

ISSN 1694-5050

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КЫРГЫЗСКАЯ АССОЦИАЦИЯ ПО
АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ
И КОМПЬЮТЕРНЫМ СИСТЕМАМ

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

№ 2 (35)

Журнал входит в РИНЦ, а также в перечень ВАК Кыргызской Республики рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Журнал издается с 1996 года.

Зарегистрирован Министерством юстиции
Кыргызской Республики
Свидетельство № 1503 от 26 февраля 2009 г.



БИШКЕК

2018

ИЛИМ

Проблемы автоматизации и управления: Научно-технический журнал
/ Национальная академия наук Кыргызской Республики. –
Бишкек: Илим, 2018. – №2 (35). – 176 с.

Главный редактор

академик НАН КР Ж. ШАРШЕНАЛИЕВ

Ответственный секретарь

доктор технических наук, доцент А.Б. БАКАСОВА

Редакционная коллегия:

*академик РАН Ю.Г. ЕВТУШЕНКО (Россия),
член-корр. НАН КР Р.О. ОМОРОВ, (Кыргызстан),
доктор технических наук, профессор Е.Л. ЕРЁМИН (Россия),
доктор технических наук, профессор С.А. АЙСАГАЛИЕВ (Казахстан),
доктор технических наук, профессор Б.И. ИСМАИЛОВ, (Кыргызстан),
доктор физ.-мат. наук, профессор А.Д. САТЫБАЕВ, (Кыргызстан),
доктор технических наук, профессор И.В. БРЯКИН, (Кыргызстан),
доктор технических наук, с.н.с. К.А. ПРЕСНЯКОВ, (Кыргызстан),
доктор технических наук Е.Л. МИРКИН
доктор технических наук Н.М. ЛЫЧЕНКО
доктор физ.-мат. наук, профессор А.А. АСАНОВ (Кыргызстан),
доктор технических наук Д.В. ЯНКО, (Кыргызстан),
доктор технических наук Б.Т. УКУЕВ (Кыргызстан)
доктор технических наук Б.Т. ТОРОБЕКОВ (Кыргызстан)
доктор технических наук Ж.Т. ГАЛБАЕВ (Кыргызстан)
кандидат технических наук С.Н. ВЕРЗУНОВ (Кыргызстан)*

В журнале публикуются статьи по оптимизации динамических систем, моделированию и программному обеспечению, информационно-измерительным системам, а также системам автоматизации и диагностики

Контакты редакции:

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265.

Институт автоматизации и информационных технологий, Кыргызская Ассоциация по автоматическому управлению и компьютерным системам.

Телефон: +996 312 39-20-36.

E-mail: avtomatika_nankr@mail.ru

Полная электронная версия журнала: <http://iait.kg/pau/>

СОДЕРЖАНИЕ

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

<i>Самохвалова Т.П.</i> Варианты решений уравнения Белмана в задачах оптимального управления тепловыми процессами	5
---	---

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ

<i>Гайдамако В.</i> Модель программирования CUDA и виртуализация графических процессоров.....	17
<i>Пресняков К.А., Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О.</i> Оценка значений тарифовочного коэффициента для различных объектов исследований (к методу определения поверхностной скорости воды)	27
<i>Сатаркулов К., Калматов У. А., Суюнтбекова Н. А.</i> Анализ процесса охлаждения силового трансформатора аналитическим и численным методами	42
<i>Великанова Л.И., Лыченко Н.М.</i> Восстановление пропусков в температурных временных рядах на базе нейросетевых моделей.....	51
<i>Мансуров А.Н.</i> Метод анализа интерфейса и взаимодействия компонентов программных пакетов, состоящих из скомпилированных файлов Р-кода MATLAB	59
<i>Цыбов Н.Н.</i> Особенности создания средств отображения больших объемов визуальной информации	69
<i>Акматабеков Р. А. Конокбаева А. К., Каракай Ю. И. К</i> разработке лабораторной модели двухуровневой распределенной системы	77
<i>Укуев Б.Т., Назаров Б.Б.</i> Обзор и анализ моделей управления интеллектуальными активно-адаптивными системами	87

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

<i>Верзунов С.Н.</i> Способ измерения параметров катушек индуктивности магнитометров и его реализация на основе платы сбора данных л кард е 502	94
<i>Верзунов С. Н., Токсаитов Д. А.</i> Разработка системы сбора и визуализации данных для цифрового трёхкомпонентного индукционного магнитометра.....	103
<i>Гайдамако В.</i> Инфраструктура sensor-cloud – облачные информационно-измерительные системы.....	109

СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ И ДИАГНОСТИКА

<i>Брякин И.В., Бочкарев И.В. Храмин В.Р.</i> Способ определения дефектов электропроводящих элементов кабеля.....	119
<i>Багиев Г.Х., Брякин И.В., Бочкарев И.В.</i> Особенности современных методов контроля силовых кабельных линий.....	132
<i>Турдумаматов С. Т.</i> Метаматериалы и частотно- избирательные поверхности.....	145
<i>Евдокимов С.А., Храмин В.Р., Гасияров В.Р., Логинов Б.М.</i> Контроль упругого момента в валопроводах клетки толстолистового прокатного стана	157

ОПТИМИЗАЦИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 519.3:62–50

Т.П. Самохвалова, sam_tp@mail.ru

Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР

ВАРИАНТЫ РЕШЕНИЙ УРАВНЕНИЯ БЕЛЛМАНА В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫМИ ПРОЦЕССАМИ

Построены алгоритмы оптимального синтезирующего управления для линейных и квазилинейных систем с распределенными и сосредоточенными параметрами. Алгоритмы основаны на методе динамического программирования Р. Беллмана, методике А.И. Егорова, методе характеристик.

Ключевые слова: оптимальное управление; обратная связь; динамическое программирование; метод характеристик.

Введение. Рассматривается решение ряда линейных задач синтеза оптимального управления процессами нагрева, описываемыми уравнениями в частных производных. Проведена их классификация по предложенным более простым квадратичным формам, разрешающим уравнение Беллмана, и соответствующим минимизируемым квадратичным функционалам. Приведено обобщение квадратичных форм для соответствующих квазилинейных задач.

Предложена еще одна форма приближенного решения уравнения Беллмана для процессов, описываемых уравнениями в обыкновенных производных, основанная на методе характеристик и дополнительного аргумента. Используются работы [1–5]. Полученные результаты обобщены и применены для задач управления высокотемпературным нагревом [6–11].

Рассматриваются три типа управлений:

- 1). $p(t)$ по границе, 2). $p(t, x)$ в уравнении, 3). $p(t)$ в уравнении модели.

1. Постановка задачи

Уравнение управляемого процесса будем записывать в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_1(x) \frac{\partial u}{\partial x} + a_2 u + a_3 u^2 + q(x)p(t, x) + q_1(x)p(t, x)u(t, x) + f(t, x) \quad (1)$$

с начальным и краевыми условиями третьего рода

$$u(0, x) = u_0(x), \quad (2)$$

$$\alpha_1 \frac{\partial u(t, 0)}{\partial x} + \alpha_2 u(t, 0) = \alpha_3 u_1(t), \quad (3)$$

$$\alpha_4 \frac{\partial u(t, 1)}{\partial x} + \alpha_2 u(t, 1) = \alpha_6 p(t) + \alpha_7 p(t)u(t, 1) + \alpha_8 u_2(t).$$

Обозначим J, J_1, J_2 квадратичные функционалы вида

$$J = \gamma_1 \int_0^T \int_0^1 u(t, x) - g(t, x)^2 dx dt + \gamma_2 \int_0^1 u(T, x) - \psi(x)^2 dx + \beta \int_0^T \int_0^1 p^2(t, x) dx dt,$$

$$J_1 = \gamma_1 \int_0^T \int_0^1 u(t, x) - g(t, x)^2 dx dt + \beta \int_0^T \int_0^1 p^2(t, x) dx dt,$$

$$J_2 = \gamma_2 \int_0^1 u(T, x) - \psi(x)^2 dx + \beta \int_0^T \int_0^1 p^2(t, x) dx dt. \quad (4)$$

Задача. Найти синтезирующее управление $p(t, x) \equiv p(t, x, u)$ (или $p(t) \equiv p(t, u)$) и решение $u(t, x)$ краевой задачи (1)–(3), минимизирующие функционал J (4) (или J_1, J_2 из (4)).

Эта задача синтеза оптимального управления решается методом динамического программирования, развитым для математических моделей в частных производных в [1] (системы с распределенными параметрами). Для вывода уравнения Беллмана используется метод [1], в котором $u(t, x)$ – обобщенное решение краевой задачи (1)–(3), $v(t, x)$ – функция, определяющая производную Фреше функционала $S(t, u)$, в соответствующих функциональных пространствах $W_2^{n,m}$. В уравнении (1) и функционалах J, J_1, J_2 будем брать управление $p(t)$ или $p(t, x)$ в зависимости от типов 1), 2), 3).

2. Линейные задачи синтеза

Пусть $a_3 = 0, q(x) = 0, \alpha_7 = 0$. Обозначим S, S_1, S_2 квадратичные формы вида

$$\begin{aligned} S(t, u) &= \int_0^1 k(t, x) u^2(t, x) dx + \int_0^1 \int_0^1 K(t, x, s) u(t, x) u(t, s) dx ds + \\ &\quad + \int_0^T \varphi(t, x) u(t, x) dx + \eta(t), \\ S_1(t, u) &= \int_0^1 k(t, x) u^2(t, x) dx + \int_0^1 \varphi(t, x) u(t, x) dx + \eta(t), \\ S_2(t, u) &= \int_0^1 \int_0^1 K(t, x, s) u(t, x) u(t, s) dx ds + \int_0^1 \varphi(t, x) u(t, x) dx + \eta(t). \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь

$$v(t, x) = 2k(t, x) + \int_0^1 \tilde{K}_2(t, x, s) u(t, s) ds + \varphi(t, x); \quad \tilde{K}_2(t, x, s) = K(t, x, s) + K(t, s, x). \quad (6)$$

В конечный момент времени $t = T$ для функционала $S(t, u)$ имеем условие

$$S(T, u) = \gamma_2 \int_0^1 [u(T, x) - \psi(x)] dx. \quad (7)$$

В работе [1] в линейных задачах для J_2 использовалась квадратичная форма

$$\begin{aligned} z_2 &= \int_0^1 \int_0^1 K(t, x, s) u(t, x) - \psi(x) \times u(t, s) - \psi(s) dx ds + \\ &\quad + \int_0^1 \varphi(t, x) u(t, x) - \psi(x) dx + \eta(t) \end{aligned}$$

с условиями $K(T, x, s) = \gamma_2 \delta(x - s), \varphi(T, x) = 0, \eta(T) = 0$. При $\psi \equiv 0$ S_2 и z_2 совпадают.

В работе [5] решение уравнения Беллмана для линейной задачи (1)–(4) предлагается искать в виде квадратичных форм (5) с четырьмя вспомогательными функциями $k(t, x), K(t, x, s), \varphi(t, x), \eta(t)$. В тех вариантах, где $K(t, x, s) \equiv 0$ или $k(t, x) \equiv 0$, из S следует S_1 или S_2 из (5). Предлагается функцию $\psi(x)$ вынести в

конечные условия и на основании (7) рассматривать две эквивалентные группы конечных условий для вспомогательных функций $k(t, x)$, $K(t, x, s)$, $\varphi(t, x)$, $\eta(t)$, с дельта-функцией и без нее:

$$1) k(T, x) = 0, K(T, x, s) = \gamma_2 \delta(x-s), \varphi(T, x) = -2\gamma_2 \psi(x), \eta(T) = \gamma_2 \int_0^1 \psi^2(x) dx, \quad (8)$$

$$2) k(T, x) = \gamma_2, K(T, x, s) = 0, \varphi(T, x) = -2\gamma_2 \psi(x), \eta(T) = \gamma_2 \int_0^1 \psi^2(x) dx. \quad (9)$$

Тип управления 1). $\alpha_6 p$ в граничном условии.

Линейное уравнение (1) управляемого процесса возьмем в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_2 u + f(t, x), \quad (10)$$

с начальным условием $u(0, x) = u_0(x)$ и краевыми условиями третьего рода

$$\alpha_1 \frac{\partial u(t, 0)}{\partial x} = 0, \quad \alpha_4 \frac{\partial u(t, 1)}{\partial x} + \alpha_5 u(t, 1) = \alpha_6 p(t).$$

Минимизируемый функционал J из (4) при управлении $p(t)$ имеет вид

$$J = \gamma_1 \int_0^T \int_0^1 [u(t, x) - g(t, x)]^2 dx dt + \gamma_2 \int_0^1 [u(T, x) - \psi(x)]^2 dx + \beta \int_0^T p^2(t) dt \quad (11)$$

и соответствующие J_1, J_2 .

Уравнение Беллмана, полученное по методу [1], имеет вид

$$\begin{aligned} -\frac{\partial S(t, u)}{\partial t} = & \gamma_1 \int_0^1 u^2(t, x) dx - 2\gamma_1 \int_0^1 g(t, x) u(t, x) dx + \gamma_1 \int_0^1 g^2(t, x) dx + \\ & + a u(t, 0) \frac{\partial v(t, 0)}{\partial x} - a u(t, 1) \frac{\partial v(t, 1)}{\partial x} - \frac{a \alpha_5}{\alpha_4} u(t, 1) v(t, 1) + \\ & + a \int_0^1 u(t, x) \frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial x^2} dx - \frac{a^2 \alpha_6^2}{4 \alpha_4^2 \beta} v^2(t, 1) + \int_0^1 a_2 u v dx + \int_0^1 f v dx. \end{aligned}$$

Оптимальное синтезирующее управление имеет вид

$$p^0(t, u) = -\frac{a \alpha_6}{2 \alpha_4 \beta} v(t, 1),$$

где $v(t, x)$ определяется по (6).

Запишем уравнения и краевые условия для вспомогательных функций k, K, φ, η :

$$\begin{aligned} -\frac{d\eta(t)}{dt} = & \gamma_1 \int_0^1 g^2(t, x) dx + \int_0^1 f(t, x) \varphi(t, x) dx - \frac{a^2 \alpha_6^2}{4 \alpha_4^2 \beta} \varphi^2(t, 1); \\ -\frac{\partial \varphi(t, x)}{\partial t} = & a \frac{\partial^2 \varphi(t, x)}{\partial x^2} + a_2 \varphi(t, x) + \int_0^1 \tilde{K}_2(t, x, s) f(t, s) ds - \\ & - \frac{a^2 \alpha_6^2}{2 \alpha_4^2 \beta} \varphi(t, 1) \tilde{K}_2(t, 1, x) + 2 k(t, x) f(t, x) - 2 \gamma_1 g(t, x), \\ a \frac{\partial \varphi(t, 0)}{\partial x} = & 0, \quad -a \frac{\partial \varphi(t, 1)}{\partial x} - \frac{a^2 \alpha_6^2}{\alpha_4^2 \beta} k(t, 1) \varphi(t, 1) - \frac{a \alpha_5}{\alpha_4} \varphi(t, 1) = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial k(t,x)}{\partial t} &= 2a \frac{\partial^2 k(t,x)}{\partial x^2} + 2a_2 k(t,x) + \gamma_1, \\
 \frac{\partial k(t,0)}{\partial x} &= 0, \quad -2a \frac{\partial k(t,1)}{\partial x} - \frac{a^2 \alpha_6^2}{\alpha_4^2 \beta} k^2(t,1) - 2 \frac{a \alpha_5}{\alpha_4} k(t,1) = 0; \\
 -\frac{\partial K(t,x,s)}{\partial t} &= a \frac{\partial^2 \tilde{K}_2(t,x,s)}{\partial x^2} + a_2 \tilde{K}_2(t,x,s) - \frac{a^2 \alpha_6^2}{\alpha_4^2 \beta} \tilde{K}_2(t,1,x) \tilde{K}_2(t,1,s), \\
 a \frac{\partial \tilde{K}_2(t,0,s)}{\partial x} &= 0, \quad -a \frac{\partial \tilde{K}_2(t,1,s)}{\partial x} - \frac{a \alpha_5}{\alpha_4} \tilde{K}_2(t,1,s) - \\
 &\quad - \frac{a^2 \alpha_6^2}{\alpha_4^2 \beta} k(t,1) \tilde{K}_2(t,1,s) = 0.
 \end{aligned} \tag{12}$$

Тип управления 2). $q(x)p(t,x)$ в уравнении.

Линейное уравнение (1) управляемого процесса возьмем в виде

$$\frac{\partial u(t,x)}{\partial t} = a_2 u + q(x)p(t,x) + f(t,x), \tag{13}$$

с начальным условием $u(0,x) = u_0(x)$, с функционалом (4).

Уравнение Беллмана, полученное по методу [1], имеет вид

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial S(t,u)}{\partial t} &= \gamma_1 \int_0^1 u^2(t,x) dx - 2\gamma_1 \int_0^1 u(t,x)g(t,x) dx + \gamma_1 \int_0^1 g^2(t,x) dx + \\
 &+ \int_0^1 a_2 u(t,x)v(t,x) dx - \frac{1}{4\beta} \int_0^1 q^2(x)u^2(t,x) dx + \int_0^1 f(t,x)v(t,x) dx.
 \end{aligned}$$

Оптимальное синтезирующее управление имеет вид

$$p^0(t,x,u) = -\frac{q(x)}{2\beta} v(t,x).$$

Запишем уравнения для вспомогательных функций k, K, φ, η :

$$\begin{aligned}
 -\frac{d\eta(t)}{dt} &= -\frac{1}{4\beta} \int_0^1 q^2(x)p^2(t,x) dx + \int_0^1 \varphi(t,x)f(t,x) dx + \gamma_1 \int_0^1 g^2(t,x) dx; \\
 -\frac{\partial \varphi(t,x)}{\partial t} &= a_2 \varphi(t,x) - \frac{1}{\beta} q^2(x)k(t,x)\varphi(t,x) + 2k(t,x)f(t,x) - \\
 &- \frac{1}{2\beta} \int_0^1 q^2(s)\varphi(t,s)\tilde{K}_2(t,s,x) ds + \int_0^1 \tilde{K}_2(t,s,x)f(t,s) ds - 2\gamma_1 g(t,x); \\
 -\frac{\partial k(t,x)}{\partial t} &= 2a_2 k(t,x) + \gamma_1 - \frac{1}{\beta} q^2(x)k^2(t,x); \\
 -\frac{\partial K(t,x,s)}{\partial t} &= a_2 \tilde{K}_2(t,x,s) - \frac{1}{4\beta} \int_0^1 q^2(\zeta)\tilde{K}_2(t,\zeta,x)\tilde{K}_2(t,\zeta,s) d\zeta - \\
 &- \frac{1}{\beta} q^2(x)k(t,x)\tilde{K}_2(t,x,s).
 \end{aligned} \tag{14}$$

Тип управления 3). $q(x)p(t)$ в уравнении.

Линейное уравнение (1) управляемого процесса возьмем в виде

$$\frac{\partial u(t,x)}{\partial t} = a_2 u + q(x)p(t) + f(t,x) \tag{15}$$

с начальным условием $u(0, x) = u_0(x)$, с функционалом (11).

Уравнение Беллмана имеет вид

$$-\frac{\partial S(t, u)}{\partial t} = \gamma_1 \int_0^1 u^2(t, x) dx - 2\gamma_1 \int_0^1 g(t, x) u(t, x) dx + \gamma_1 \int_0^1 g^2(t, x) dx + \\ + \int_0^1 a_2 u(t, x) v(t, x) dx - \frac{1}{4\beta} \int_0^1 \int_0^1 q(x) q(s) v(t, x) v(t, s) dx ds + \int_0^1 f v dx.$$

Оптимальное синтезирующее управление имеет вид

$$p^0(t, u) = -\frac{1}{2\beta} \int_0^1 q(x) v(t, x) dx.$$

Запишем уравнения для вспомогательных функций k, K, φ, η :

$$-\frac{d\eta(t)}{dt} = -\frac{1}{4\beta} \int_0^1 \int_0^1 q(x) q(s) \varphi(t, x) \varphi(t, s) dx ds + \int_0^1 \varphi f dx + \gamma_1 \int_0^1 g^2 dx; \\ -\frac{\partial \varphi(t, x)}{\partial t} = a_2 \varphi(t, x) - \frac{1}{\beta} \int_0^1 q(x) q(s) k(t, x) \varphi(t, s) ds - \frac{1}{2\beta} \int_0^1 \int_0^1 q(\zeta) q(s) \times \\ \times \varphi(t, s) \tilde{K}_2(t, \zeta, x) d\zeta ds + 2k(t, x) f(t, x) + \int_0^1 f(t, \zeta) \tilde{K}_2(t, \zeta, x) d\zeta - 2\gamma_1 g(t, x); \\ -\frac{\partial k(t, x)}{\partial t} = 2a_2 k(t, x) + \gamma_1; \\ -\frac{\partial K(t, x, s)}{\partial t} = a_2 \tilde{K}_2(t, x, s) - \frac{1}{\beta} k(t, x) k(t, s) q(x) q(s) - \frac{1}{2\beta} \int_0^1 q(x) q(\zeta) \times \\ \times k(t, x) \tilde{K}_2(t, \zeta, s) d\zeta - \frac{1}{2\beta} \int_0^1 q(\zeta) q(s) k(t, s) \tilde{K}_2(t, \zeta, x) d\zeta - \\ - \frac{1}{4\beta} \int_0^1 \int_0^1 q(\zeta) q(\tau) \tilde{K}_2(t, \zeta, x) \tilde{K}_2(t, \tau, s) d\zeta d\tau. \quad (16)$$

На основании вспомогательных систем (12), (14), (16) и двух групп конечных условий (8) и (9) для k, K, φ, η можем записать следующие варианты решений уравнения Беллмана (см. табл. 1).

