульт управления, светофор, контактная сеть, рельсы, пейзаж, а также информационное табло, отображающее фамилию, имя, отчество студента, минимальную и максимальную скорость, ограничение скорости, установленное на участке пути, количество сделанных шагов и допущенных ошибок и две кнопки "Помощь" и "Комментарий" (рис. 4).

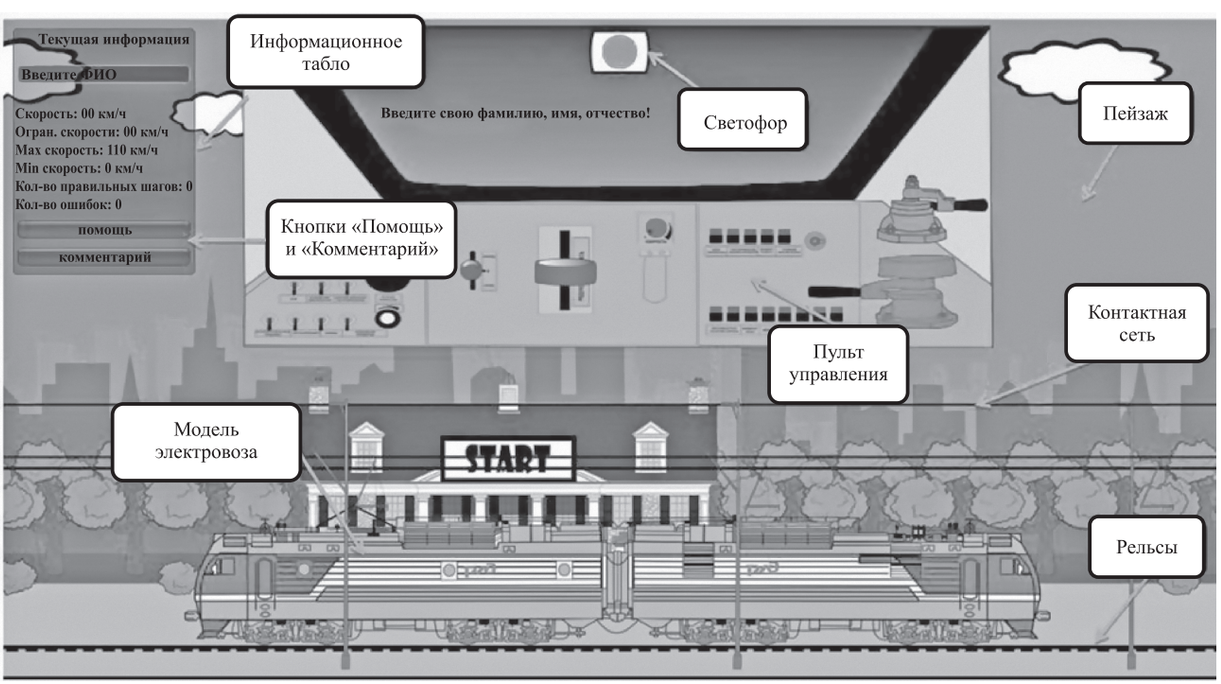

Рис. 4. Изображение пользовательского интерфейса симулятора 2D RailWay Simulator

При нажатии на кнопку "Помощь" появляется экранная форма, отображающая правильную последовательность запуска электровоза, кнопка "Комментарий" позволяет оставлять замечания и предложения по улучшению симулятора.

Для соответствия федеральному государственному образовательному стандарту по профессии 190623.01 "Машинист локомотива" при апробации на симуляторе 2D RailWay Simulator [5] разработана коммуникативная матрица распределения компетенций по профессии 190623.01 "Машинист локомотива", позволяющая освоить симмуляционные действий, представленные в табл. 1.

Критерием освоения компетенций обучающихся является правильное выполнение всех ситуаций кроссплатформенного симулятора 2D RailWay Simulator. Для апробации симулятора были привлечены студенты пятого курса по специальности 23.05.03 (190300) Подвижной состав железных дорог, обучающиеся на курсах по профессии помощник машиниста локомотива. Апробация проходила в два этапа. На первом подготовительном этапе студентам было предложено пройти анкетирование. Цель анкетирования заключалась в понимании устройства и взаимодействия узлов и деталей подвижного состава, реализованных на симуляторе 2D RailWay Simulator. На основании результатов подготовительного этапа определяли уровень остаточных знаний студентов.

Второй этап апробации проходил непосредственно с применением симулятора 2D RailWay Simulator, установленного в компьютерном классе Центра мониторинга качества образования. Студентам необходимо было запустить приложение, ввести фамилию, имя, отчество, номер группы и последовательно сформировать взаимодействие узлов и деталей, необходимых для запуска подвижного состава. Каждый шаг работы студента на симуляторе отображался как на самом пульте управления в виде анимации элемента управления, так и на информационном табло, расположенном в левом верхнем углу экрана. На табло также отображалась информация о скорости электровоза, сигнале ограничения скорости с уведомлением об уменьшении скорости на участке, количестве введённых команд и допущенных ошибок во время виртуальной симуляции (см. рис. 4).