3. Квазилинейные задачи синтеза

Рассмотрим задачи синтеза с тремя типами управлений-сомножителей 1), 2), 3) в квазилинейных задачах. Обозначим $\bar{S}_1(t, u)$ ряд, обобщающий квадратичную форму S_1 из (5):

$$\bar{S}_1(t, u) = \sum_{i=1}^{\infty} \int_0^1 k_i(t, x) u^i(t, x) dx + k_0(t). \quad (17)$$

Соответствующая функция $v(t, x)$ определяется по формуле

$$v(t, x) = \sum_{i=1}^{\infty} i k_i(t, x) u^{i-1}(t, x). \quad (18)$$

В конечный момент времени $t = T$ для $\bar{S}_1$ выполняется условие (7). Для функций $k_i(t, x)$ возьмем одну группу условий, аналогичную условиям (9):

$$k_0(T) = \gamma_2 \int_0^1 \psi^2(x) dx, k_1(T, x) = -2\gamma_2 \psi(x), k_2(T, x) = \gamma_2, k_i(T, x) \equiv 0, i \geq 3. \quad (19)$$

Таблица 1 – Варианты решений уравнения Беллмана
в линейных задачах синтеза

Варианты условий	Решение уравнения Беллмана
<i>Тип управления 1). $\alpha_6 p(t)$ в граничном условии.</i> 1) $k(T, x) = 0, K(T, x, s) = \gamma_2 \delta(x - s), \varphi(T, x) = -2\gamma_2 \psi(x).$ 1a) Если $\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 \neq 0$, то $k(t, x) \neq 0, K(t, x, s) \neq 0$, 1b) Если $\gamma_1 = 0, \gamma_2 \neq 0$, то $k(t, x) \equiv 0, K(t, x, s) \neq 0$. 2) $k(T, x) = \gamma_2, K(T, x, s) = 0.$ 2a) Если $\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 \neq 0$, то $k(t, x) \neq 0, K(t, x, s) \equiv 0$, 2b) Если $\gamma_1 = 0, \gamma_2 \neq 0$, то $k(t, x) \neq 0, K(t, x, s) \equiv 0$, 2c) Если $\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 = 0$, то $k(t, x) \neq 0, K(t, x, s) \equiv 0$.	Кв. форма S для J S_2 для J_2 S для $J \Rightarrow$ S_1 для J S_1 для J_2 S_1 для J_1
<i>Тип управления 2). $q(x)p(t, x)$ в уравнении.</i> 1) $k(T, x) = 0, K(T, x, s) = \gamma_2 \delta(x - s), \varphi(T, x) = -2\gamma_2 \psi(x).$ 1a) Если $\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 \neq 0$, то $k(t, x) \neq 0, K(t, x, s) \neq 0$, 1b) Если $\gamma_1 = 0, \gamma_2 \neq 0$, то $k(t, x) \equiv 0, K(t, x, s) \neq 0$. 2) $k(T, x) = \gamma_2, K(T, x, s) = 0.$ 2a) Если $\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 \neq 0$, то $k(t, x) \neq 0, K(t, x, s) \equiv 0$, 2b) Если $\gamma_1 = 0, \gamma_2 \neq 0$, то $k(t, x) \neq 0, K(t, x, s) \equiv 0$, 2c) Если $\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 = 0$, то $k(t, x) \neq 0, K(t, x, s) \equiv 0$.	Кв. форма S для J S_2 для J_2 S для J S_1 для J S_1 для J_2 S_1 для J_1
<i>Тип управления 3). $q(x)p(t)$ в уравнении.</i> 1) $k(T, x) = 0, K(T, x, s) = \gamma_2 \delta(x - s), \varphi(T, x) = -2\gamma_2 \psi(x).$ 1a) Если $\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 \neq 0$, то $k(t, x) \neq 0, K(t, x, s) \neq 0$, 1b) Если $\gamma_1 = 0, \gamma_2 \neq 0$, то $k(t, x) \equiv 0, K(t, x, s) \neq 0$. 2) $k(T, x) = \gamma_2, K(T, x, s) = 0.$ 2a) Если $\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 \neq 0$, то $k(t, x) \neq 0, K(t, x, s) \neq 0$, 2b) Если $\gamma_1 = 0, \gamma_2 \neq 0$, то $k(t, x) \neq 0, K(t, x, s) \neq 0$, 2c) Если $\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 = 0$, то $k(t, x) \neq 0, K(t, x, s) \neq 0$.	Кв. форма S для J S_2 для J_2 S для J S для J_2 S для J_1

Тип управления 1). $\alpha_6 p(t) + \alpha_7 p(t)u(t,1)$ в граничном условии.

Уравнение (1) управляемого процесса возьмем в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_2 u + a_3 u^2 + f(t, x) \quad (20)$$

с начальным условием $u(0, x) = u_0(x)$ и краевыми условиями 3-го рода

$$\alpha_1 \frac{\partial u(t, 0)}{\partial x} = 0, \alpha_4 \frac{\partial u(t, 1)}{\partial x} + \alpha_5 u(t, 1) = \alpha_6 p(t) + \alpha_7 p(t)u(t, 1),$$

где может быть $\alpha_7 = 0$ при $a_3 \neq 0$, с минимизируемым функционалом J , определяемым по (11), и соответствующими J_1, J_2 :

$$J_1 = \gamma_1 \int_0^T \int_0^1 [u(t, x) - g(t, x)]^2 dx dt + \beta \int_0^T p^2(t) dt,$$

$$J_2 = \gamma_2 \int_0^1 [u(T, x) - \psi(x)]^2 dx + \beta \int_0^T p^2(t) dt.$$

В этом случае уравнение Беллмана имеет вид

$$\begin{aligned} -\frac{\partial S(t, u)}{\partial t} = & \gamma_1 \int_0^1 u^2(t, x) dx - 2\gamma_1 \int_0^1 u(t, x)g(t, x) dx + \gamma_1 \int_0^1 g^2(t, x) dx - \\ & - \rho_1 v^2(t, 1) - \rho_2 u(t, 1)v^2(t, 1) - \rho_3 u^2(t, 1)v^2(t, 1) - au(t, 1) \frac{\partial v(t, 1)}{\partial x} + \\ & + au(t, 0) \frac{\partial v(t, 0)}{\partial x} - \frac{a\alpha_5}{\alpha_4} u(t, 1)v(t, 1) + a \int_0^1 u(t, x) \frac{\partial^2 v(t, x)}{\partial x^2} dx + \\ & + \int_0^1 a_2 uv dx + \int_0^1 a_3 u^2 v dx + \int_0^1 f(t, x)v(t, x) dx, \end{aligned}$$

$$\text{где } \rho_1 = \frac{a^2 \alpha_6^2}{4\alpha_4^2 \beta}, \rho_2 = \frac{a^2 \alpha_6 \alpha_7}{2\alpha_4^2 \beta}, \rho_3 = \frac{a^2 \alpha_7^2}{4\alpha_4^2 \beta}.$$

Оптимальное синтезирующее управление имеет вид

$$p^0(t, u) = -\frac{a\alpha_6 + a\alpha_7 u(t, 1)}{2\alpha_4 \beta} v(t, 1),$$

где $v(t, x)$ определяется по (18).

В работе [5] решение уравнения Беллмана в квазилинейной задаче синтеза предлагается искать в виде ряда (17) с конечными условиями (19). Запишем уравнения и краевые условия для нескольких первых вспомогательных функций:

$$\begin{aligned} -\frac{dk_0(t)}{dt} = & \gamma_1 \int_0^1 g^2(t, x) dx - \rho_1 k_1^2(t, 1) + \int_0^1 f(t, x)k_1(t, x) dx; \\ -\frac{\partial k_1(t, x)}{\partial t} = & -2\gamma_1 g(t, x) + a \frac{\partial k_1^2(t, x)}{\partial x^2} + a_2 k_1(t, x) + 2f(t, x)k_2(t, x), \\ a \frac{\partial k_1(t, 0)}{\partial x} = & 0, -a \frac{\partial k_1(t, 1)}{\partial x} - 4\rho_1 k_1(t, 1)k_2(t, 1) - \\ & - \rho_2 k_1^2(t, 1) - \frac{a\alpha_5}{\alpha_4} k_1(t, 1) = 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial k_2(t,x)}{\partial t} &= \gamma_1 + 2a \frac{\partial^2 k_2(t,x)}{\partial x^2} + 2a_2 k_2(t,x) + a_3 k_1(t,x) + 3 f(t,x) k_3(t,x), \\
 a \frac{\partial k_2(t,0)}{\partial x} &= 0, \quad -2a \frac{\partial k_2(t,1)}{\partial x} - \rho_1 \quad 6 k_1(t,1) k_3(t,1) + 4 k_2^2(t,1) - \\
 -4 \rho_2 k_1(t,1) k_2(t,1) - \rho_3 k_1^2(t,1) - 2 \frac{a \alpha_5}{\alpha_4} k_2(t,1) &= 0, \dots
 \end{aligned} \tag{21}$$

Тип управления 2). $q(x)p(t,x) + q_1(x)p(t,x)u(t,x)$ в уравнении.

Уравнение (1) управляемого процесса возьмем в виде:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a_2 u + a_3 u^2 + q(x)p(t,x) + q_1(x)p(t,x)u(t,x) + f(t,x), \tag{22}$$

где может быть $q_1(x) = 0$ при $a_3 \neq 0$, с начальным условием $u(0,x) = u_0(x)$, с функционалами (4).

Уравнение Беллмана имеет вид

$$\begin{aligned}
 -\frac{\partial S(t,u)}{\partial t} &= \gamma_1 \int_0^1 u^2(t,x) dx - 2\gamma_1 \int_0^1 u(t,x)g(t,x) dx + \gamma_1 \int_0^1 g^2(t,x) dx + \\
 + \int_0^1 a_2 uv dx + \int_0^1 a_3 u^2 v dx - \frac{1}{4\beta} \int_0^1 q^2(x) v^2(t,x) dx - \frac{1}{2\beta} \int_0^1 q(x) q_1(x) \times \\
 \times u(t,x) v^2(t,x) dx - \frac{1}{4\beta} \int_0^1 q_1^2(x) u^2(t,x) v^2(t,x) dx + \int_0^1 f(t,x) v(t,x) dx.
 \end{aligned}$$

Оптимальное синтезирующее управление имеет вид

$$p^0(t,x,u) = -\frac{q(x) + q_1(x)u(t,x)}{2\beta} v(t,x).$$

Решение уравнения Беллмана в квазилинейной задаче синтеза предлагается искать в виде ряда (17) с конечными условиями (19). Запишем уравнения для нескольких первых вспомогательных функций:

$$\begin{aligned}
 -\frac{dk_0(t)}{dt} &= \gamma_1 \int_0^1 g^2(t,x) dx + \int_0^1 f(t,x) k_1(t,x) dx - \frac{1}{4\beta} \int_0^1 q^2(x) k_1^2(t,x) dx; \\
 -\frac{\partial k_1(t,x)}{\partial t} &= a_2 k_1(t,x) - 2\gamma_1 g(t,x) + 2 f(t,x) k_2(t,x) - \\
 &\quad - \frac{1}{\beta} q^2(x) k_1(t,x) k_2(t,x) - \frac{1}{2\beta} q(x) q_1(x) k_1^2(t,x); \\
 -\frac{\partial k_2(t,x)}{\partial t} &= 2a_2 k_2(t,x) + a_3 k_1(t,x) + \gamma_1 - \frac{1}{4\beta} q_1^2(x) k_1^2(t,x) + \\
 + 3 f(t,x) k_3(t,x) - \frac{1}{4\beta} q^2(x) [4 k_2^2(t,x) + 6 k_1(t,x) k_3(t,x)] - \\
 - \frac{2}{\beta} q(x) q_1(x) k_1(t,x) k_2(t,x), \dots
 \end{aligned} \tag{23}$$

Тип управления 3). $q(x)p(t) + q_1(x)p(t)u(t,x)$ в уравнении.

Обозначим $\bar{S}_2(t,u)$ ряд, обобщающий квадратичную форму S_2 из (5):

$$\bar{S}_2(t,u) = \sum_{i=1}^{\infty} \underbrace{\int_0^1 \dots \int_0^1}_{i \text{ раз}} K_i(t, x_1, \dots, x_i) \prod_{r=1}^i u(t, x_r) dx_r + K_0(t).$$

Соответствующая функция $v(t, x)$ определяется по формуле

$$v(t, x) = \sum_{i=1}^{\infty} \underbrace{\int_0^1 \dots \int_0^1}_{i-1 \text{ раз}} \tilde{K}_i(t, x, x_1, \dots, x_i) \prod_{r=1}^{i-1} u(t, x_r) dx_r \quad (24)$$

где $\tilde{K}_1(t, x) = K_1(t, x)$, $\tilde{K}_2(t, x, s)$ определено в (6),

$$\tilde{K}_3(t, x, x_1, x_2) = K_3(t, x, x_1, x_2) + K_3(t, x_1, x, x_2) + K_3(t, x_1, x_2, x), \dots$$

При $t = T$ для $\tilde{S}_2(T, u)$ выполняется условие (7). Для функций $K_i(t, x_1, \dots, x_i)$ возьмем одну группу условий, аналогичную (8):

$$K_0(T) = \gamma_2 \int_0^1 \psi^2(x) dx, K_1(T, x) = -2\gamma_2 \psi(x), K_2(T, x, s) = \gamma_2 \delta(x-s), \quad (25)$$

$$K_i(T, x_1, \dots, x_i) = 0, i \geq 3.$$

Уравнение (1) управляемого процесса возьмём в виде

$$\frac{\partial u}{\partial t} = a_2 u + q(x)p(t) + q_1(x)p(t)u(t, x) + f(t, x), \quad (26)$$

где $a_3 = 0$, с начальным условием $u_0(0, x) = u_0(x)$, с функционалом J_2 , определяемым по (11). Уравнение Беллмана имеет вид

$$\begin{aligned} -\frac{\partial S(t, u)}{\partial t} = & \int_0^1 a_2 u(t, x) v(t, x) dx + \int_0^1 f(t, x) v(t, x) dx - \frac{1}{4\beta} \int_0^1 \int_0^1 q(x) q(s) \times \\ & \times v(t, x) v(t, s) dx ds - \frac{1}{2\beta} \int_0^1 \int_0^1 q(x) q_1(s) u(t, x) v(t, x) v(t, s) dx ds - \\ & - \frac{1}{4\beta} \int_0^1 \int_0^1 q_1(x) q_1(s) u(t, x) u(t, s) v(t, x) v(t, s) dx ds. \end{aligned}$$

Оптимальное синтезирующее управление имеет вид

$$p^0(t, u) = -\frac{1}{2\beta} \int_0^1 q(x) + q_1(x) u(t, x) v(t, x) dx,$$

где $v(t, x)$ определяется по (24).

Решение уравнения Беллмана в квазилинейной задаче синтеза с функционалом J_2 , определяемым по (11), предлагается искать в виде (17) с конечными условиями (25). Запишем уравнения для нескольких первых вспомогательных функций при $q(x) \equiv 0$:

$$\begin{aligned} -\frac{dK_0(t)}{dt} = & \int_0^1 f(t, x) K_1(t, x) dx; \quad -\frac{\partial K_1(t, x)}{\partial t} = a_2 K_2(t, x) + \int_0^1 f(t, s) \tilde{K}_2(t, x, s) ds; \\ -\frac{\partial K_2(t, x, s)}{\partial t} = & a_2 \tilde{K}_2(t, x, s) + \int_0^1 f(t, \zeta) \tilde{K}_3(t, x, s, \zeta) d\zeta + \\ & + q_1(x) q_1(s) K_1(t, x) K_1(t, s); \\ -\frac{\partial K_3(t, x, s)}{\partial t} = & a_2 \tilde{K}_3(t, x, s, \zeta) + \int_0^1 f(t, x_4) \tilde{K}_4(t, x, s, \zeta, x_4) dx_4 + \\ & + 2q_1(x) q_1(\zeta) \tilde{K}_2(t, x, s) K_1(t, \zeta), \dots \end{aligned} \quad (27)$$

Для квазилинейных задач синтеза (17)–(27) можно составить таблицу 2, аналогичную таблице 1.

Таблица 2 – Варианты решений уравнения Беллмана
в квазилинейных задачах синтеза.

Варианты условий	Решение уравнения Беллмана
<i>Тип управления 1).</i> $\alpha_6 p(t) + \alpha_7 p(t) u(t, 1)$ в граничном условии. 2) $k_0(T) = \gamma_2 \int_0^1 \psi^2(x) dx$, $k_1(T, x) = -2\gamma_2 \psi(x)$, $k_2(T, x) = \gamma_2$, $k_i(T, x) = 0, i \geq 3$. 2a) $\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 \neq 0$, 2b) $\gamma_1 = 0, \gamma_2 \neq 0$, 2c) $\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 = 0$.	Ряд $\bar{S}_1$ для J $\bar{S}_1$ для J_2 $\bar{S}_1$ для J_1
<i>Тип управления 2).</i> $q(x)p(t, x) + q_1(x)p(t, x)u(t, x)$ в уравнении. 2) $k_0(T) = \gamma_2 \int_0^1 \psi^2(x) dx$, $k_1(T, x) = -2\gamma_2 \psi(x)$, $k_2(T, x) = \gamma_2$, $k_i(T, x) = 0, i \geq 3$. 2a) $\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 \neq 0$, 2b) $\gamma_1 = 0, \gamma_2 \neq 0$, 2c) $\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 = 0$.	Ряд $\bar{S}_1$ для J $\bar{S}_1$ для J_2 $\bar{S}_1$ для J_1
<i>Тип управления 3).</i> $q(x)p(t) + q_1(x)p(t)u(t, x)$ в уравнении. 1) $K_0(T) = \gamma_2 \int_0^1 \psi^2(x) dx$, $K_1(T, x) = -2\gamma_2 \psi(x)$, $K_2(T, x, s) = \gamma_2 \delta(x - s)$, $K_i(T, x_1, \dots, x_i) = 0, i \geq 3$. 1b) $\gamma_1 = 0, \gamma_2 \neq 0$.	Ряд $\bar{S}_2$ для J_2

4. Метод характеристик

В данной работе предложена еще одна форма решения уравнения Беллмана для процессов, описываемых одномерными уравнениями в обыкновенных производных (системы с сосредоточенными параметрами). Решение линеаризованного уравнения Беллмана с расширенным начальным условием получено на основании метода характеристик и дополнительного аргумента [4]. Объединение методов динамического программирования и характеристик привело к новому приближенному решению уравнения Беллмана и соответствующему алгоритму управления с обратной связью [7, 8]. Полученный алгоритм был применен в расчетах в задачах высокотемпературного нагрева с целью уменьшения или устранения резких скачков величины управления [9–11].

Рассмотрим модель нагрева в обыкновенных производных

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bp(t) - \gamma \sigma x^4(t), \quad x(0) = x_0, \quad t \in [0; t_k]. \quad (28)$$

В численных расчетах для удовлетворительного достижения заданного желаемого состояния $g(t)$ объекта используем минимизацию квадратичного критерия качества

$$J_k = \gamma_1 \int_0^{t_k} (x(t) - g)^T Q (x(t) - g) dt + \gamma_2 (x(t_k) - g)^T F (x(t_k) - g) + \beta \int_0^{t_k} p^2(t) dt. \quad (29)$$

Запишем линеаризованное уравнение Беллмана для (28), (29) при $n=1$, $A < 0$:

$$\frac{\partial S(t, x)}{\partial t} - Ax \frac{\partial S(t, x)}{\partial x} = \left(\gamma_1 Q - \frac{B^2}{\beta} \gamma_2^2 F^2 \right) (x - g)^2, \quad S(0, x) = \gamma_2 F (x - g)^2. \quad (30)$$

Приближенное стабилизирующее управление $p(x(t))$, полученное из (30) по методу характеристик [4], имеет вид [7, 8]

$$p(x(t)) = -\frac{b}{2A\beta} Mx(t) + \frac{Bg(t)}{A\beta} M, \quad M = \gamma_1 Q - \frac{B^2}{\beta} \gamma_2^2 F^2. \quad (31)$$

Графики управления (31) и температуры (28) приведены на рис. 1, 2 [9–11].

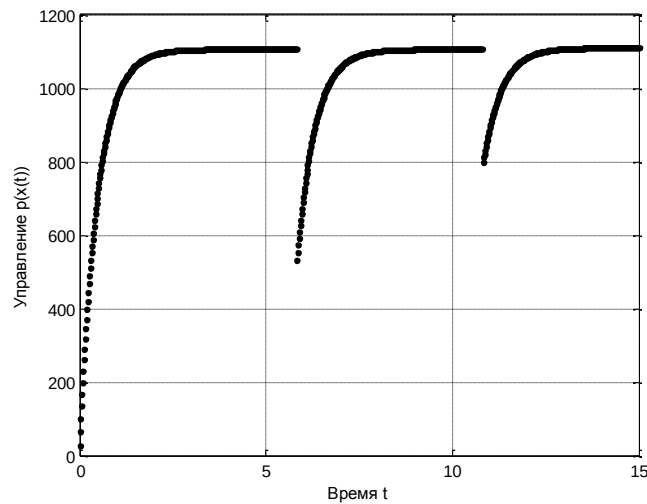


Рисунок 1 – Управление (3.4) $p(t)$

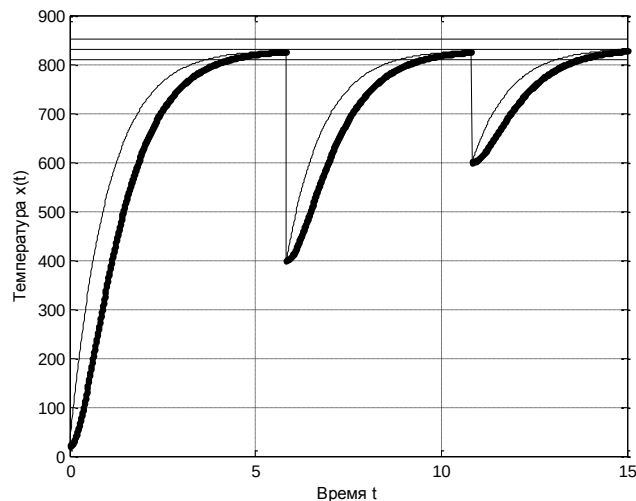


Рисунок 2 – Температура (3.1) $x(t)$ при периодическом измерении

5. Заключение

Для задач оптимального управления процессами нагрева с моделями в частных производных с тремя типами управлений ($p(t)$, $p(t, x)$) в уравнении модели объекта,

$p(t)$ в граничном условии) с полиномиальными нелинейностями предложены несколько видов минимизируемых критериев качества. Модифицирована форма решения уравнения Беллмана [5]. В решениях бесконечных систем Риккати выявлено и обосновано наличие интервалов стационарности, эти стационарные величины являются приближениями к горизонтальным асимптотам решений, позволяют построить приближенные стабилизирующие алгоритмы управлений с обратной связью [6].

Для задач оптимального управления с одномерными моделями в обыкновенных производных разработан способ приближенного решения уравнения Беллмана с расширенным начальным условием, основанный на методе характеристик и дополнительного аргумента [4, 7, 8]. Это позволило в рассмотренных примерах с желаемой величиной $g(t)$ в виде гладкой функции уменьшить или устранить резкие скачки величины управления с обратной связью при измерении текущего состояния объекта в высокотемпературном нагреве [9–11].

Выполненное компьютерное моделирование для процессов высокотемпературного нагрева показало работоспособность предложенных алгоритмов синтезирующего управления.

Литература

1. Егоров А.И. Оптимальное управление тепловыми и диффузионными процессами. М.: Наука, 1978.
2. Зубов В.И. Лекции по теории управления. М.: Наука, 1975.
3. Мамытов Дж. Оптимальная стабилизация одной нелинейной системы в банаховом пространстве // Изв. АН Кирг. ССР, сер. физ.-техн. и матем. наук. 1989. № 2.
4. Иманалиев М.И., Алексеенко С.Н. // Доклады АН СССР. 1992. Т. 323. № 3. С. 410–414; 1992. Т. 325. № 6. С. 111–115; 1993. Т. 329. № 5. С. 543–546.
5. Самохвалова Т.П. Варианты решений уравнения Беллмана в системах с распределенными параметрами, связанных с уравнением теплопроводности // Проблемы автоматизации и процессов управления. Бишкек: Илим, 1995. С. 112–121.
6. Шаршеналиев Ж.Ш., Самохвалова Т.П. Приближенные алгоритмы управления и стабилизации в системах с сосредоточенными и распределенными параметрами // Итоги науки. Т. 2. Избранные труды Международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки. М.: РАН, 2014. С. 75–110.
7. Самохвалова Т.П. Приближенное решение уравнения Беллмана методом характеристик // Проблемы автоматизации и управления. 2016. № 2 (31). С. 51–56.
8. Самохвалова Т.П. Приближенное решение уравнения Беллмана // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2017. Т. 17. № 1. С. 52–54.
9. Шаршеналиев Ж.Ш., Самохвалова Т.П., Макиенко Д.О. Алгоритм управления с периодическим контролем состояния объекта // Проблемы автоматизации и управления. 2017. № 2 (33). С. 3–9.
10. Шаршеналиев Ж.Ш., Самохвалова Т.П., Третьякова Л.В. Алгоритм стабилизации высокотемпературных режимов объекта // Проблемы автоматизации и управления. 2018. № 1 (34). С. 5–11.
11. Самохвалова Т.П. Приближенный алгоритм управления высокотемпературным нагревом // Проблемы оптимизации сложных систем. XIV Междунар. Азиатская Школа-семинар, Новосибирск – Чолпон-Ата, 20–31 июля 2018. Тр. конф. Ч. 2. 2018. С. 182–192.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СИСТЕМ

УДК 004.42

*В.В. Гайдамако, Институт автоматизации и информационных технологий
НАН КР, г. Бишкек, dolpha@gmail.com*

МОДЕЛЬ ПРОГРАММИРОВАНИЯ CUDA И ВИРТУАЛИЗАЦИЯ ГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОРОВ

В настоящей работе рассмотрены модель программирования CUDA (гетерогенное программирование), типы памяти видеокарты и особенности их использования, дан короткий пример, демонстрирующий производительность параллельных вычислений и особенности написания кода для графических процессоров. Также рассмотрены методы виртуализации графических процессоров с целью дальнейшего применения для тестирования взаимодействия распределенных приложений и построения моделей облачных измерительных систем.

Ключевые слова: графические процессоры; GPU; вычисления общего назначения; GPGPU; CUDA; контейнеры NVIDIA; поточные вычисления; параллельные вычисления; видеопамять.

Введение

Графические процессоры – GPU (Graphical Processing Unit) появились в середине 90-х годов и исполняли только встроенные программы, позже появилась возможность создавать свой код [1]. В 2006 году, 8 ноября NVIDIA представляет новую «технология революционных вычислений на GPU» – CUDA (Compute Unified Device Architecture®). «GPU с CUDA работает либо как гибкий потоковый процессор, где тысячи вычислительных программ, называемых потоками, или тредами, вместе решают сложные задачи, либо как потоковый процессор в специфических приложениях, например, для вывода изображения, где потоки не связаны между собой. Приложения с поддержкой CUDA используют GPU для интенсивных вычислений и многоядерные CPU для сложных крупномодульных задач, например, для контроля и управления данными» [2]. (Лаборатория Параллельных информационных технологий НИВЦ МГУ). Процессоры становятся параллельными, многопоточными, многоядерными, с огромной вычислительной мощностью и очень высокой скоростью доступа к памяти [3].

Модель программирования CUDA

GPU состоит из нескольких поточных мультипроцессоров (SM – streaming multiprocessors). У каждого SM есть регистры и небольшое количество очень быстрой памяти на кристалле, которая используется для кэширования и взаимодействия между потоками – это разделяемая память. Вычислительные ресурсы – блоки операций с одинарной (SPU) и двойной точностью (DPU), блоки специальных функций (SFU – экспонента, квадратный корень, синус/косинус), блоки загрузки/хранения (LD/ST) – трансляция адресов доступа к памяти (рис. 1). Также SM содержит планировщики для инструкций и вычислительных ресурсов. SM исполняют инструкции только в векторах длиной 1024 бита. Именно эта особенность делает GPU эффективными для решения задач с параллельной обработкой данных, когда для большинства инструкций применяются 1024-битные векторы.

Для обеспечения эффективности при выполнении операций с большим вектором инструкций необходимо провести декомпозицию – разделить задачу для выполнения на вычислительной сети, или гриде (grid). Каждый грид состоит из блоков, каждый из которых содержит группы из 32 потоков, или тредов – верпов (warp). Каждая такая группа, или верп, исполняет одну и ту же последовательность инструкций параллельно и синхронно. Поэтому в большинстве случаев каждый верп может рассматриваться как один поток, выполняющий длинный вектор инструкций.

Верпы из одного блока выполняются на одном поточном процессоре и обмениваются информацией через быструю память на кристалле (разделяемую память, shared memory). Все верпы одного грида выполняют один набор инструкций, но могут находиться на разных стадиях исполнения, а потоки из одного верпа исполняют одну и ту же инструкцию в каждый момент времени. Порядок инструкций не меняется никогда (в отличие от CPU), но исполнение инструкции может начаться до завершения предыдущей при отсутствии зависимостей (рис. 2) [4].



Рисунок 2. – Поточный мультипроцессор

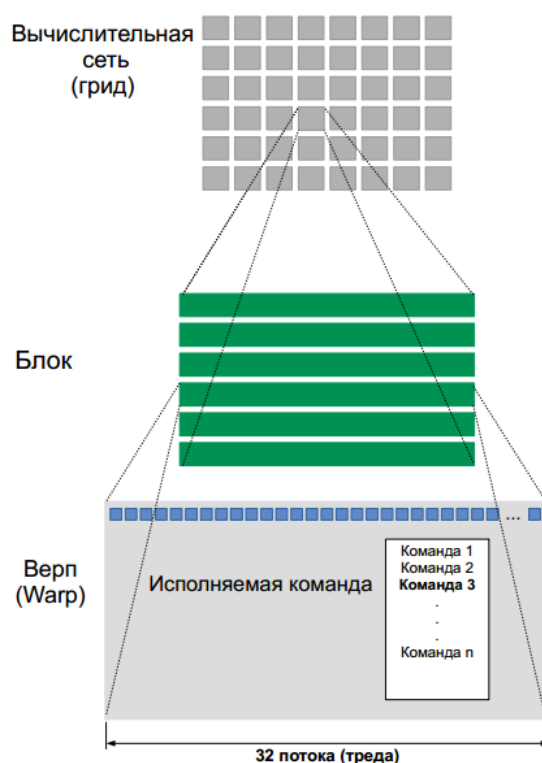


Рисунок 1 – Вычислительная сеть (грид)

По этой причине для эффективного использования мощности GPU следует избегать ветвлений, приводящих к исполнению разного кода разными потоками верпа при исполнении кода на графических процессорах.

Потокам, исполняющимся на GPU, и потокам хоста доступны следующие типы памяти видеокарты:

- Регистры (registers) – самая быстрая память, доступны потоку. Все регистры GPU 32-разрядные. Это основная память потока.
- Глобальная память (unified or global memory) – внепроцессорная память, очень медленная «с точки зрения» видеокарты, на самом деле она в несколько раз быстрее памяти центрального процессора. Используется для хранения больших объемов данных, получаемых от хоста. Предоставляется как непрерывный участок памяти, доступный и хосту, и устройству. При высоких требованиях к

производительности использование глобальной памяти нужно минимизировать. При одновременном обращении нескольких потоков возможно простаивание потоков в ожидании доступа, поэтому при работе с глобальной памятью необходима осторожность.

- Локальная память (local memory) – часть глобальной памяти, доступная потоку, то есть внепроцессорная и медленная, следует всячески избегать ее использования, явно сделать этого нельзя (может использоваться компилятором, когда не хватает регистров – возможно, функция использует много переменных, и при использовании массивов, объявляемых внутри функции ядра).
- Разделяемая память (shared memory) – доступна всем потокам внутри блока, очень быстрая. Локальные переменные функций хранятся именно здесь, выделяется с помощью спецификатора `_shared_`. Так как доступна всем потокам, можно использовать для обмена данными между потоками. Делится на банки, при одновременном обращении потоков к одному банку возникает конфликт банков (bank conflict), производительность падает.
- Константная память (constant memory) – для GPU – только для чтения (потому так называется), с хоста возможна запись. Довольно быстрая даже при одновременном обращении нескольких потоков в одну область.
- Текстурная память (texture memory) – еще один вариант памяти только для чтения, повышающий производительность и снижающий трафик памяти при обращении к одним и тем же паттернам (областям). Первоначально разрабатывалась для графических приложений – поэтому и текстурная, но может использоваться и для других целей – например, для кэширования. Имеет специфические особенности в адресации, чтении и записи данных.

Программа на CPU управляет глобальной, константной и текстурной памятью, которая видима для ядер, через вызовы CUDA Runtime, включая выделение/освобождение памяти устройства и передачу данных между памятью хоста и памятью устройства.

Центральный процессор имеет доступ к глобальной, константной и текстурной памяти для чтения и записи. Всем потокам GPU из всех гридов доступна глобальная память для чтения и записи, константная и текстурная – для чтения. Отдельному потоку доступны локальная память, регистры для чтения и записи, блоку потоков – разделяемая память для чтения и записи [3].

Таким образом, сама архитектура подталкивает программиста к декомпозиции проблемы сначала на крупные подзадачи, которые могут решаться независимо параллельно блоками потоков (грид), а каждую подзадачу разделить на более мелкие, которые будут решаться совместно всеми потоками внутри блока. Такая декомпозиция позволяет сохранить взаимодействие потоков внутри блока и в то же время делает приложение масштабируемым за счет того, что каждый блок потоков может размещаться на любом из SM – поточных мультимикропроцессоров GPU и выполняться параллельно или последовательно в любом порядке, и поэтому скомпилированная программа CUDA может выполняться на любом количестве поточных процессоров.

CUDA (Compute Unified Device Architecture®) – платформа параллельных вычислений общего назначения и модель программирования для доступа к вычислительным мощностям, предоставляемым графическими процессорами NVIDIA. CUDA-совместимыми являются видеокарты начиная с GeForce 600 (Архитектура Kepler), наиболее мощные видеокарты для вычислений общего назначения – видеокарты Tesla серии T (Архитектура Turing). CUDA обеспечивает возможность

использования высокоуровневых языков программирования – C, C++, Java, Python, Fortran и директив DirectCompute, OpenACC [3].

В модели программирования CUDA представляется, что потоки CUDA исполняются на отдельном физическом сопроцессоре. Программа содержит участки кода, которые параллельно выполняются на GPU – они называются функциями ядра, вычислительными ядрами или просто ядрами (kernels), остальной код выполняется на CPU (гетерогенное программирование [3, 5]). При этом и хост, и устройство имеют свои отдельные области памяти, память хоста и память устройства [3]. Код центрального процессора и код на графических процессорах исполняется асинхронно, об этом следует помнить, и, если требуется — использовать синхронизацию (функция `cudaDeviceSynchronize`).

CUDA содержит все, что нужно для работы – среду исполнения, библиотеки, компилятор, среду программирования Nsight, профайлер.

Функции ядра

В исходных файлах для CUDA перед функциями могут стоять следующие спецификаторы, определяющие, как будет вызываться и где будет исполняться код:

`__global__` – выполняется на GPU, запускается только с хоста. Эти функции – начало вычисления вычислительного ядра, поэтому их называют функциями ядра или просто ядрами (kernels). Функция выполняется заданным количеством потоков CUDA и создает вычислительную сеть – грид.

`__device__` – функция ядра, выполняется только на GPU, запускается только из функции ядра.

`__host__` – выполняется и запускается только с хоста (т.е. обычная функция C или C++). Если перед функцией указать `__host__` и `__device__`, будут скомпилированы две версии.

Вызов функции:

```
kernel_func<<<Dg, Db, Ns, S >>>(parameters);
```

`<<<Dg, Db, Ns, S>>>` – конфигурация исполнения (execution configuration), обязательно должна указываться при вызове функции с `__global__`, размещается между именем функции и списком аргументов.

- `Dg` – указывает размерность и размер грида, `Dg.x*Dg.y*Dg.z` равно количеству запускаемых блоков (тип `dim3`);
- `Db` – размерность и размер блока, `Db.x*Db.y*Db.z` равно количеству потоков на блок (тип `dim3`);
- `Ns` – количество байт разделяемой памяти, динамически выделяемой блоку для данного вызова в дополнение к статически выделенной памяти, по умолчанию 0 (тип `size_t`);
- `S` – определяет связанный объект Stream (объект типа `cudaStream_t` – набор инструкций, исполняемый параллельно, запускается разными потоками хоста, используется обычно для копирования данных между хостом и устройством), по умолчанию 0 – Default Stream.

Часто конфигурация исполнения выглядит как `<<<Dg, Db>>>` – количество блоков в гриде и количество потоков в блоке, если не используется разделяемая память и связанные потоки `cudaStream`. Просто объявляется, сколько потоков будет исполнять функцию ядра.

Размерность грида и блока (тип `dim3`) – вектор из трех переменных `x`, `y`, `z` типа `uint`, причем если какой-то из элементов не указан, его значение по умолчанию равно 1, то есть гриды и блоки могут быть одномерными, двумерными и трехмерными.

Функция ядра создает грид из Dg блоков, каждый блок содержит Db потоков, координаты блока в гриде определяются переменной blockIdx(blockIdx.x, blockIdx.y, blockIdx.z).

Координаты потока внутри блока – threadIdx, это трехкомпонентный вектор (dim3). Это значит, что блок может быть трехмерным, это удобно при распределении элементов по потокам для одномерных, двумерных и трехмерных массивов. Размерность блока и грида, количество потоков в блоке и количество блоков в гриде выбираются исходя из размеров и размерности массивов обрабатываемых данных.

В функции ядра определяется номер потока в гриде и выполняется код потока с данными, расположенными по адресу, вычисляемому с использованием номера потока. Номер потока в гриде (tid) с известными координатами (x, y, z) определяется следующим образом:

для одномерных блоков: $tid = x$,

для двумерных блоков размерностью (blockDim.x, blockDim.y): $tid = x + y \cdot blockDim.x$,

для трехмерных блоков размерностью (blockDim.x, blockDim.y, blockDim.z):

$$tid = x + y \cdot Dx + z \cdot Dx \cdot Dy,$$

где

$x = threadIdx.x + blockIdx.x \cdot blockDim.x$,

$y = threadIdx.y + blockIdx.y \cdot blockDim.y$,

$z = threadIdx.z + blockIdx.z \cdot blockDim.z$ [3].

Пример – имитация сложной обработки элементов одномерного массива

В качестве примера возьмем короткую и простую программу обработки одномерного массива из (1024*1024) чисел с плавающей точкой.

Текст программы на CUDA-C:

```
#include <stdio.h>
#define N (1024*1024)
#define M (1000000)
__global__ void compute(float *buf)
{
    int i = threadIdx.x + blockIdx.x * blockDim.x;
    for(int j = 0; j < M; j++)
        buf[i] = i * i * 1.f;
    buf[i] = 1000.f * i / N;
    buf[i] = buf[i] * buf[i];
}

int main()
{
    float data[N];
    float *d_data;
    cudaMalloc(&d_data, N * sizeof(float));
    compute<<<N/256, 256>>>(d_data);
    cudaDeviceSynchronize();
    cudaMemcpy(data, d_data, N * sizeof(float), cudaMemcpyDeviceToHost);
    cudaFree(d_data);

    int j = 5555; //print one element
    printf ("d[%d]=%.5f\n", j, data[j]);
}
```

В основной программе резервируется место для обработанного массива в глобальной памяти видеокарты: `cudaMalloc(&d_data, N * sizeof(float));`

Запускается функция ядра: `compute<<<N/256, 256>>>(d_data);` `<<<N/256, 256>>>` означает, что код будет выполняться на N/256 блоках (размер грида 4096 блоков), в каждом блоке 256 потоков.

Обработка каждого элемента массива выделена в отдельную функцию ядра, код будет исполняться на видеокарте, так как перед именем функции стоит спецификатор `__global__`.

В выражении `int i = threadIdx.x + blockIdx.x * blockDim.x;` `threadIdx.x` – номер потока в блоке (0 – 255), `blockIdx.x` – номер блока (0-4095), `blockDim.x` – количество потоков в блоке, при том, что у нас одномерный грид и одномерные блоки, таким образом, `i` – номер потока в гриде. Каждый поток 1 000 000 раз выполняет операцию присваивания – имитация сложных вычислений с плавающей точкой и потом изменяет это значение. Смысл этого кода только в имитации вычислительной работы. Выполнение вместе с выводом на печать занимает около 2 секунд, в то время как выполнение тех же действий последовательно на CPU занимает больше часа на той же машине.

В этом примере нам не нужно использовать функцию `cudaDeviceSynchronize()`, так как используется Default Stream, и копировать из глобальной памяти нельзя до того, как функция ядра завершится. Но если на хосте выполняется многопоточное приложение, и разные потоки хоста запускают функции ядра, или измеряется время выполнения функций ядра с помощью таймеров CPU, нужно явно синхронизировать доступ к глобальной памяти.

После завершения всех потоков ядра результат копируется из глобальной памяти в память хоста:

`cudaMemcpy(data, d_data, N * sizeof(float), cudaMemcpyDeviceToHost).`

и пространство в глобальной памяти освобождается командой `cudaFree(d_data).`

Это очень простой пример работы с одномерным массивом. Функция `cudaMalloc` выделяет непрерывную область памяти заданного размера. Если мы размещаем в ней одномерный массив, все элементы будут расположены последовательно, и мы можем обращаться к ним по индексу. Если в примере представить, что мы разместим в такой же области памяти двумерный массив (1000 * 1000), и хотим копировать его не сразу целиком, а построчно – например, для строки с номером `k`:

`cudaMemcpy(row, d_data+rownumber, 1000*sizeof(float), cudaMemcpyDeviceToHost).`

Количество обращений к памяти для чтения строки массива будет зависеть от того, совпадает ли начало строки с началом слова, то есть массив должен быть выровнен по словам. Кроме того, если мы размещаем массив в разделяемой памяти, которая разделяется на банки, нужно помнить о конфликтах банков – два потока могут одновременно обращаться к разделяемой памяти, при условии, что они обращаются в разные банки. При обращении в один банк возникнет конфликт банка, часть потоков будет вынуждена простаивать в ожидании доступа к памяти и производительность снизится.