По завершению симуляции студентам предложили оставить комментарии и замечания, которые, по их мнению, могли бы оптимизировать работу симулятора 2D RailWay Simulator.

Сравнивая результаты анкетирования на подготовительном этапе с результатами, полученными при тестировании на симуляторе при оценке уровня освоения студентами элемента компетенции ПК 1.1, определено, что подготовка ко второму этапу позволила существенно снизить количество ошибок при использовании симулятора 2D RailWay Simulator (рис. 5, *а*).

При последовательном взаимодействии узлов и деталей подвижного состава определено, что на один элемент управления подвижным составом приходится три среднестатистические ошибки, полученные при анкетировании студентов, а при тестировании на симуляторе — одна ошибка на элемент управления, что в три раза меньше по сравнению с первым этапом. Выявлено, что при анкетировании макси-

Таблица 1

Коммуникативная матрица распределения компетенций по профессии 190623.01 "Машинист локомотива"

Вид профессиональной деятельности	Наименование компетенций	Коммуникация компетенции с действиями, примененными на симуляторе
Общекультурная	ОК 3. Анализировать рабочую ситуацию, осуществлять текущий и итоговый контроль, оценку и коррекцию собственной деятельности, нести ответственность за результаты своей работы	Внесение корректных комментариев в доработку симулятора
Техническое обслуживание и ремонт локомотива	ПК 1.1. Проверять взаимодействие узлов локомотива	Расстановка правильной последовательности элементов при запуске электровоза
Управление и техническая эксплуатация локомотива	ПК 2.2. Обеспечивать управление локомотивом	Соблюдение скоростного режима движения электровоза

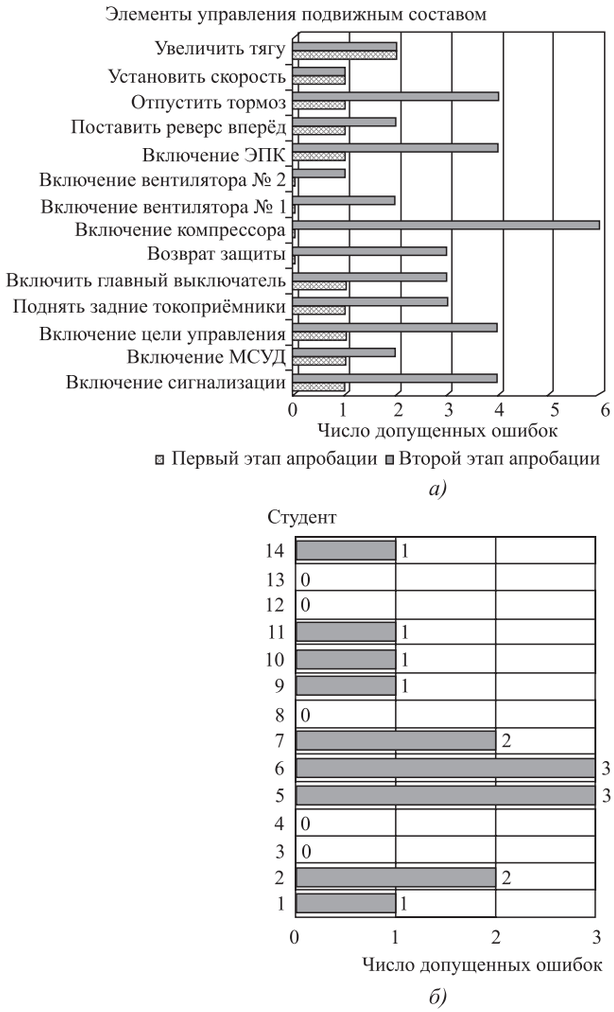

Рис. 5. Результаты проведения апробации кроссплатформенного симулятора 2D RailWay Simulator:
а — сравнения результатов апробации при освоении ПК 1.1; *б* — результаты освоения ПК 2.2

мальное количество ошибок (шесть) допущено при выборе варианта "Включение компрессора". Наибольшее число ошибок (две) при тестировании на симуляторе допущено при включении "Увеличить тягу". Это связано, прежде всего, с ограниченным алгоритмом включения элементов подвижного состава на симуляторе, так как включение в другой последовательности элементов управления электровоза не повлияет на запуск электровоза. Эксплуатация электровоза осуществлялась при соблюдении скоростного режима движения электровоза на симуляторе, что позволило оценить уровень освоения компетенции ПК 2.2.