Если используется двумерный массив и предполагается, что функция ядра будет обрабатывать не элементы, а строки массива, то нужно позаботиться о том, чтобы каждая строка начиналась в новом банке. Для работы с двумерными и трехмерными массивами используются другие функции – `cudaMallocPitched`, `cudaMemcpy2D`, `cudaMalloc3D`, `cudaMemcpy3D`.

Виртуализация графических процессоров

Благодаря технологиям виртуализации графических процессоров можно создавать инфраструктуру для совместной работы и обучения, проводить тестирование и создавать модели, решать сложные задачи, требующие огромных вычислительных мощностей в различных областях науки. Виртуализация может быть программной и

аппаратной – с использованием гипервизора (гипервизор – программное или аппаратное средство, осуществляющее взаимодействие между гостевой операционной системой и аппаратными средствами хоста) и на уровне операционной системы – без гипервизора. С помощью технологии виртуализации можно не только разделять ресурсы физической системы между разными операционными системами или приложениями, но и объединять ресурсы разных физических машин, создавая кластеры. Виртуализация – основа существования облаков.

Существуют следующие подходы к виртуализации GPU:

- Virtual Shared Graphics Acceleration (vSGA) – совместное использование разными виртуальными машинами физических GPU, гипервизор создает графический адаптер на каждой машине (программная виртуализация).
- Virtual Dedicated Graphics Acceleration (vDGA) – выделение физического GPU каждой виртуальной машине за счет проброса (pass-through) устройства – то есть команды устройству передаются из виртуальной машины напрямую, однако в этом случае ВМ привязана к хосту и невозможно запустить виртуальных машин больше, чем установлено графических процессоров, то есть если нужно увеличить количество пользователей – устанавливаются новые видеокарты, что не всегда возможно (сколько карт можно установить в машину или шкаф?).
- Soft3D, когда рендеринг осуществляется без участия графических процессоров, только программными средствами, с использованием памяти сервера [6, 7].

NVIDIA предложила технологию NVIDIA Virtual GPU (vGPU) [8], графические процессоры используются совместно виртуальными рабочими столами (машинами) через драйвер NVIDIA, напрямую работающий с GPU. Можно удаленно работать в многопроцессорной среде с 3D графикой, причем с одним GPU могут работать несколько пользователей, что снимает ограничения vDGA.

Версии ПО NVIDIA Virtual GPU включают:

- GRID «Виртуальный ПК» (GRID vPC) – предоставление пользователю виртуальной машины со стандартными приложениями, браузером, мультимедиа – то есть обычной виртуальной машины, но вместо CPU на сервере используются GPU, для обычных пользователей.
- GRID «Виртуальные приложения» (GRID vApps) – пользователю предоставляется возможность работы с профессиональными графическими приложениями, включая драйвер NVIDIA Quadro – для инженеров, дизайнеров, разработчиков.
- Quadro «Виртуальная рабочая станция в дата-центре» – NVIDIA Quadro Virtual Data Center Workstation (Quadro vDWS) [8].

Программное обеспечение NVIDIA Virtual GPU устанавливается в слой виртуализации вместе с гипервизором. ПО NVIDIA Virtual GPU создает виртуальные GPU, позволяющие всем виртуальным машинам (ВМ) совместно использовать ресурсы физического GPU, установленного в сервере. Программное обеспечение NVIDIA для виртуализации включает в себя графические драйверы для всех ВМ. Quadro vDWS содержит, к примеру, производительный драйвер Quadro. Задачи, которые ранее выполнялись на CPU, переносятся на GPU, пользователь получает возможности работы в многопроцессорной среде, с большими объемами данных, запускать приложения, требующие высокой производительности [8].

Все вычисления, рендеринг графики производятся на GPU сервере, по сети передаются только пиксели, причем в зашифрованном виде. Все, что нужно пользователю, хранится на сервере, что повышает безопасность информации.

Для работы ПО NVIDIA Virtual GPU нужны высокопроизводительные графические процессоры NVIDIA Tesla®, специально разработанные для вычислений общего назначения. Если в наличии другая CUDA-совместимая видеокарта, можно использовать виртуализацию на уровне операционной системы – работать с контейнерами NVIDIA.

Контейнеры NVIDIA

Контейнеры не используют гипервизор, они позволяют запускать изолированные виртуальные машины с ядрами, совместимыми с ядром хоста, операционная система хоста сама занимается распределением ресурсов и обеспечением безопасности, поэтому контейнеры потребляют меньше ресурсов, чем виртуальные машины, и на одной физической машине их можно запустить больше. Контейнер содержит в себе все зависимости приложения, поэтому может работать в любой вычислительной среде, совместимой с ядром среды разработки [9].

В облачном хранилище NVIDIA GPU Cloud (NGC) можно найти множество контейнеров с программным обеспечением для глубокого обучения (deep learning) и высокопроизводительных вычислений (HPC), оптимизированного под GPU [10].

NVIDIA Container Runtime – среда исполнения для контейнеров NVIDIA поддерживает контейнеры Docker, LXC – контейнеры Linux и контейнеры CRI-O – легковесная среда исполнения для Kubernetes [11], приложения могут разворачиваться в контейнерах в любой инфраструктуре с поддержкой GPU.

Рассмотрим контейнеры NVIDIA-Docker, так как контейнеры Docker больше всего используются разработчиками и де-факто являются стандартом индустрии. Для того, чтобы работать с контейнерами Docker, использующими графические процессоры, кроме Docker необходимо установить пакет nvidia-docker2.

После установки пакета можно разворачивать контейнеры на основе образа nvidia/cuda (или nvcr.io/nvidia/cuda), предоставляющего среду для запуска приложений и разработки – платформу CUDA. Образы CUDA можно скачать с Docker хаба из хранилища nvidia/cuda [12]. Образы созданы на основе образов операционной системы Ubuntu 16.04 и Ubuntu 18.04. Образы на основе Ubuntu 18.04 являются экспериментальными.

В хранилище есть три вида образов, разных по назначению, это надо учитывать:

- base: начиная с CUDA 9.0 содержит необходимый минимум (libcudart) для развертывания готового приложения CUDA. Этот образ используется, если нужны модули или библиотеки CUDA будут установлены самостоятельно, на их основе будет создан новый образ, который и будет использоваться для развертывания своего приложения.
- runtime: к базовому образу добавляются разделяемые библиотеки из CUDA toolkit. Этот образ удобно использовать для запуска приложения, которое использует различные библиотеки CUDA.
- devel: к образу рантайм добавляются компилятор, средства отладки, заголовки и статические библиотеки, этот образ можно использовать для компиляции приложения из исходных файлов [12]. Например, можно даже компилировать исходные файлы .cu, не копируя их в контейнер:

```
docker run --runtime=nvidia --rm -v <директория хоста>:<директория контейнера>
nvidia/cuda:9.2-devel nvcc <директория контейнера>/<имя>.cu -o <директория
контейнера><исполняемый файл>
```

По умолчанию используется образ на основе ubuntu-16.04, как в примере, для образов на основе ubuntu 18.04 к тегу добавляется “-ubuntu18.04”: nvidia/cuda:9.2-devel-ubuntu18.04.

Примечание: На настоящий момент образ latest, который будет скачиваться по тегу nvidia/cuda – это образ CUDA 10.0, у всех образов CUDA 10.0 есть требование “brand=tesla”, то есть видеокарта должна быть из семейства Tesla, если установлена другая видеокарта – необходимо использовать другой образ - nvidia/cuda:9.2-devel, например. Запустив контейнер с этим образом, можно выполнять команды CUDA, например, узнать тип и количество графических процессоров в системе, какой драйвер видеокарты используется:

```
docker run --runtime=nvidia --rm nvidia/cuda:9.2-base nvidia-smi
```

Или просто:

```
nvidia-docker run --rm nvidia/cuda:9.2-base nvidia-smi
```

Образ nvidia/cuda – это основа для всех других образов, использующих графические процессоры NVidia, в частности, для всех образов облака NVIDIA NGC, а также для приложений, которые будут разрабатываться самостоятельно.

Все контейнеры NVIDIA содержат слой операционной системы и слой CUDA.

Слой Операционной Системы (ОС) – самый нижний, или базовый, слой стека приложений, это пространство пользователя ОС. Содержит все патчи безопасности, доступные в месяц релиза.

Слой CUDA. CUDA предоставляет базу для создания приложений, использующих графическое ускорение, и содержит слои CUDA Runtime (компоненты, необходимые для исполнения приложений CUDA в среде развертывания, содержит все разделяемые библиотеки) и CUDA Toolkit (среда разработки оптимизированных графически ускоренных приложений, содержит библиотеки CUDA и компилятор) [13].

NVIDIA контейнеры поддерживают Docker Compose [14] – то есть можно создавать многоконтейнерные приложения с использованием графических процессоров, для управления многоконтейнерными приложениями можно использовать среду управления (их называют также системами оркестрации) Kubernetes [15]. Использование среды Docker Swarm официально на 28.09.2018 не поддерживается [14], но есть сообщения об успешном опыте [16, 17].

Пример, рассмотренный ранее, можно запустить в контейнере, например, запуск исполняемого файла p2 в базовом контейнере на Ubuntu 16.04 будет выглядеть так:

```
docker run --runtime=nvidia -ti --rm -v $(pwd):/media nvidia/cuda-9.2:base /media/p2.
```

Примеры программ CUDA-C с подробными объяснениями кода, командами компиляции и запуска, контейнеризации приложений с графическим ускорением можно найти на ресурсе [18].

Заключение

Проведенный обзор показал, что графические процессоры могут успешно использоваться не только для выполнения параллельных вычислений общего назначения, что дает огромный выигрыш во времени, но и для моделирования и тестирования сетей и облачной инфраструктуры, для совместного использования ресурсов графических процессоров и создания удаленных рабочих мест. Технология виртуализации NVIDIA Virtual GPU позволяет создавать виртуальные машины общего назначения, когда не нужны интенсивная обработка изображений или иное использование графических процессоров, виртуальных машины для дизайнеров, работающих с графическими приложениями, для разработчиков, которым необходимы все ресурсы графических процессоров. Контейнеры NVIDIA предоставляют возможность разработки и развертывания приложений, использующих графические

процессоры в вычислительной системе с установленными драйверами видеокарт NVIDIA начиная с GeForce GTX 600.

Литература

1. Лаборатория Параллельных информационных технологий НИВЦ МГУ. Информационно-аналитический центр по параллельным вычислениям в сети Интернет Parallel.Ru. URL: <https://parallel.ru/gpu/history.html> (дата обращения 15.10.2018).
2. NVIDIA представляет CUDA™ – технологию революционных вычислений на GPU. Архив пресс-релизов Nvidia за 2006 г. URL: https://www.nvidia.ru/object/IO_37297.html (дата обращения 21.10.2018)
3. CUDA C Programming Guide. Cuda Toolkit documentation. URL: <https://docs.nvidia.com/cuda/cuda-c-programming-guide/index.html> (дата обращения 23.10.2018).
4. Chapuis, Guillaume & Eidenbenz, Stephan & Santhi, Nandakishore. GPU Performance Prediction Through Parallel Discrete Event Simulation and Common Sense. // Proc. of the 9th EAI International Conference on Performance Evaluation Methodologies and Tools. – Valuetools 2015.
5. Верзунов С.Н. // Проблемы автоматизации и управления. – 2017.– №2 (33). С. 62–71.
6. Некоторые аспекты применения режимов vSGA и vDGA в решении VMware Horizon View. 19/03/2014. URL: <https://www.vmgpu.ru/news/vmware-view-vsga-vdga-wp-points> (дата обращения 21.10.2018).
7. Не процессором единым: Виртуальные GPU. URL: <https://habr.com/company/it-grad/blog/307486> (дата обращения 24.10.2018).
8. Технология Virtual GPU. (2018). URL: <https://www.nvidia.com/ru-ru/design-visualization/technologies/virtual-gpu/> (дата обращения 25.10.2018).
9. What is a Container. URL: <https://www.docker.com/resources/what-container> (дата обращения 31.10.2018).
10. Облачное хранилище контейнеров NVIDIA GPU Cloud. URL: <https://ngc.nvidia.com/> (дата обращения 31.10.2018)
11. NVIDIA Container Runtime. URL: <https://developer.nvidia.com/nvidia-container-runtime> (дата обращения 31.10.2018).
12. Docker-hub, хранилище /nvidia/cuda. URL: <https://hub.docker.com/r/nvidia/cuda/> (дата обращения 31.10.2018).
13. J.Calmels, F. Abecassis, P. Ramarao Enabling GPUs in the Container Runtime Ecosystem, June 1, 2018. URL: <https://devblogs.nvidia.com/gpu-containers-runtime/> (дата обращения 31.10.2018).
14. Nvidia wiki. URL: <https://github.com/NVIDIA/nvidia-docker/wiki/Frequently-Asked-Questions#do-you-support-docker-compose> (дата обращения 31.10.2018).
15. Kubernetes. Production-Grade Container Orchestration. URL: <https://kubernetes.io/> (дата обращения 31.10.2018).
16. V. Catterson, Accessing GPUs from a Docker Swarm service. URL: <http://cowlet.org/2018/05/21/accessing-gpus-from-a-docker-swarm-service.html> (дата обращения 31.10.2018)
17. How to use nvidia-docker to create service in docker swarm. URL: <https://stackoverflow.com/questions/46934161/how-to-use-nvidia-docker-to-create-service-in-docker-swarm> (дата обращения 31.10.2018).
18. Примеры на CUDA-C. URL: <http://iasan.pbworks.com> (дата обращения 31.10.2018).

УДК 631.6. (575.2)

К.А. Пресняков, Г.К. Керимкулова, Г.О. Аскалиева
Институт автоматизации и информационных технологий
НАН КР, г.Бишкек. 87guzya@mail.ru

ОЦЕНКА ЗНАЧЕНИЙ ТАРИРОВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ОБЪЕКТОВ ИССЛЕДОВАНИЙ (К МЕТОДУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОЙ СКОРОСТИ ВОДЫ)

Установленная связь между пульсациями скорости воды и пульсациями уровня и расхода воды апробирована на материалах исследований р. Араван-Сай, что подтверждает правильность рабочей гипотезы, выдвинутой при разработке метода определения поверхностной скорости воды. Предложена классификация характерных групп водотоков, основанная на основополагающем и дополнительном параметрах влияния на тарировочный коэффициент. Проведено физическое обоснование полученных результатов.

Ключевые слова: метод, тарировочный коэффициент, параметр влияния.

Постановка задачи исследований. В литературе [1] известен определения поверхностной скорости воды, включающий использование в качестве информативного параметра движения воды пульсации скорости воды в контрольном створе, измерение необходимых параметров за определенный промежуток времени, преобразование информационных электрических сигналов датчика в цифровой телеметрический радиосигнал, передачу посредством трансивера поплавкового датчика по соответствующему радиоканалу в информационно-вычислительную систему, последующую дистанционную обработку и вычисление поверхностной скорости воды. Нами предлагается метод определения поверхностной скорости воды, основанный на использовании в качестве дополнительного информативного параметра используют пульсации угла отклонения поплавкового датчика от вертикали в вертикальной плоскости динамической оси потока, причем информативные параметры измеряют в одной фиксированной точке контрольного створа изученного открытого водотока и исследуемого водотока, функционирующих в гидравлически подобных условиях, при этом определяют тарировочный коэффициент изученного открытого водотока, а поверхностную скорость воды вычисляют по формуле

$$u_m = k_T \cdot \frac{\sqrt{u'^2}}{\sqrt{\alpha'^2} / \alpha_m}, \quad (1)$$

где u_m – поверхностная скорость воды, м/с; k_T – тарировочный коэффициент, $\sqrt{u'^2}$ – среднеквадратичная пульсация скорости воды, м/с; $\sqrt{\alpha'^2} / \alpha_m$ – относительное среднеквадратичное значение пульсации угла отклонения.

Ключевыми моментами указанного метода являются выявление связи относительной пульсации скорости воды с относительными пульсациями уровня и расхода воды и введение понятия тарировочного коэффициента, определяемого на основе результатов соответствующих измерений на изученном открытом водотоке, и распространение упомянутого коэффициента на характеристики исследуемого объекта, функционирующего в гидравлических условиях, подобных гидравлическим условиям изученного водотока.

Задача исследований – оценить связь относительной пульсации скорости воды с относительными пульсациями уровня и расхода воды на примере реки Араван-Сай Кыргызстана и значения тарировочного коэффициента зависимости от соответствующих гидравлических параметров для различных объектов исследований.

Решение поставленной задачи. 1. Оценка пульсаций скорости воды на примере р. Араван-Сай. В работе [1] была установлена связь между относительными пульсациями скорости воды и пульсациями уровня и расхода воды:

$$\left| \frac{u'}{u_i} \right| = \left| \frac{Q'}{Q_i} + \frac{H'}{H_i} \cdot \left(\frac{Q'}{Q_i} - 1 - \frac{H'}{H_i} \right) \right|, \quad (2)$$

где u' (м/с), H' (м), Q' (м³/с) – пульсации скорости, уровня и расхода воды соответственно; u_i (м/с), H_i (м), Q_i (м³/с) – текущие значения скорости, уровня и расхода воды соответственно; знак модуля означает, что пульсации упомянутых параметров имеют двойной знак ($\pm$); она изображена на рис. 1.

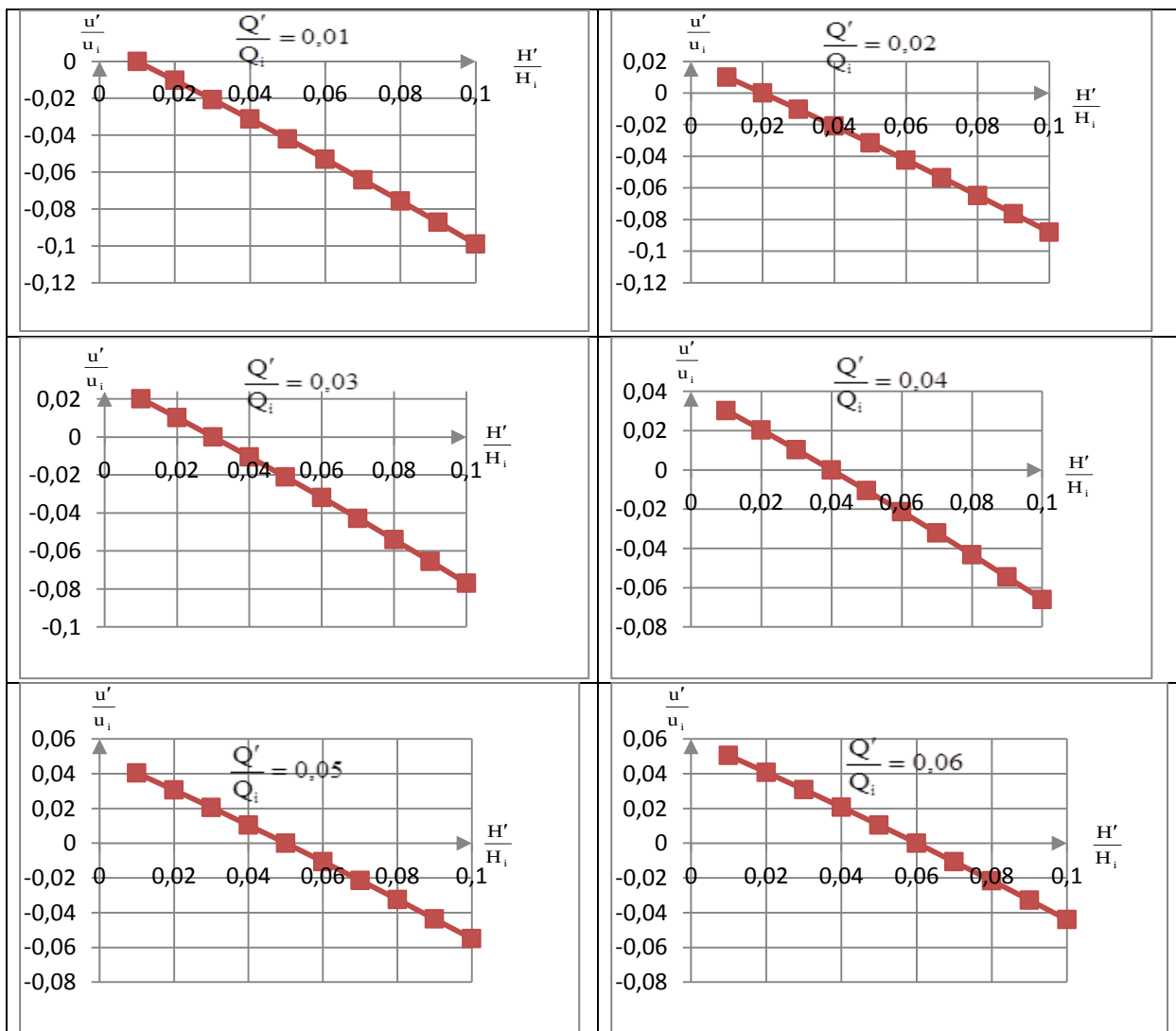


Рисунок 1. Расчетные значения относительных пульсаций скорости воды в зависимости от пульсаций уровня и расхода воды.

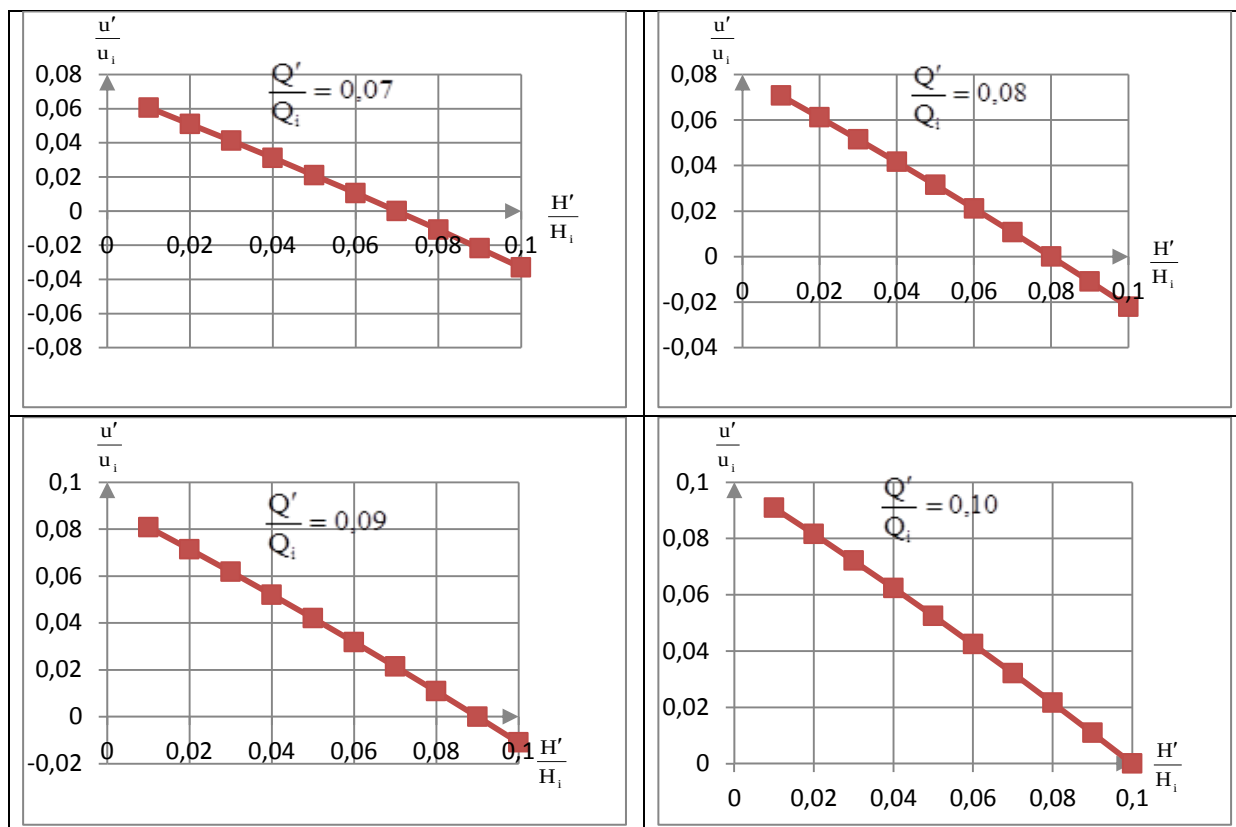


Рисунок 1 (продолжение). Расчетные значения относительных пульсаций скорости воды в зависимости от пульсаций уровня и расхода воды.

В работе [2] приведены суточные колебания уровня и расхода воды на р. Араван-Сай (рис. 2).

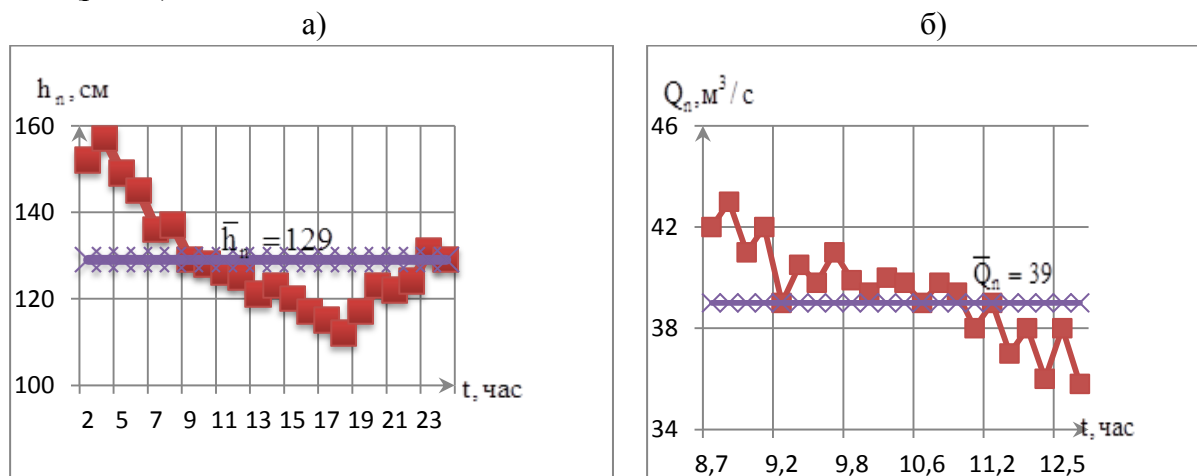


Рисунок 2. Суточные колебания уровня –а) и расхода воды – б) на р. Араван-Сай (данные М.С. Рамазан [2]).

Из анализа этого рисунка следует, что на упомянутом водотоке наблюдаются суточные изменения уровня и расхода воды, которые можно трактовать как низкочастотные пульсации указанных параметров.

В результате обработки данных получены следующие значения среднесуточных пульсации уровня и расхода воды: $H' / \bar{H}_{\text{ср.сут.}} = 0,18$; $Q' / \bar{Q}_{\text{ср.сут.}} = 0,10$ (для положительных пульсаций); $H' / \bar{H}_{\text{ср.сут.}} = |-0,13| = 0,13$; $Q' / \bar{Q}_{\text{ср.сут.}} = |-0,08| = 0,08$ (для минимальных пульсаций), что в результате дает значения среднесуточных пульсаций уровня и расхода воды: $H' / \bar{H}_{\text{ср.сут.}} = 0,16$; $Q' / \bar{Q}_{\text{ср.сут.}} = 0,09$.

Вычислим относительную пульсацию скорости воды по формуле (2), при этом необходимо обратить внимание на то обстоятельство, что в соотношении (2) фигурируют пульсации типа A' / A_i , а не вида $A' / \bar{A}_{\text{ср.сут.}}$. При этом полагаем, что при подобной замене связь (2) радикальным образом не изменится.

Далее оценим тарифовочный коэффициент с учетом полученного результата для объекта с единичными гидравлическими условиями [1]

$$k_t = \frac{0,5}{0,08} = 6,25.$$

При этом необходимо учесть произведенные нами три замены: 1. u' / u_i на $u' / \bar{u}_{\text{ср.сут.}}$; 2. $\sqrt{u'^2} / u_m$ на $u' / \bar{u}_{\text{ср.сут.}}$; 3. водоток с единичными гидравлическими условиями на р. Араван-Сай.

С учетом указанной тройной замены значение тарифовочного коэффициента удовлетворительно (по порядку величины) совпадает с его значением для объекта с единичными гидравлическими условиями (сравним ~6 (р. Араван-Сай) и ~2 (объект с единичными гидравлическими условиями)).

Подобная оценка является качественной (так как в процессе вычисления тарифовочного коэффициента мы последовательно применили три замены), но при этом она выступает в качестве косвенного доказательства правомочности выдвинутой в работе [1] гипотезы.

2. Оценка тарифовочных коэффициентов для ряда водотоков.

В качестве объектов для оценки значений тарифовочного коэффициента были выбраны реки Чуйской и Таласской долин КР, северного склона Алай-Туркестанского хребта Кыргызстана (Ферганская долина), а также бетонированные каналы: ПК р. Тору-Айгыр (Иссык-Кульская котловина), ОК р. Аспара, Туш, Меркенский КР (Чуйская долина), лабораторная установка и р. Теджен, створ Аулата (Таджикистан). В процессе предварительного анализа материалов по упомянутым объектам мы пришли к мнению о существовании определяющих параметров влияния на значения тарифовочного коэффициента, вид которых зависит от характерных групп водотоков, для которых определяется k_t . Появление таблицы 1 обусловлено тем, что среди исходных материалов выделяется ряд объектов, характеризующихся бурным режимом течение потока воды (ОК р. Аспара, каналы «Туш», Меркенский) – $Fr > 1$, $Fr = \frac{\bar{u}^2}{g \cdot H}$, где Fr – число Фруда, $\bar{u}$ – средняя скорость течения воды, м/с; H – глубина наполнения водотока, м.

Кроме того, само собой разумеется, что водотоки со спокойным и бурным режимами течения потока воды должны быть однотипными. Поэтому и возникла мысль о формировании характерной группы водотоков, для которых значения тарифовочного коэффициента зависят от числа Фруда (предположительно – это бетонированные каналы горно-предгорной зоны КР, где определяющим параметром влияния (ОПВ) на значения $k_t\{\text{ОПВ}(k_t)\}$ является число Фруда).

Предварительный анализ исходных материалов по рекам межгорных долин КР (таблица 2) свидетельствует о возможном определяющем параметре влияния на величину тарировочного коэффициента уклона дна этих водотоков.

Таблица 1 – Выявление характерных групп водотоков с учетом ОПВ(k_T) .
Предполагаемый ОПВ(k_T) $\rightarrow$ Fr

Опыт	u_m , м/с	u_* , м/с	Fr	k_T
1	2	3	4	5
ПК р. Тору-Айгыр; данные работы [3]				
1	1,62	0,21	0,82	3,21
2	1,38	0,196	0,78	2,93
3	2,59	0,236	1,48	4,57
4	2,1	0,242	1,21	3,62
5	2,44	0,273	1,37	3,72
6	2,12	0,251	1,32	3,52
7	2,38	0,284	1,94	3,49
{8;10}	1,57	0,275	0,96	2,38
9	1,88	0,254	1,31	3,08
ПК р. Тору-Айгыр; данные работы [3], идентифицированные Г.К. Керимкуловой [4]				
16	1,88	0,217	1,24	3,61
17	1,84	0,234	1,24	3,27
18	1,71	0,257	1,02	2,77
19	1,75	0,262	1,29	2,78
20	1,8	0,262	1,14	2,86
21	1,89	0,262	1,39	3,01
22	2,05	0,262	1,62	3,26
23	1,91	0,262	1,51	3,04
24	2,03	0,287	2,09	2,95
25	1,92	0,326	1,75	2,46
26	2	0,326	1,84	2,56
27	1,88	0,339	1,34	2,31
ПК р. Тору-Айгыр; данные работы [3]				
{11; 12}	1,93	0,217	1,15	3,71
{13; 14}	2,09	0,234	1,50	3,71
15	2,17	0,299	1,59	3,02
ОК р. Аспара; данные работы [3]				
1	1,93	0,136	2,74	5,91
2	2,08	0,147	2,23	5,90
{3; 4}	2,14	0,16	2,71	5,57
5	3,49	0,18	9,39	8,08
6	3,22	0,17	7,25	7,89

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
р. Теджен, створ Аулата; данные Х.Ш. Шапиро [5], идентифицированные Г.О. Аскалиевой [6]				
13	1,77	0,097	0,13	7,59
р. Теджен, створ Аулата; данные Х.Ш. Шапиро [5], идентифицированные Г.К. Керимкуловой [6]				
1	1,57	0,064	0,11	10,2
2	1,28	0,055	0,08	9,76
3	2,14	0,082	0,12	10,9
4	1,81	0,068	0,12	11,0
5	2,14	0,073	0,14	12,3
6	1,45	0,062	0,08	9,8
7	1,35	0,057	0,09	9,83
8	1,06	0,052	0,06	8,42
9	1,02	0,049	0,04	8,68
10	1,69	0,087	0,14	8,07
11	2,11	0,113	0,14	7,76
12	1,65	0,259	0,12	2,64
14	0,96	0,039	0,06	10,2
Канал «Туш»; данные В.Ф. Талмазы, Г.Н. Романенко [7], идентифицированные Г.К. Керимкуловой [8]				
3	6,43	0,219	6,39	12,2
13	8,2	0,237	8,88	14,4
15	3,86	0,188	5,91	8,55
25	3,72	0,188	5,01	8,24
38	3,82	0,188	6,22	8,47
Канал Меркенский; данные В.Ф. Талмазы, Г.Н. Романенко [7], идентифицированные Г.К. Керимкуловой [8]				
б	5,8	0,41	6,04	5,89
в	3,94	0,26	6,61	6,31
Лабораторная установка; данные В.Ф. Талмазы, Г.Н. Романенко [7], идентифицированные Г.К. Керимкуловой [8]				
г	0,88	0,08	1,01	4,58
д	0,57	0,07	0,64	3,39

Продолжение таблицы 1

1	2	3	4	5
Реки Чуйской и Таласской долин КР; данные В.Ф. Талмазы, А.Н. Крошкина [9], идентифицированные Г.К. Керимкуловой [10]				
крупные реки				
устье Б.Кемин	2,14	0,29	0,34	3,07
Джуван Арык	1,76	0,22	0,29	3,33
Сусамыр	1,92	0,13	0,20	6,16
Талас	1,56	0,13	0,16	5,00
Тюп	1,05	0,08	0,12	5,46
Джержалан	1,46	0,1	0,17	6,07
средние реки				
Джети-Огуз	1,23	0,29	0,20	1,77
Карабалты	1,22	0,26	0,20	1,95
Кара-Бура	0,75	0,2	0,09	1,57
Сокулук	1,63	0,37	0,25	1,83
Суек	1,32	0,2	0,22	2,75
Ур Марал	1,57	0,25	0,27	2,62
Чон Каинды	1,06	0,38	0,16	1,16
малые реки				
Бозщук	1,13	0,47	0,18	1,0
Бор Дюбе	1,01	0,44	0,15	0,96
Джержалчак	1,12	0,42	0,18	1,11
Туюк	1,11	0,42	0,18	1,1
Реки северного склона Алай-Туркестанского хребта Кыргызстана; данные Д.К. Тиленовой, М.А. Музакеева [11], идентифицированные Г.К. Керимкуловой [12]				
крупные реки				
Ак Буура	1,49	0,169	0,18	3,67
Исфара	1,35	0,147	0,17	3,81
Исфайрамсай	1,55	0,176	0,19	3,67
Куршаб	1,42	0,144	0,15	4,1
Сох	1,69	0,186	0,17	3,79
Тар	1,49	0,139	0,13	4,46
средние реки				
Араван	1,45	0,183	0,23	3,31
Ходжабакирган	1,33	0,152	0,19	3,65
Шахимардан	1,36	0,162	0,20	3,49

Таблица 2 – Выявление характерных групп водотоков с учетом ОПВ(k_T).
Предполагаемый ОПВ(k_T) $\rightarrow i$

Река	u_m , м/с	u_* , м/с	i	k_T
Реки Чуйской и Таласской долин КР				
крупные реки				
устье Б.Кемин	2,14	0,29	0,0100	3,07
Джуван Арык	1,76	0,22	0,0075	3,33
Сусамыр	1,92	0,13	0,0013	6,16
Талас	1,56	0,13	0,0015	5,00
Тюп	1,05	0,08	0,0009	5,46
Джержалан	1,46	0,1	0,0010	6,07
средние реки				
Джети-Огуз	1,23	0,29	0,0170	1,77
Карабалты	1,22	0,26	0,0140	1,95
Кара-Бура	0,75	0,2	0,0090	1,57
Сокулук	1,63	0,37	0,0240	1,83
Суек	1,32	0,2	0,0082	2,75
Ур Марал	1,57	0,25	0,0110	2,62
Чон Каинды	1,06	0,38	0,0370	1,16
малые реки				
Бозшук	1,13	0,47	0,0540	1,0
Бор Дюбе	1,01	0,44	0,0630	0,96
Джержалчак	1,12	0,42	0,0450	1,11
Туюк	1,11	0,42	0,0430	1,1
Реки Ферганской долины КР				
крупные реки				
Ак Буура	1,49	0,169	0,0033	3,67
Исфара	1,35	0,147	0,0029	3,81
Исфайрамсай	1,55	0,176	0,0035	3,67
Куршаб	1,42	0,144	0,0022	4,1
Сох	1,69	0,186	0,0030	3,79
Тар	1,49	0,139	0,0016	4,46
средние реки				
Араван	1,45	0,183	0,0052	3,31
Ходжабакирган	1,33	0,152	0,0035	3,65
Шахимардан	1,36	0,162	0,0041	3,49

Ознакомление с материалами по р. Теджен, створ Аулата (Таджикистан) (таблица 3) подталкивает нас к мнению о возможном влиянии определяющего параметра на величину тарифовочного коэффициента, в этом случае в виде относительного коэффициента Шези $C/\sqrt{g}$.

Таблица 3 – Выявление характерных групп водотоков с учетом ОПВ(k_T) .
Предполагаемый ОПВ(k_T) $\rightarrow C/\sqrt{g}$

Опыт	u_m , м/с	u_* , м/с	$C/\sqrt{g}$	k_T
р. Теджен, створ Аулата				
1	1,57	0,064	19,65	10,2
2	1,28	0,055	19,14	9,76
3	2,14	0,082	20,23	10,9
4	1,81	0,068	20,34	11,0
5	2,14	0,073	21,36	12,3
6	1,45	0,062	19,33	9,8
7	1,35	0,057	19,20	9,83
8	1,06	0,052	18,04	8,42
9	1,02	0,049	18,42	8,68
10	1,69	0,087	17,75	8,07
11	2,11	0,113	17,66	7,76
12	1,65	0,259	13,47	2,64
13	1,77	0,097	17,86	7,59
14	0,96	0,039	19,35	10,2

Дальнейшим шагом анализа является усреднение характеристик первой и второй групп водотоков с целью выявления тенденций связей между k_T и Fr (таблица 4) и k_T и i (таблица 5).

Таблица 4 – Усредненные характеристики первой характерной группы водотоков, ОПВ(k_T) $\rightarrow Fr$

Водоток	Состояние потока	$\overline{Fr}$	$\overline{k_T}$
ПК р. Тору-Айгыр, опыты 1...27; лабор. уст., створы г, д	Спокойное течение воды	$1,4 \pm 0,4$	$3,2 \pm 0,8$
ОК р.Аспара, опыты 1...6; Канал «Туш» створы 3...38; Меркенский, створы б, в	Бурный режим течение воды	6 ± 2	8 ± 2

При этом действительно заметно, что для бетонированных каналов КР тарировочный коэффициент увеличивается с повышением степени бурности потока воды (таблица 4) и параметр k_T уменьшается с увеличением уклона дна водотоков (таблица 5).

Кроме этого рассмотрение материалов по р. Теджен (таблица 3) выявляет связь между k_T и $C/\sqrt{g}$: тарифовочный коэффициент увеличивается с повышением относительного коэффициент Шези $C/\sqrt{g}$.

Таблица 5 – Усредненные характеристики второй характерной группы водотоков, $ОПВ(k_T) \rightarrow i$

Водоток	Тип водотока	$\bar{i}$	$\bar{k}_T$
Реки Чуйской и Таласской долин КР			
Устье Б.Кемин, Джуван-Арык, Сусамыр, Талас, Тюп, Джергалан	крупные реки	$0,004 \pm 0,003$	5 ± 1
Джети-Огуз, Карабалты, Кара-Бура, Сокулук, Суек, Ур Марал, Чон Каинды	средние реки	$0,017 \pm 0,008$	$2,0 \pm 0,4$
Бозщук, Бор Дюбе, Джергалчак, Туяк	малые реки	$0,051 \pm 0,007$	$1,04 \pm 0,06$
Реки Ферганской долины КР			
Ак Буура, Исфара, Исфайрамсай, Куршаб, Сох, Тар	крупные реки	$0,0028 \pm 0,0006$	$3,9 \pm 0,2$
Араван, Ходжабакирган, Шахимардан	средние реки	$0,0043 \pm 0,0006$	$3,5 \pm 0,1$

Следовательно, в работе предложена следующая классификация водотоков по признаку определяющего параметра влияния на значения тарифовочного коэффициента:

- бетонированные каналы КР (таблица 4 и рис. 3), для которых $ОПВ(k_T)$ выступает число Фруда (или состояние течения потока воды – спокойное или бурное);
- реки межгорных долин КР, характеризующиеся $ОПВ(k_T)$ – уклон дна водотоков (таблица 5 и рис. 4);
- р. Теджен, створ Аулата, как относящаяся к водотоку с подвижным мелкопесчаным дном, для которой $ОПВ(k_T)$ есть относительный коэффициент Шези (таблица 3 и рис. 5).

Влияние числа Фруда на k_r заключается в прямо пропорциональной зависимости тарировочного коэффициента от числа Фруда (имеется в виду тенденция подобной связи).

Объясняется это тем, что в бурном потоке воды интенсифицируется перемешивание потока воды, что логично приводит к увеличению тарировочного коэффициента.

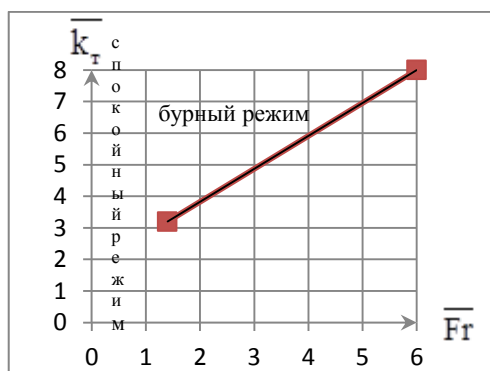


Рисунок 3. Тенденция влияния состояния потока воды на тарировочный коэффициент (бетонированные каналы КР).