В результате апробации данного этапа на симуляторе полностью освоили элементы компетенции ПК 2.2 пять студентов (рис. 5, *б*). Еще пять студентов группы частично освоили элемент компетенции ПК 2.2, допустив одну ошибку. Остальные студенты допустили от двух до трёх ошибок, что говорит о неудовлетворительных знаниях эксплуатации подвижного состава и требует дальнейшей подготовки данного этапа и освоения учебного материала. Результаты освоения элемента ПК 2.2 представлены на рис. 5, *б*. Обучающиеся могут проанализировать процессы, выполняемые на симуляторе, а также определить недостатки разработки симулятора 2D RailWay Simulator. Грамотная формулировка аргументированных умозаключений и выводов обучающегося по оценке симулятора позволяет определить уровень знаний в общекультурной и научно-исследовательской областях, а также оценить уровень освоения элементов компетенции ОК 3. В табл. 2 представлены примеры ком-

Таблица 2

Примеры комментариев обучающихся

№	Список комментариев
1	Перед включением компрессора добавить включение тумблера "Вспомогательные машины", либо сделать его сразу включённым положением "вверх"
2	Алгоритм запуска сделать нежёстким, т. е. не только в той последовательности, которая указана в приложении. К примеру, включение сначала Вентилятора № 2, а потом Вентилятора № 1, или включение ЭПК в начале, или непосредственно перед движением. Электровоз всё равно запустится. Выделить ключевые пункты
3	Добавить локомотивный светофор
4	Добавить положительные и отрицательные уклоны, а также кривые и стрелочные переводы
5	Продумать моделирование движения локомотива (вид от первого лица из кабины на путевые сооружения (наличие светофоров, стрелочных переводов, ограничений по перегону (щиты)), мостов и т.д.)

Рис. 6. Уровень освоения компетенций при апробации на симуляторе 2D RailWay Simulator по профессии 190623.01 "Машинист локомотива"

ментариев обучающихся, проходивших апробацию на симуляторе 2D RailWay Simulator.

По результатам апробации на симуляторе 2D RailWay Simulator получена удовлетворительная оценка уровня подготовки обучающихся по профессии 190623.01 "Машинист локомотива", в результате которой аттестованы обучающиеся по ПК 1.1 — 29 %, ПК 2.2 — 36 % и ОК 3 — 43 % (рис. 6).

Таким образом, полученные результаты апробации симулятора "2D RailWay Simulator", подтверждают, что применение подобных симуляционных программных средств в образовательном процессе может способствовать качественному усвоению учебного материала и повышению уровня подготовки обучающихся, а также уменьшению риска, связанного с неправильной эксплуатацией электровоза в эксплуатационных условиях.

Выводы. Для оптимизации образовательного процесса разработан кроссплатформенный симулятор 2D RailWay Simulator, позволяющий оценивать уровень подготовки обучающихся как при подготовке к экзамену, так и в качестве итоговой аттестации при обучении по профессии помощник машиниста локомотива. Симулятор можно адаптировать при изучении элементов управления электровоза по дисциплине "Подвижной состав железных дорог" для специальности 23.05.03 (190300) Подвижной состав железных дорог всех форм обучения [6].

В целях апробации обучающихся на симуляторе 2D RailWay Simulator разработана коммуникативная матрица симмуляционных действий, позволяющая освоить компетенции ПК 1.1, ПК 2.2, ОК 3 в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом по профессии 190623.01 "Машинист локомотива".

Разработана методика подготовки обучающихся на симуляторе 2D RailWay Simulator, включающая подготовительный и апробационный этапы и позволяющая качественно подготовить обучающихся к профессии помощника машиниста локомотива.

По результатам апробации на симуляторе 2D RailWay Simulator получена удовлетворительная оценка уровня подготовки обучающихся по профессии 190623.01 "Машинист локомотива", в результате которого освоили ПК 1.1 — 29 %, ПК 2.2 — 36 % и ОК 3 — 43 % обучающихся, а также определены недостатки разработки симулятора.

Библиографические ссылки

1. **Федеральный** закон от 29.12.2012 № 273 "Об образовании в Российской Федерации" (ред. от 03.02.2014 г. № 11-ФЗ). URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_173432/ (дата обращения: 10.02.2016).

2. **Тимофеева М.С., Глазунов Д.В.** Симуляционные технологии как составляющая процесса формирования профессиональных компетенций. В сб.: Тр. межд. науч.-практ. интернет-конференции. Сб. тр. 11-й межд. науч.-практ. интернет-конференции, 2014. С. 33—38.

3. **Шевчук А., Охрименко Д., Касьянов А.** Design Patterns Via C#. Приёмы объективно-ориентированного проектирования. Изд.: Itvdn, 2015. С. 249—264.

4. **Гамма Э., Хэлм Р., Джонсон Р., Влиссидис Д.** Приёмы объективно-ориентированного проектирования. Паттерны проектирования. Addison Wesley Longman Inc. Изд.: Питер, 1995. С. 291—300.

5. **Приказ** Минобрнауки России от 02.08.2013 № 703 "Об утверждении федерального государственного образовательного стандарта среднего профессионального образования по профессии 190623.01 Машинист локомотива" (Зарегистрировано в Минюсте России 20.08.2013 N 29697).

6. **Федеральный** государственный образовательный стандарт высшего профессионального образования специальности 23.05.03 (190300) Подвижной состав железных дорог (2011). URL: http://fgosvo.ru/uploadfiles/fgos/71/20110614155009.pdf (дата обращения: 10.02.2016).