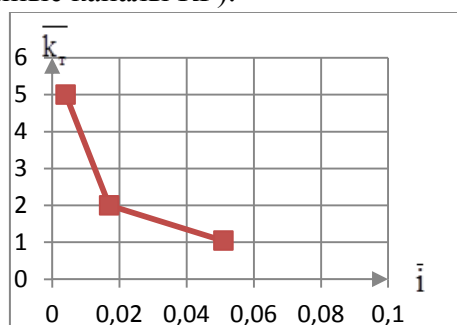


Рисунок 4 – Связь тарировочного коэффициента с уклоном дна водотоков (реки Чуйской и Таласской долин КР).

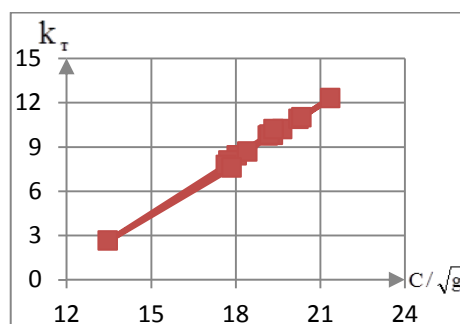


Рисунок 5 – Связь тарировочного коэффициента с относительным коэффициентом Шези (р. Теджен, створ Аулата).

Для рек межгорных долин КР наблюдается тенденция уменьшения тарировочного коэффициента с увеличением уклона дна водотоков. Это можно трактовать следующим образом: повышение уклона дна водотока приводит к увеличению потенциальной

энергии потока воды, что, в свою очередь, вызывает уменьшение кинетической составляющей полной энергии потока воды и, как следствие, следует ожидать уменьшения тарифовочного коэффициента.

Для рек Ферганской долины КР также соблюдается отмеченное обстоятельство (правда, в значительно меньшей степени).

Для р. Теджен (куда предположительно могут быть привлечены каналы Каракумский и Кульарык) выявляется прямо пропорциональная зависимость тарифовочного коэффициента от относительного коэффициента Шези. Подобное вполне присуще естественным водотокам.

В целом указанное соответствует разделению водотоков по признаку определяющего параметров влияния на значения тарифовочного коэффициента.

Возможна и другая схема анализа: поиск дополнительных параметров влияния на упомянутую характеристику $\overline{k}_r$ –

- для первой группы водотоков $\overline{k}_r \rightarrow C/\sqrt{g}$ (рисунок 6);
- для второй группы $\overline{k}_r \rightarrow C/\sqrt{g}$ (рисунок 7);
- для третьей группы $\overline{k}_r \rightarrow i$ (рисунок 8).

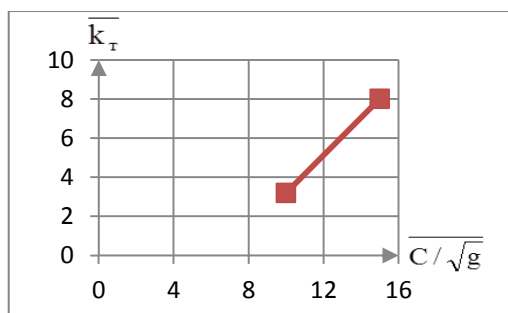


Рисунок 6 – Тенденция влияния относительного коэффициента Шези на значения тарифовочного коэффициента (бетонированные каналы КР, $\overline{k}_r \rightarrow C/\sqrt{g}$).

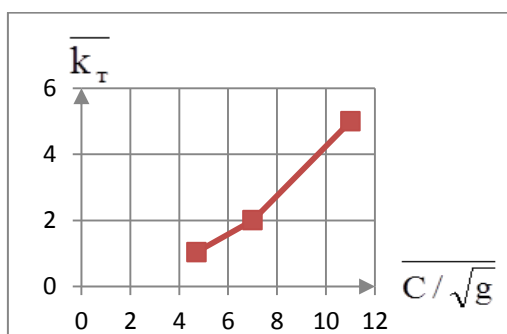


Рисунок 7 – Связь тарифовочного коэффициента с относительным коэффициентом Шези (реки Чуйской и Таласской долин КР).

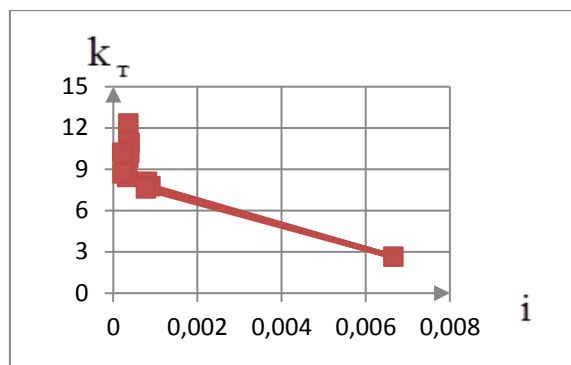


Рисунок 8 – Связь тарировочного коэффициента с уклоном дна водотока (р. Теджен, створ Аулата).

3. Обсуждение результатов исследования. В результате проведенных исследований была установлена следующая классификация водотоков на характерные группы по признаку влияния определяющих $\{ОПВ(k_\tau)\}$ и дополнительных $\{ДПВ(k_\tau)\}$ параметров на значения тарировочного коэффициента.

К первой группе отнесены ПК р.Тору-Айгыр (опыты 1...27) и лабораторная установка (спокойный режим течения потока)и ОК р. Аспара, каналы Туш, Меркенский (бурный режим течения). Тенденция влияния числа Фруда и относительного коэффициента Шези на тарировочный коэффициент вписывается в картину течения потока воды: при числах $Fr > 1$ наблюдается интенсивное перемешивание потока воды, сопровождаемое активизацией пульсационного поля скоростей воды, что и объясняет повышение тарировочного коэффициента с увеличением Fr и $C/\sqrt{g}$ (таблица 6).

Таблица 6 – Сводная таблица результатов исследований

Характерная группа водотоков	Варианты анализа	
	ОПВ(k_τ)	ДПВ(k_τ)
Бетонированные каналы КР	$k_\tau \Rightarrow Fr$	$k_\tau \Rightarrow C/\sqrt{g}$
реки Чуйской и Таласской долин КР	$k_\tau \Leftrightarrow i$	$k_\tau \Rightarrow C/\sqrt{g}$
р. Теджен, створ Аулата	$k_\tau \Rightarrow C/\sqrt{g}$	$k_\tau \Leftrightarrow i$

Во вторую группу включены реки межгорных долин КР (Чуйская, Таласская и Ферганская долины). Для них выявлено влияние основополагающего и дополнительного параметров на значения тарировочного коэффициента, а именно уклона дна этих водотоков и относительного коэффициента Шези. Характер этого влияния можно понять, опираясь на факт уменьшения кинетической составляющей полной энергии потока воды с увеличением уклона дна упомянутых водотоков и уменьшения тарировочного коэффициента при понижении относительного коэффициента Шези (таблица 6).

Третья группа состоит собственно пока из одной реки Теджен. Если она функционирует в режиме естественного водотока, то установленные связи k_τ с $C/\sqrt{g}$ и i вполне понятным (таблица 6). Следует отметить, что характер влияния ОПВ(k_τ) и ДПВ(k_τ) коррелируют между собой.

В работе [6] было высказано мнение о том, что р. Теджен в створе Аулата находится в режиме работы отстойного сооружения. В пользу такого высказывания служат следующие факты:

1. равномерные распределение скоростей и мутности потока воды по сечению водотока;

2. относительно небольшие уклоны дна этой реки ($i=0,0002\dots 0,0067$). Учитывая, что отстойные сооружения характеризуются малыми значениями уклона их дна и существенно малыми скоростями ($\sim$ мм/с) течения воды, можно заключит, что последний фактор для р. Теджен в створе Аулата не имеет места (средние скорости течения воды для рассматриваемого объекта составляют порядка 1м/с).

Поэтому наше мнение о режиме функционирования р. Теджен, створ Аулата можно считать половинчатым и ожидаемой зависимости $k_t(i)$ для отстойного сооружения мы не наблюдаем.

В связи с указанным выявленным противоречием результаты исследований р. Теджен нуждаются в более глубоком анализе и дополнительном исследовании.

Установленная однотипность зависимости тарифовочного коэффициента от относительного коэффициента Шези для всех характерных групп водотоков и связи $k_t(i)$ для второй и третьей групп рек подтверждает правильность выбранного подхода к решению задачи исследований.

Заключение.

1. Установленная связь между пульсациями скорости воды и пульсациями уровня и расхода воды апробирована на материалах исследований р. Араван-Сай, что подтверждает правильность рабочей гипотезы, выдвинутой при разработке метода определения поверхностной скорости воды.

2. Предложена классификация характерных групп водотоков, основанная на основополагающем $\{ОПВ(k_t)\}$ и дополнительном $\{ДПВ(k_t)\}$ параметрах влияния на тарифовочный коэффициент.

3. Проведено физическое обоснование полученных результатов.

Литература

1. Пресняков К.А., Аскалиева Г.О. «О методе определения характерного кинематического параметра на основе новой информативной характеристики» // Проблемы автоматизации и управления. –2017.– №2 (33). – С.20-26.
2. Рамазан М.С. Режимные характеристики водозаборных сооружений на реках Киргизии // Сб. научн. тр. КирНИИВХ «Вопросы водного хозяйства (гидротехника)». – Фрунзе: Кыргызстан, 1972. – Вып. 26. – С. 40–50.
3. Пресняков К.А. Скорость и мутность воды в приложении к проблеме очистки ее от наносов // Кн. 2. Эмпирические основания. – Под науч. ред. д.т.н., проф., акад. НАН КР, Э.Э.Маковского. – Бишкек: Илим, 2003.– 168 с.
4. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К. Нетрадиционная идентификация объектов различного класса дефицита исходной информации // Информатика и системы управления. – город Благовещенск.–2016.–№.3(49).–С.36–46.

5. Шапиро Х.Ш. Регулирование твердого стока при водозаборе в оросительные системы.– М.: Колос, 1983.– 272 с.
6. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О. Река Теджен как объект нетрадиционной идентификации в вариантах изученного и частично изученного водотока // Материалы X Международного симпозиума «Фундаментальные и прикладные проблемы науки».– РАН г. Москва, 2015.– С.37–45.
7. Талмаза В.Ф., Романенко Г.Н. Распределение осредненных скоростей в бурных потоках // Вопросы водного хозяйства (гидротехника). – Фрунзе: Кыргызстан, 1972. – Вып. 26. – С. 99–109.
8. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О. Выявление основных режимных характеристик частично изученных открытых водотоков // Вестник КРСУ им. Б.Н. Ельцина.–г. Бишкек, 2014.– Том 14, №12.– С.74–79.
9. Талмаза В.Ф., Крошкин А.Н. Гидроморфометрические характеристики горных рек. – Фрунзе: Кыргызстан , 1968. – 204 с.
10. Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О. «О границе применимости показательного профиля мутности воды Е.В. Клевцова» //Информатика и системы управления. – город Благовещенск.–2017. – №3(53). – С.125–132.
11. Тиленова Д.К., Музакеев М.А. Формирование стока взвешенных наносов рек северного склона Алай-Туркестанского хребта // Изв. НАН КР «Проблемы геологии и географии в Кыргызстане». – Бишкек: Илим, 1999. – С. 88–91.
12. Отчет о научно-исследовательской работе по направлению «Разработка метода выявления и восстановления недостающих разнородных параметров и характеристик открытых водотоков в условиях дефицита исходной информации» // Заключительный отчет ИАИТ НАН КР. – Бишкек, 2017.– 155 с.

УДК:, 621.314.213:51-7

К. Сатаркулов, Институт автоматизации и информационных технологий
НАН КР, г. Бишкек

У. А. Калматов, Н. А. Суюнтбекова.

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
Энергетический факультет, г. Бишкек

АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ОХЛАЖДЕНИЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА АНАЛИТИЧЕСКИМ И ЧИСЛЕННЫМ МЕТОДАМИ

Рассмотрена существующая математическая модель процесса охлаждения силового трансформатора (СТ) и ее аналитическое решение на основе исходных данных для реального СТ. Графическое представление результатов решения на начальном этапе охлаждения показывает довольно быстрое снижение температур элементов СТ, особенно температуры обмотки. Учитывая значительную инерционность тепловых процессов у реальных СТ, возникает вопрос о степени адекватности процесса охлаждения, описываемого аналитическим методом на начальном этапе охлаждения. В связи с этим предлагается альтернативный метод анализа с помощью компьютерной модели процесса охлаждения силового трансформатора в среде Simulink. Результаты моделирования с помощью такой модели показали ее близость к реальности.

Ключевые слова: трансформатор; тепловой процесс; охлаждение; математическая и компьютерная модели; Simulink.

Среди многочисленных проблем, с которыми сталкивается инженер при проектировании и эксплуатации силовых трансформаторов наиболее важной представляется проблема их охлаждения.

Важнейшей технико-экономической задачей является обеспечение такого режима работы трансформатора, при котором обеспечивается температура, несущественно отличающаяся от номинальной температуры изоляции.

Поэтому возможность оптимального решения этой задачи должна основываться на экспериментальных исследованиях [1] (экспериментальная установка для измерения энергии тепловых потерь, выделяющейся при работе физической модели элемента электрической сети) с использованием такой математической модели расчета, которая с необходимой точностью отражала бы фактически происходящие в трансформаторе тепловые процессы.

Реальный физический процесс, происходящий в трансформаторе в момент времени t после отключения, описывается системой из трех дифференциальных уравнений первого порядка с тремя зависимыми переменными x_1, x_2, x_3 , [2, 4, 5]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -\frac{b_1}{a_1}(x_1 - x_3); \\ \frac{dx_2}{dt} &= -\frac{b_2}{a_2}(x_2 - x_3); \\ \frac{dx_3}{dt} &= \frac{b_1}{a_3}x_1 + \frac{b_2}{a_3}x_2 - \frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_3}x_3. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

В системе уравнений (1) введены следующие обозначения:

$$\begin{aligned}x_1 &= \Delta\vartheta_1, & x_2 &= \Delta\vartheta_2, & x_3 &= \Delta\vartheta_3, \\a_1 &= m_1 c_1, & a_2 &= m_2 c_2, & a_3 &= m_3 c_3, \\b_1 &= F_1 \alpha_1, & b_2 &= F_2 \alpha_2, & b_3 &= F_3 \alpha_3, \\dx_1 &= d(\Delta\vartheta_1), & dx_2 &= d(\Delta\vartheta_2), & dx_3 &= d(\Delta\vartheta_3),\end{aligned}$$

где $\Delta\vartheta_1$, $\Delta\vartheta_2$ и $\Delta\vartheta_3$ – превышения температуры над температурой охлаждающей среды соответственно обмотки, магнитопровода и масла; m_1 и c_1 ; m_2 и c_2 , m_3 и c_3 – масса и удельная теплоемкость обмотки, магнитопровода и масла соответственно.

Обмотка и масло соприкасаются между собой по поверхности площадью F_1 , а коэффициент теплоотдачи этой поверхности α_1 . Аналогично: F_2 и α_2 – площадь теплоотдающей поверхности и коэффициент теплоотдачи магнитопровода, а F_3 и α_3 – площадь теплоотдающей поверхности и коэффициент теплоотдачи радиаторов со стороны воздуха.

При выводе системы дифференциальных уравнений (1) предполагается, что коэффициенты теплоотдачи основных элементов трансформатора обмотки, магнитопровода и масла, не зависят от температуры [2].

В момент отключения превышения температуры обмотки, магнитопровода и масла над температурой охлаждающей среды равны соответственно $\Delta\vartheta_1$, $\Delta\vartheta_2$ и $\Delta\vartheta_3$. Эти превышения температуры за промежуток времени dt уменьшаются на величину $d(\Delta\vartheta_1)$ для обмотки; на $d(\Delta\vartheta_2)$ – для магнитопровода; на $d(\Delta\vartheta_3)$ – для масла.

Запишем систему дифференциальных уравнений (1) в виде [2]

$$\left. \begin{aligned}\dot{x}_1 &= -\frac{b_1}{a_1}x_1 + \frac{b_1}{a_1}x_3; \\ \dot{x}_2 &= -\frac{b_2}{a_2}x_2 + \frac{b_2}{a_2}x_3; \\ \dot{x}_3 &= \frac{b_1}{a_3}x_1 + \frac{b_2}{a_3}x_2 - \frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_3}x_3.\end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Начальные условия в момент $t = 0$: $x_1 = x_{10}$; $x_2 = x_{20}$; $x_3 = x_{30}$.

В матричной форме записи система уравнений (2) имеет вид [2]:

$$\dot{x} = Ax; \quad x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix}; \quad x(0) = \begin{pmatrix} x_{10} \\ x_{20} \\ x_{30} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

матрица A :

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{b_1}{a_1} & 0 & \frac{b_1}{a_1} \\ 0 & -\frac{b_2}{a_2} & \frac{b_2}{a_2} \\ \frac{b_1}{a_3} & \frac{b_2}{a_3} & -\frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_3} \end{pmatrix}.$$

В результате аналитического решения уравнения (2) получен следующий результат [2]:

$$x = e^{At}x(0). \quad (4)$$

Для конкретного блочного трансформатора мощностью **250** МВ · А напряжением

242/15,75 кВ при следующих исходных данных в момент $t = 0$:

$$\begin{aligned} a_1 &= 13,8 \cdot 10^6 \text{ Дж/}^\circ\text{C}; & b_1 &= 26 \cdot 10^3 \text{ Дж/}^\circ\text{C}; \\ a_2 &= 48,4 \cdot 10^6 \text{ Дж/}^\circ\text{C}; & b_2 &= 12 \cdot 10^3 \text{ Дж/}^\circ\text{C}; \\ a_3 &= 122,9 \cdot 10^6 \text{ Дж/}^\circ\text{C}; & b_3 &= 25,7 \cdot 10^3 \text{ Дж/}^\circ\text{C}, \end{aligned}$$

и для начального условия

$$x_{10} = 55^\circ\text{C}; \quad x_{20} = 60^\circ\text{C}; \quad x_{30} = 35^\circ\text{C}$$

результаты решения имеют вид [2]:

$$\left. \begin{aligned} x_1 &= 36,75e^{-0,113 \cdot 10^{-3}t} + 3,13e^{-0,404 \cdot 10^{-3}t} + 15,12e^{-2,133 \cdot 10^{-3}t}; \\ x_2 &= 63,63e^{-0,113 \cdot 10^{-3}t} - 3,89e^{-0,404 \cdot 10^{-3}t} + 0,26e^{-2,133 \cdot 10^{-3}t}; \\ x_3 &= 34,54e^{-0,113 \cdot 10^{-3}t} + 2,45e^{-0,404 \cdot 10^{-3}t} - 1,99e^{-2,133 \cdot 10^{-3}t}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Принято, что до момента отключения трансформатор работал с номинальной нагрузкой при температуре охлаждающей среды 20°C .

На рис.1 представлены графические изображения x_1 , x_2 , и x_3 .

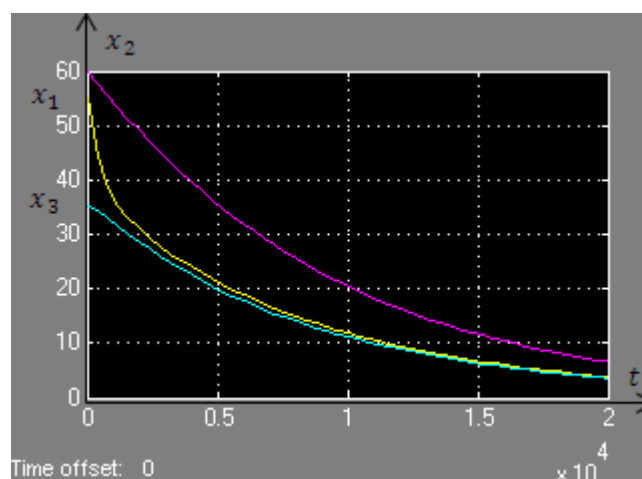


Рисунок 1 – Графические представления зависимостей x_1 , x_2 , x_3 , полученных аналитическим методом

Анализ результатов этих зависимостей позволяет заключить, что на начальном этапе охлаждения обмотки происходит очень быстрое снижение температуры, несмотря на большую инерционность тепловых процессов реальных силовых трансформаторов, поэтому возник вопрос о точности аналитического метода расчета охлаждения на начальном этапе процесса охлаждения.

В связи с этим предлагается численный способ анализа задачи с помощью компьютерного аналога модели (2), так как этот метод позволяет при необходимости быстро менять математическое описание модели по мере ввода в нее новых блоков, приближая ее к реальности.

Рассмотрим построение модели процесса охлаждения масляного трансфор-

матора в Simulink.

Для построения структурной схемы модели для процесса изменения превышения температуры x_1 обмотки над температурой охлаждающей среды преобразуем систему (2), исключив из нее переменные x_2, x_3 .

Перепишем (2) в следующем виде:

$$a_1 \dot{x}_1 = -b_1 x_1 + b_1 x_3; \quad (6)$$

$$a_2 \dot{x}_2 = -b_2 x_2 + b_2 x_3; \quad (7)$$

$$a_3 \dot{x}_3 = b_1 x_1 + b_2 x_2 - (b_1 + b_2 + b_3) x_3. \quad (8)$$

Из уравнения (8) определим $-b_2 x_2$

$$-b_2 x_2 = b_1 x_1 - (b_1 + b_2 + b_3) x_3 - a_3 \dot{x}_3. \quad (9)$$

Подставив выражение (9) в (7), получим

$$\begin{aligned} a_2 \dot{x}_2 &= b_1 x_1 - (b_1 + b_2 + b_3) x_3 - a_3 \dot{x}_3 + b_2 x_3; \\ \dot{x}_2 &= \frac{b_1}{a_2} x_1 - \frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_2} x_3 - \frac{a_3}{a_2} \dot{x}_3 + \frac{b_2}{a_2} x_3. \end{aligned} \quad (10)$$

Из выражения (9) определим x_2 и, взяв от него производную, подставим в (10)

$$\begin{aligned} x_2 &= -\frac{b_1}{b_2} x_1 + \frac{b_1 + b_2 + b_3}{b_2} x_3 + \frac{a_3}{b_2} \dot{x}_3, \\ \dot{x}_2 &= -\frac{b_1}{b_2} \dot{x}_1 + \frac{b_1 + b_2 + b_3}{b_2} \dot{x}_3 + \frac{a_3}{b_2} \ddot{x}_3, \\ \frac{a_3}{b_2} \ddot{x}_3 + \frac{b_1 + b_2 + b_3}{b_2} \dot{x}_3 - \frac{b_1}{b_2} \dot{x}_1 &= \\ &= \frac{b_1}{a_2} x_1 - \frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_2} x_3 - \frac{a_3}{a_2} \dot{x}_3 + \frac{b_2}{a_2} x_3. \end{aligned} \quad (11)$$

После перегруппировки и приведения подобных членов в выражении (11) получим:

$$\begin{aligned} \frac{a_3}{b_2} \ddot{x}_3 + \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{b_2} + \frac{a_3}{a_2} \right) \dot{x}_3 + \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_2} - \frac{b_2}{a_2} \right) x_3 &= \\ &= \frac{b_1}{b_2} \dot{x}_1 + \frac{b_1}{a_2} x_1. \end{aligned} \quad (12)$$

Из выражения (6) найдем x_3 и возьмём от него первую и вторую производные:

$$x_3 = \frac{a_1}{b_1} \dot{x}_1 + x_1; \quad (13)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{a_1}{b_1} \ddot{x}_1 + \dot{x}_1; \quad (14)$$

$$\ddot{x}_3 = \frac{a_1}{b_1} \ddot{x}_1 + . \quad (15)$$

Выражения (13), (14), (15) подставим в (12).

$$\begin{aligned} & \frac{a_3}{b_2} \left(\frac{a_1}{b_1} \ddot{x}_1 + \dot{x}_1 \right) + \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{b_2} + \frac{a_3}{a_2} \right) \left(\frac{a_1}{b_1} \dot{x}_1 + \dot{x}_1 \right) + \\ & + \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_2} - \frac{b_2}{a_2} \right) \left(\frac{a_1}{b_1} \dot{x}_1 + x_1 \right) = \frac{b_1}{b_2} \dot{x}_1 + \frac{b_1}{a_2} x_1. \end{aligned} \quad (16)$$

В выражении (16) введем обозначения

$$K_1 = \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{b_2} + \frac{a_3}{a_2} \right), K_2 = \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_2} - \frac{b_2}{a_2} \right) \quad (17)$$

и выполним ряд преобразований, раскрывая скобки и приводя подобные члены:

$$\begin{aligned} & \frac{a_3}{b_2} \frac{a_1}{b_1} \ddot{x}_1 + \frac{a_3}{b_2} \dot{x}_1 + K_1 \frac{a_1}{b_1} \dot{x}_1 + K_1 \dot{x}_1 + K_2 \frac{a_1}{b_1} \dot{x}_1 + K_2 x_1 = \frac{b_1}{b_2} \dot{x}_1 + \frac{b_1}{a_2} x_1; \\ & \frac{a_3}{b_2} \frac{a_1}{b_1} \ddot{x}_1 + \left(\frac{a_3}{b_2} + K_1 \frac{a_1}{b_1} \right) \dot{x}_1 + \left(K_1 + K_2 \frac{a_1}{b_1} - \frac{b_1}{b_2} \right) \dot{x}_1 + \left(K_2 - \frac{b_1}{a_2} \right) x_1 = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Построение модели процесса, описываемого уравнением (18), в Simulink [3] начинается после его запуска и открытия окна обозревателя библиотеки стандартных блоков (Simulink Library Browser), а также выполнения команды File — New — Model с помощью навигации.

В результате этих действий открывается чистый бланк, на котором строится модель с помощью технологии Drag-and-Drop (бери и тащи).

Для составления уравнения (18) необходимо решить его относительно старшей производной (в нашем случае производная 3-го порядка) и определиться с необходимыми блоками, представленными в библиотеке.

Выполним необходимые преобразования:

$$\begin{aligned} & \frac{a_3}{b_2} \frac{a_1}{b_1} \ddot{x}_1 + \left(\frac{a_3}{b_2} + K_1 \frac{a_1}{b_1} \right) \dot{x}_1 + \left(K_1 + K_2 \frac{a_1}{b_1} - \frac{b_1}{b_2} \right) \dot{x}_1 + \left(K_2 - \frac{b_1}{a_2} \right) x_1 = 0, \\ & \ddot{x}_1 = - \frac{b_2}{a_3} \frac{b_1}{a_1} \left(\frac{a_3}{b_2} + K_1 \frac{a_1}{b_1} \right) \dot{x}_1 - \frac{b_2}{a_3} \frac{b_1}{a_1} \left(K_1 + K_2 \frac{a_1}{b_1} - \frac{b_1}{b_2} \right) \dot{x}_1 - \\ & - \frac{b_2}{a_3} \frac{b_1}{a_1} \left(K_2 - \frac{b_1}{a_2} \right) x_1. \end{aligned} \quad (19)$$

Коэффициенты при производных от x_1 обозначим соответственно через Ko_1 , Ko_2 , Ko_3 . С учетом этих обозначений (19) примет следующий вид:

$$\ddot{x}_1 = -Ko_1 \dot{x}_1 - Ko_2 \dot{x}_1 - Ko_3 x_1, \quad (20)$$

где

$$Ko_1 = \frac{b_2}{a_3} \frac{b_1}{a_1} \left(\frac{a_3}{b_2} + K_1 \frac{a_1}{b_1} \right), Ko_2 = \frac{b_2}{a_3} \frac{b_1}{a_1} \left(K_1 + K_2 \frac{a_1}{b_1} - \frac{b_1}{b_2} \right),$$

$$Ko_3 = \frac{b_2 b_1}{a_3 a_1} \left(K_2 - \frac{b_1}{a_2} \right), \quad (21)$$

а K_1 , K_2 в выражениях (21) определяются из соотношений (17).

Таким образом, чтобы получить левую часть уравнения (20), необходимо собрать правую часть уравнения из стандартных блоков, реализующих соответствующие математические операции, т.е. операции по вычислению коэффициентов Ko_1 , Ko_2 , Ko_3 , используя (21), и определению производных переменного x_1 и его производных $\dot{x}_1$, $\ddot{x}_1$.

Выражение (20) представляет дифференциальное уравнение третьей степени, поэтому для получения сигнала x_1 надо три раза проинтегрировать сигнал $\ddot{x}_1$ (использовать три блока интегрирования (Integrator)).

Вариант построенной структурной схемы в соответствии с уравнением (19) приведён на рис.2.

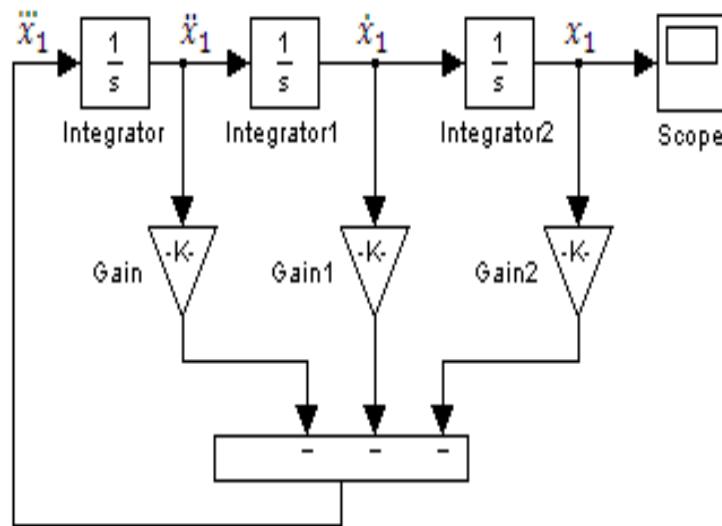


Рисунок 2 – Структурная схема модели, описывающая процесс изменения превышения температуры x_1 обмотки над температурой охлаждающей среды

Рассуждая аналогично, получим дифференциальное уравнение третьего порядка, описывающее процесс охлаждения магнитопровода трансформатора:

$$\ddot{x}_2 = -\frac{b_1 b_2}{a_3 a_2} \left(\frac{a_3}{b_1} + K_{11} \frac{a_2}{b_2} \right) \ddot{x}_2 - \frac{b_1 b_2}{a_3 a_2} \left(K_{11} + K_{22} \frac{a_2}{b_2} - \frac{b_2}{b_1} \right) \dot{x}_2 - \frac{b_1 b_2}{a_3 a_2} \left(K_{22} - \frac{b_2}{a_1} \right) x_2, \quad (22)$$

где

$$K_{11} = \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{b_1} + \frac{a_3}{a_1} \right), K_{22} = \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_1} - \frac{b_1}{a_1} \right). \quad (23)$$

Дальнейшие действия по построению структурной схемы модели, описывающей процесс изменения превышения температуры x_2 магнитопровода над температурой

охлаждающей среды, аналогичны действиям при построении структурной схемы модели, описывающей процесс изменения превышения температуры x_1 обмотки над температурой охлаждающей среды. Поэтому на рис. 3 приведен окончательный вариант структурной схемы модели без описания хода ее построения.

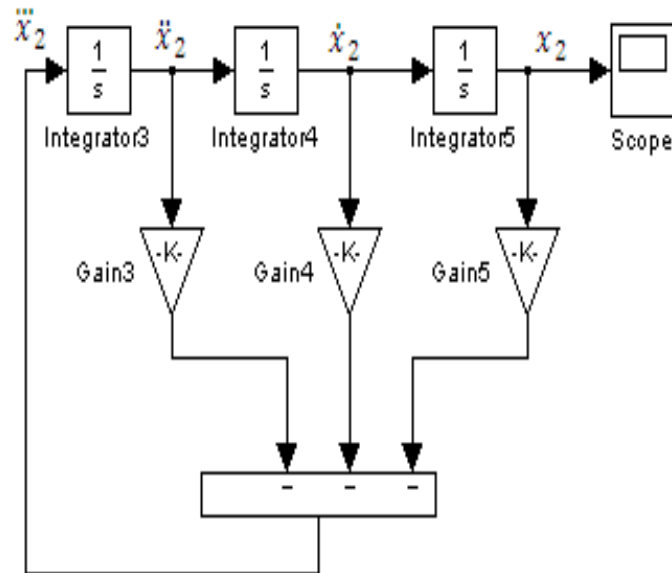


Рисунок 3 – Структурная схема модели, описывающей процесс изменения превышения температуры x_2 магнитопровода над температурой охлаждающей среды

Построение структурной схемы модели для процесса изменения превышения температуры x_3 масла над температурой охлаждающей среды может быть реализовано на основе уравнений (12), так как нами уже построены структурные схемы, описывающие закон изменения температуры обмотки (x_1) (рис. 2). Воспользуемся уравнением (12)

$$\frac{a_3}{b_2} \ddot{x}_3 + \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{b_2} + \frac{a_3}{a_2} \right) \dot{x}_3 + \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_2} - \frac{b_2}{a_2} \right) x_3 = \frac{b_1}{b_2} \dot{x}_1 + \frac{b_1}{a_2} x_1.$$

Как было отмечено выше, для построения структурной схемы любого дифференциального уравнения надо решить его относительно старшей производной. Поэтому имеем

$$\begin{aligned} \ddot{x}_3 = & - \left(\frac{b_1 + b_2 + b_3}{a_3} + \frac{b_2}{a_2} \right) \dot{x}_3 - \left(\frac{b_2(b_1 + b_2 + b_3)}{a_3 a_2} - \frac{b_2 b_2}{a_3 a_2} \right) x_3 + \\ & + \frac{b_1}{a_3} \dot{x}_1 + \frac{b_2 b_1}{a_3 a_2} x_1. \end{aligned} \quad (24)$$

Структурная схема, соответствующая уравнению (24), представлена в нижней части рис. 4.

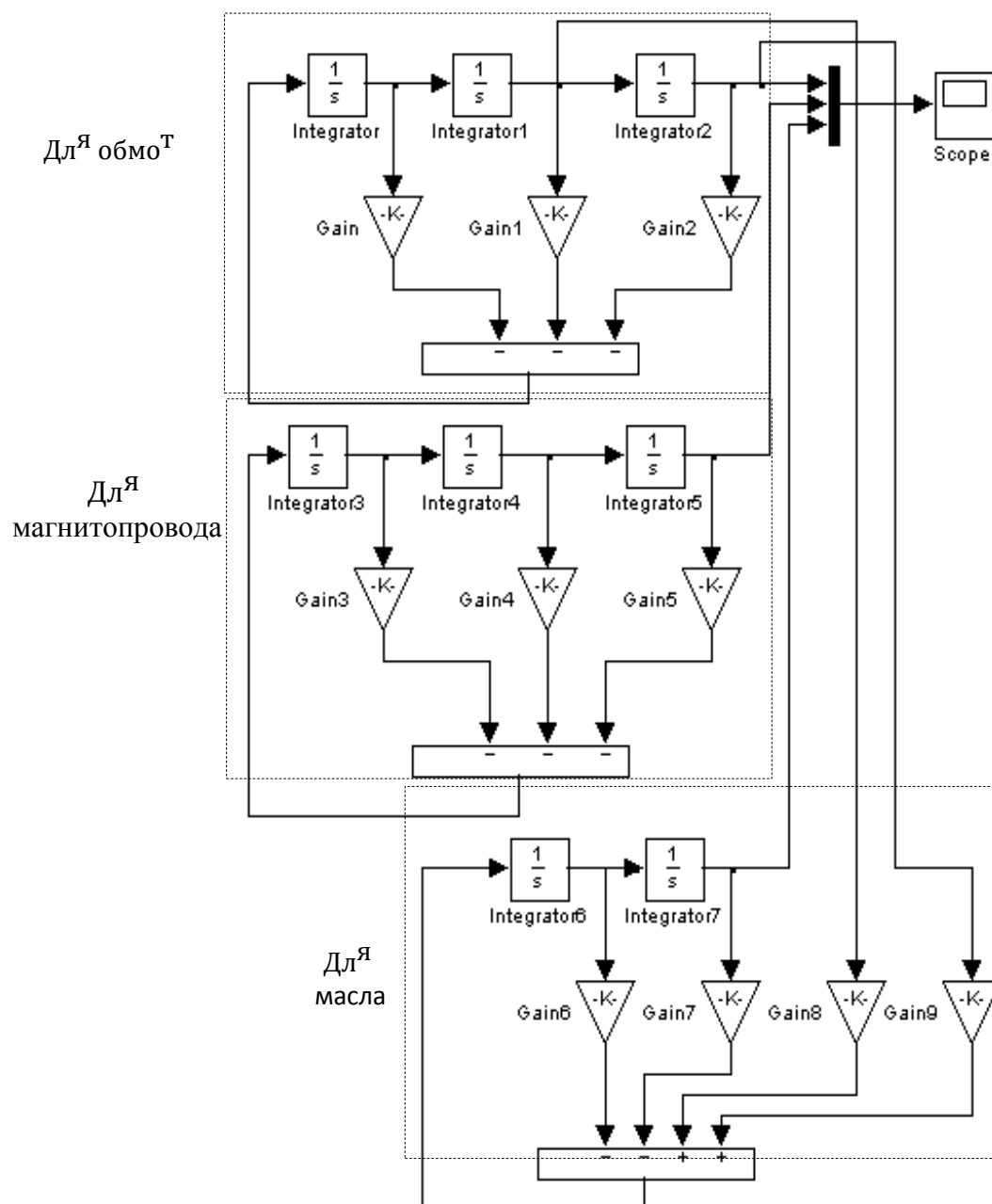


Рисунок 4 – Структурная схема моделей, описывающих процессы изменения превышений температуры трансформатора

На рис. 5а) представлены результаты моделирования численным методом на компьютерной модели процесса остывания основных элементов трансформатора, соответственно обмотки, магнитопровода и масла x_1 , x_2 , x_3 , а на рис. 5б для сопоставления приведены результаты, полученные аналитическим методом [6, 7].

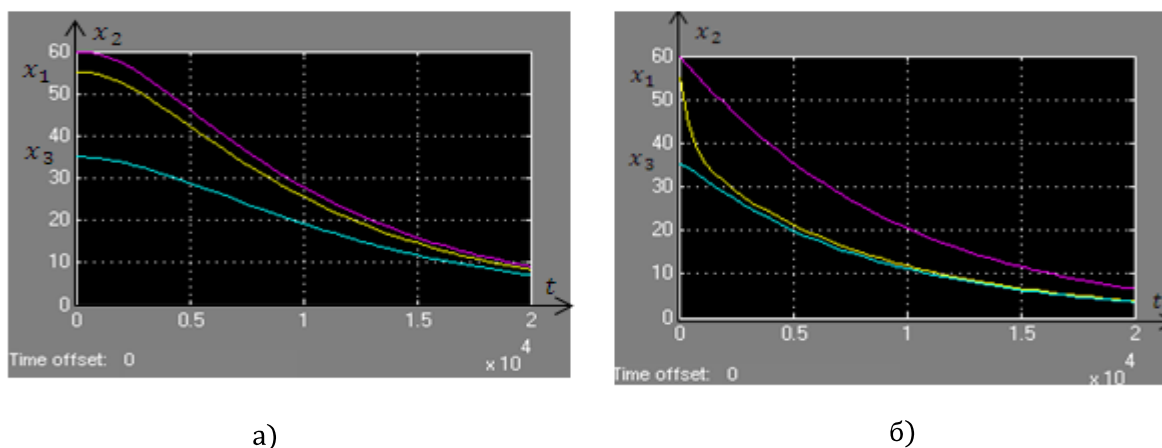


Рисунок 5 – Графические представления зависимостей x_1 , x_2 , x_3 , полученные на компьютерной модели – а) и аналитическим методом – б)

Заключение

Сравнение результатов моделирования аналитическим (рис. 2) и численным (рис. 5) методами, показывает, что результаты численного анализа процесса остывания трансформатора дают результат, более близкий к реальности. Т.е. скорость снижения соответствует инерционности процесса остывания обмотки.

Кроме того, следует отметить достоинство модели (структурной схемы) разработанной в пакете Simulink, заключающееся в том, что при необходимости, возможно, быстро менять математическое описание модели по мере ввода в нее новых блоков, более приближая ее к реальности.

Литература

1. Айдарова А.Р., Байбагысова Д.Ж., Усубалиева Г.К. Исследование влияния различных факторов на величину нагрузочных потерь энергии в элементах электрической сети // Проблемы автоматизации и управления. – 2015.– № 1 (28). – С. 61–66.
2. Киш Л. Нагрев и охлаждение трансформаторов / Перевод с венгерского М.А. Бики, под редакцией Г.Е. Тарле. – Москва: Энергия 1980.
3. Дьяконов В.П., Пеньков А.А. MATLAB и Simulink в электроэнергетике: справочник. М.: Горячая линия-Телеком, 2009. 816 с.
4. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – Учебник для вузов, изд., 3-е, переработ. и доп. М.: Энергия, 1975. – 488 с.
5. Уонг Х. Основные формулы и данные по теплообмену для инженеров: Перевод с англ./ Справочник. – М.: Атомиздат, 1979. – 216 с.
6. Айдарова А. Р., Байбагысова Д. Ж., Кадиева А. Решение задач моделирования при исследовании потерь в элементах электрической сети с применением labview // Проблемы автоматизации и управления. – 2015. № 1(28).– С. 67–71.
7. Тимонин Ю.Н., Горелов Ю.И. Математическое моделирование тепловых процессов в силовом трансформаторе. // Известия тульского государственного университета (Тула) 2010. № 3–5. С. 86–88.

УДК 681.3

Л.И. Великанова, Н.М. Лыченко

*Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР,
Бишкек, Кыргызстан. ludvel@mail.ru, nlychenko@mail.ru,*

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ПРОПУСКОВ В ТЕМПЕРАТУРНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДАХ НА БАЗЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ МОДЕЛЕЙ

В работе рассматривается возможность применимости аппарата искусственных нейронных сетей при решении актуальной задачи восстановления пропусков в измерениях и предлагается соответствующий алгоритм заполнения пропусков в температурных временных рядах с посуточными 6-часовыми измерениями температуры. Обучающее множество для одного из сроков измерений разбивается по типу данных на классы и строится нейросетевая модель для каждого выявленного класса. В результате последующего использования этих моделей пропуски в исходных временных рядах заменяются восстановленными значениями, затем процесс восстановления пропусков повторяется для оставшихся сроков измерений. Приведены результаты моделирования восстановления одиночных пропусков на примере метеорологической станции Байтик, расположенной в предгорной зоне западной части северного склона Киргизского хребта. Сравнение результатов моделирования с результатами, полученными на основе известных методов восстановления пропусков (линейная интерполяция соседних точек и метод ближайших соседей) показало эффективность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: временные ряды, пропущенные данные, температура воздуха, нейросетевая модель, обучающее множество.

Введение

Проблема обработки и восстановления пропущенных значений в данных свойственна многим практическим задачам обработки данных, например, таким как: статистический анализ, прогнозирование, факторный, кластерный, регрессионный анализ и др. Объективными причинами появления пропусков в данных являются поломки оборудования при измерении значений технических характеристик процессов, потеря ретроспективной информации, экстремальный характер функционирования, ограниченный доступ, человеческий фактор и др. Специфика пропущенных значений также может быть различной. В [1] Р. Литтлом предложена классификация типов пропущенных значений: вероятность пропуска не зависит ни от значений наблюдаемых, ни от значений пропущенных данных, пропуски полностью случайные (MCAR, Missing completely at random); вероятность пропуска зависит от значений наблюдаемых, но не от значений пропущенных данных, пропуски не полностью случайные (MAR, Missing at random); вероятность пропуска зависит от значений и наблюдаемых, и пропущенных данных, пропуски не беспорядочные (NMAR, Missing not at random). При обработке пропусков важно понимать, из какого источника и как были получены данные и какой тип пропущенных значений соответствует каждому пропуску.

Временные ряды (ВР) метеоданных, полученных в результате проведенных климатических мониторингов, содержат большое количество пропущенных значений (пропусков). Однако эти данные очень важны при прогнозировании чрезвычайных геоэкологических ситуаций (лавины, сели, паводки и др.) и для предупреждения их катастрофических последствий. Следовательно, необходимо искусственное заполнение пропусков.

Выбор метода искусственного заполнения пропусков должен быть определен: спецификой ВР, долей пропущенных данных, характером решаемой задачи.

Температурные временные ряды отличаются большой амплитудой своих значений и имеют, как правило, ярко выраженную сезонную составляющую и, очень часто – суточную составляющую. Анализ архивных метеоданных, представленных в интернете на различных сайтах по всем метеостанциям Кыргызстана, показал, что большинство пропусков приходится на позднее время суток в холодное время года, что вполне объясняется человеческим фактором. Таким образом, в соответствии с классификацией Литтла, пропуски в температурных временных рядах в большинстве своем можно отнести к классу не полностью случайных (MAR), либо не беспорядочных (NMAR).

В обзорах [2, 3] отмечено, что из классических методов искусственного заполнения пропусков во временных рядах с ярко выраженной сезонной составляющей наиболее приемлем метод заполнения средними значениями по соответствующей фазе колебания (по соответствующей дате либо по времени суток и дате). Если пропуски единичные, вполне приемлема линейная интерполяция соседних точек. Для данных с трендом эффективны методы линейной регрессии, метод интерполяции соседних точек, также могут быть приемлемы методы заполнения средним или медианой из N соседних значений. Для данных, где присутствуют и тренд, и сезонные колебания, наиболее подходящим является метод процента от знаковой величины. Если предположить, что уровни ВР взаимосвязаны, то распространенным и достаточно эффективным методом восстановления пропусков является метод ближайших соседей [4], когда для выборки с пропусками находится ближайшая с точки зрения евклидова расстояния выборка без пропусков.

В последние годы для восстановления пропусков в данных активно применяются искусственные нейронные сети (ИНС) [5, 6, 7], которые имеют особенность находить зависимости между данными. В частности, ИНС позволяют восстановить один параметр, если известны несколько других из рассматриваемого обучающего примера. При этом на вход сети подаются признаки, известные в рассматриваемой выборке данных, выходом являются неизвестные признаки выборки.

Из упомянутых способов восстановления пропусков в температурных ВР, в силу их специфики, а, главное, в силу причин, порождающих пропуски, наиболее эффективными, по видимости, могут оказаться модели восстановления пропусков на базе ИНС.

В настоящей работе рассматривается возможность применимости аппарата ИНС при решении задачи восстановления пропусков и предлагается соответствующий алгоритм заполнения пропусков в температурных временных рядах. Приведены результаты моделирования восстановления одиночных пропусков на примере метеорологической станции Байтик, расположенной в предгорной зоне западной части северного склона Киргизского хребта (высота 1579 м над уровнем моря). Сравнение результатов моделирования с применением аппарата ИНС с результатами, полученными на основе известных методов восстановления пропусков (линейная интерполяция соседних точек и метод ближайших соседей) показало эффективность предложенного алгоритма на базе нейросетевых моделей.

Постановка задачи и предлагаемый способ решения

В качестве исходных данных были использованы архивные метеоданные по метеорологической станции Байтик за 2005–2018 гг., представленные на сайте прогноза погоды RP5 [8]. Данные представляют собой результаты ежесуточных измерений с интервалом в 6 часов (3 часа, 9 часов, 15 часов и 21 час местного времени) температуры воздуха, атмосферного давления, влажности воздуха, силы и направления ветра. Как показал анализ, на всем исследуемом интервале времени (2005–2018 гг.) имеется не-

сколько сотен пропущенных сроков измерений, т.е. соответствующие ВР изобилуют пропусками. Для иллюстрации на рис. 1 представлен фрагмент ВР температуры воздуха за первые 15 дней декабря 2005 г. За этот период по идее 6-часовых измерений должны были быть представлены результаты 60-ти измерений, однако, как видно из рис. 1, 14 из них – пропущены.

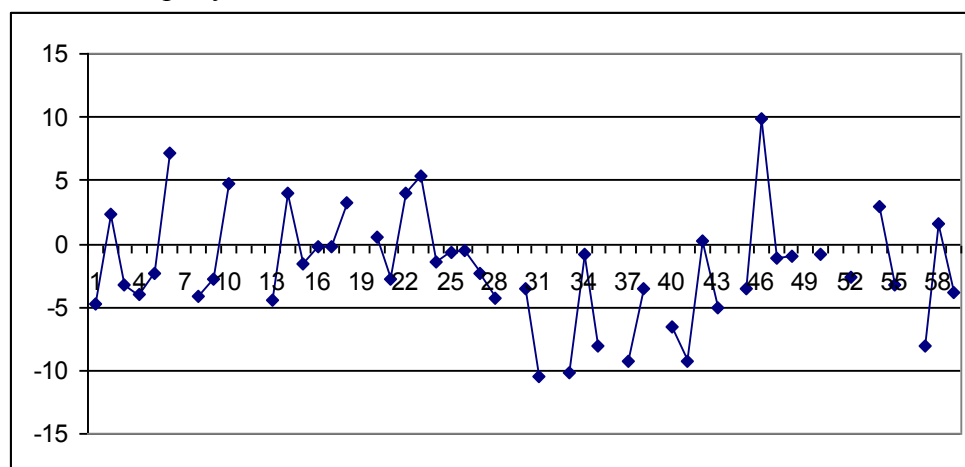


Рисунок 1–Временной ряд температуры воздуха на метеостанции Байтик по результатам 6-часовых измерений за период 1–15 декабря 2005 г.

Для всех указанных сроков мониторинга можно составить соответствующие временные ряды. Фрагменты этих ВР за тот же период приведены на рис. 2. Здесь t_{03} , t_{09} , t_{15} , t_{21} – значения температуры в сроки измерений 3, 9, 15 и 21 час соответственно.

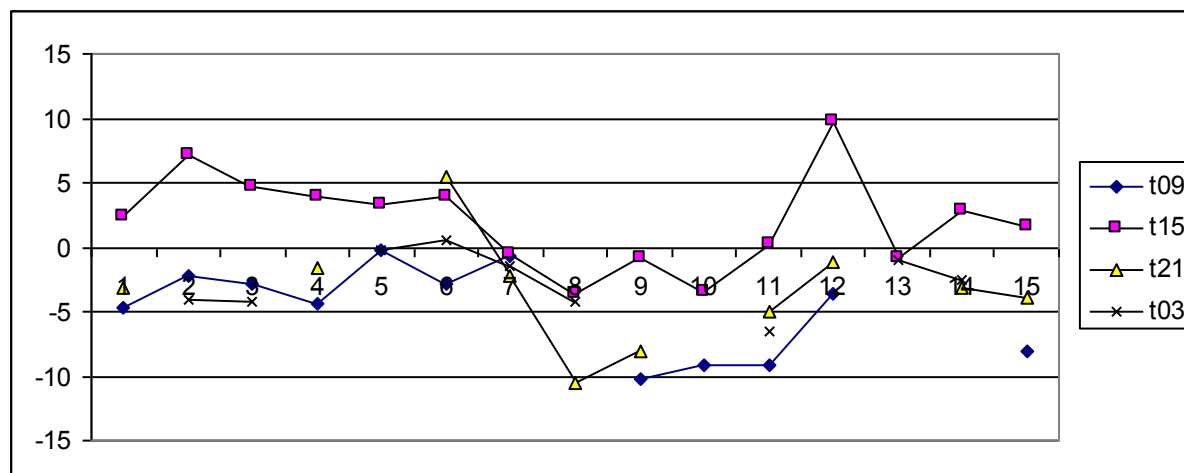


Рисунок 2–Графики температурных рядов в различные сроки измерения за период 1–15 декабря 2005 г.

Необходимо исследовать применимость аппарата ИНС для восстановления пропусков в температурных ВР и разработать соответствующий алгоритм.

Очевидно, что пропущенные значения в 6-часовых измерениях температуры воздуха в той или иной степени будут зависеть от температуры в сроки измерений, окружающие пропущенные. Нейронные сети обладают способностью «улавливать» закономерности во ВР и позволяют получить некоторую модель рассматриваемого динамического процесса как результат обучения нейронной сети. Если температуру в определенный срок измерения рассматривать как некоторую неизвестную функцию от температуры в другие сроки, то, задав в качестве выхода сети (функции цели) это значение и подавая на вход сети значения измерений в другие сроки (т.н. признаки), можно по-

строить модель ВР температуры для определенного срока измерений, обучив сеть на данных, в которых нет пропусков.

Размерность обучающего множества зависит от размерности его входных векторов (ВВ). При увеличении количества элементов ВВ (признаков) сокращается число примеров для обучения нейросети в связи с многочисленными пропусками в исходных временных рядах.

Формат векторов обучающего множества (количество элементов входного вектора или признаков) можно выявить путем последовательного сокращения количества признаков. Например, если входные векторы формировать, исходя из суточного колебания температуры, то входной вектор будет состоять из четырех элементов-признаков: два значения предыдущих измерений и столько же последующих. Для функций цели:

$t03i \quad BB=(t15i, t09i, t21(i-1), t15(i-1));$

$t09i \quad BB=(t21i, t15i, t03(i), t21(i-1));$

$t15i \quad BB=(t09i, t21i, t03i, t21(i-1));$

$t21i \quad BB=(t09i+1, t03i+1, t15i, t09i).$

Анализ временных рядов показал, что данные не вполне отвечают требованиям, предъявляемым к обучающим множествам нейронных сетей. Исходные данные обязательно должны быть непротиворечивы. Между тем, для одинаковых входных векторов нередко имеются сильно различающиеся значения функции цели, что объясняется влиянием дополнительных природных факторов, например, силы и направления ветра. Для решения этой проблемы необходимо увеличить размерность пространства признаков. Но при увеличении размерности пространства признаков может возникнуть ситуация, когда число примеров в обучающем множестве может стать недостаточным для обучения сети, и она вместо обобщения просто запомнит примеры из обучающей выборки и не сможет корректно функционировать.

Кроме того, способность нейронной сети к обобщению на столь широком диапазоне сценариев погодных условий также может привести к потере точности обучения. В связи с этим температурные временные ряды помимо сезонной декомпозиции (зима, весна, лето, осень) предложено разбить на 8 классов по типу исходных данных согласно схеме, представленной на рис. 3.

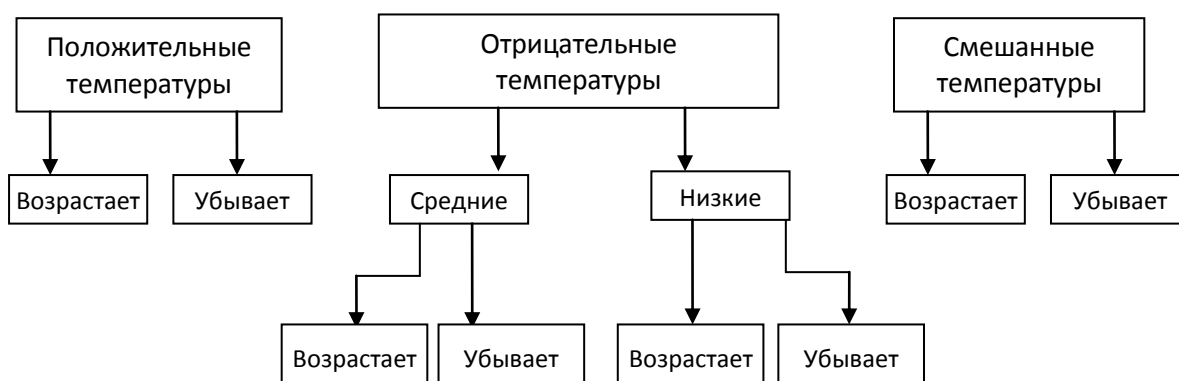


Рисунок 3—Классификация температурных временных рядов по типу данных

Укрупненно алгоритм заполнения пропусков в температурных временных рядах с помощью искусственных нейронных сетей состоит из следующих шагов.

1. Проводится классификация ВР по сезонам (4 класса) и формируются ВР по существующим срокам измерения: $t03$, $t09$, $t15$, $t21$.

2. Из ВР $t03$, ВР $t09$, ВР $t15$, ВР $t21$ выбирается ряд, обеспечивающий формирование обучающего множества наибольшей размерности (ряд, содержащий наибольшее

количество пропусков). Проводится разделение данных на полное множество (без пропусков) и подлежащее моделированию (содержащие пропуски). Для выбранного ряда из полного множества производится формирование обучающего и контрольного множеств.

3. Обучающее множество разбивается по типу данных на 8 классов, используя подобный предложенному в [9] алгоритм классификации погодных условий.

4. Реализуется процесс обучения нейронной сети на обучающем множестве для каждого выявленного класса.

5. Производится тестирование обученной нейронной сети на контрольном множестве. Вычисляется погрешность моделирования. При недопустимой погрешности выполняется корректировка формата входных векторов обучающего множества, выполнение шага 4.

6. Реализуется процесс моделирования на выборках, в которых есть пропущенные значения. Результатом моделирования являются восстановленные значения.

7. Заменяются пропуски в исходных ВР на восстановленные значения.

8. Повторяются пункты 2–7 для оставшихся временных рядов.

Моделирование восстановления одиночных пропусков и полученные результаты. Моделирование проводилось на двух типах нейросетей интерактивной среды программирования Matlab – обобщенно-регрессионная нейронная сеть (grnn) и однонаправленная сеть, обучаемая с применением алгоритма обратного распространения (newff). Результаты моделирования при применении обоих типов сетей оказались довольно близкими.

Процесс восстановления пропущенных значений в температурных рядах показан на классе «зима», отличающемся наличием наиболее разнообразных сценариев погодных условий. На метеостанции Байтик в класс «зима» попали сценарии с середины ноября по первую декаду марта, в класс «весна» – со второй декады марта по вторую декаду мая, в класс «лето» – с третьей декады мая по вторую декаду сентября и, наконец, в класс «осень» – с третьей декады сентября до середины ноября.

Согласно п. 2 алгоритма определим ВР, обеспечивающий формирование обучающего множества наибольшей размерности. Для рассматриваемой задачи это ВР $t03$.

Для моделирования пропущенных значений ВР $t03$ было создано обучающее множество размерностью 660 векторов и контрольное множество из 20 векторов¹. Разбиение обучающего множества (только входных векторов) на классы было проведено нейросетью «Карта Кохонена» [5, 7]. Для каждого класса была создана нейронная сеть и проведено ее автономное обучение с последующим моделированием выходных векторов на контрольном множестве. Тестирование проводилось для 2-, 3- и 4-мерных входных векторов.

Результаты тестирования для ВР $t03$ приведены в табл. 1. Наименьшая погрешность получилась для входных векторов с двумя признаками.

Таблица 1–Сравнительные результаты восстановления пропусков для различной размерности входных векторов

	Число признаков=4	Число признаков=3	Число признаков=2
Средняя абсолютная погрешность	1,34	1,05	0,36

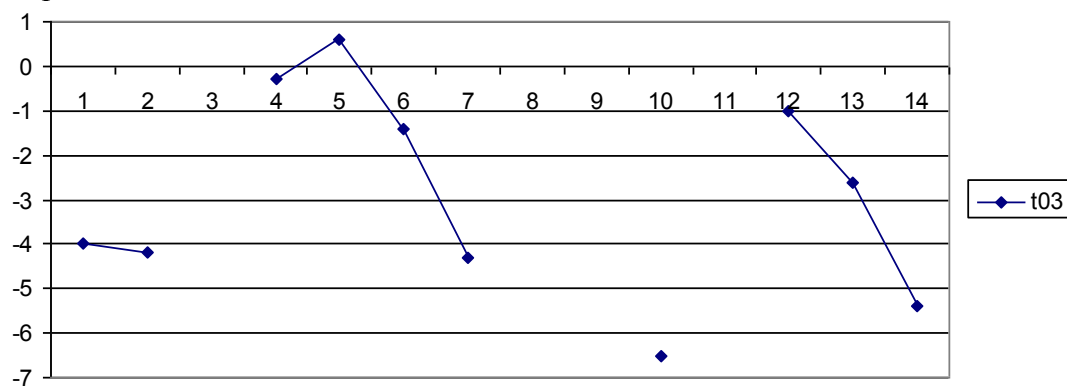
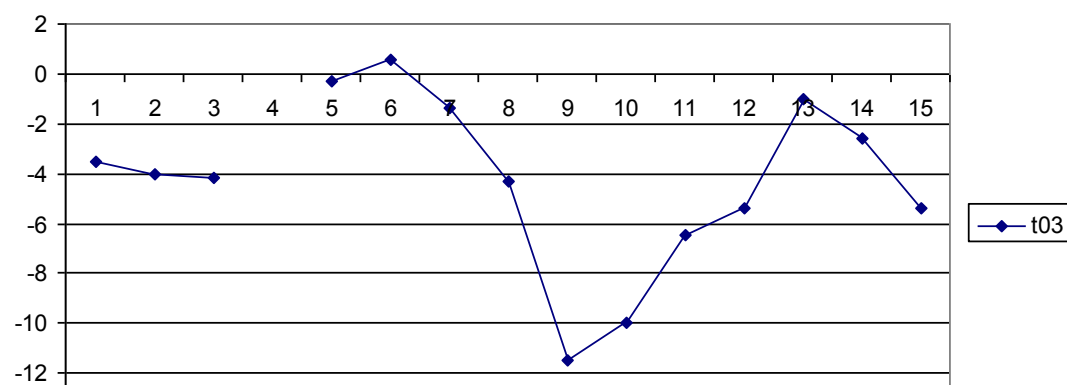
Поэтому далее в работе использовались 2-мерные входные векторы в соответствии с классами их принадлежности.

¹ Данные для исследования подготовлены Л.А. Комбаров

После тестирования обученных нейросетей на контрольном множестве проведено моделирование пропущенных значений во ВР $t03$ на интервале измерений с декабря 2005 г. по март 2018 г. Поскольку на данном этапе были моделированы только одиночные пропуски во ВР $t03$ (те, для которых имеются измеренные значения в соседние сроки, предыдущий и последующий), то из 156 пропущенных значений было восстановлено 110. Согласно п. 7 алгоритма заменяем пропуски в исходных данных на восстановленные значения.

На рис. 4 и 5 приведены фрагменты графиков ВР $t03$ до и после моделирования пропущенных значений. Как видно из рис. 5, одно значение $t03$ на этом этапе восстановить не удалось из-за отсутствия в исходных данных значения предшествующего срока $t21$.

После заполнения пропусков ВР $t03$ моделированными значениями выявляем следующего претендента с наибольшим размером обучающего множества. В рассмотренном примере это множество пропущенных значений в срок 21 час. В исследуемых данных имеется 95 пропущенных значений $t21$, из них 46 имеют измеренные значения в соседние сроки. Для моделирования пропущенных значений ВР $t21$ сформировано обучающее множество из 602 пар входных и выходных векторов и контрольное множество из 20 пар.

Рисунок 4—График ВР $t03$ до заполнения пропусковРисунок 5—График ВР $t03$ после заполнения пропусков

Повторяем шаги 2–7 для ВР $t21$. Согласно п. 7 алгоритма, заменяем пропуски в исходной таблице на восстановленные значения.

Повторяем шаги 2–7 для ВР $t09$ и ВР $t15$, в которых пропуски встречаются намного реже. Восстанавливаем пропущенные значения ВР $t09$ и $t15$. Восстановление одиночных пропусков завершено.

Графики временных рядов за период с 1 по 15 декабря 2005 г. с восстановленными одиночными пропусками приведены на рис. 6. Как видно из этого рисунка, остались

не восстановленными пропусками значений двух последовательных измерений в сроки t_{03} и t_{21} .

Восстановление двух и более пропусков подряд осуществляется аналогично с той разницей, что вектор функции цели имеет размерность, равную количеству пропусков.

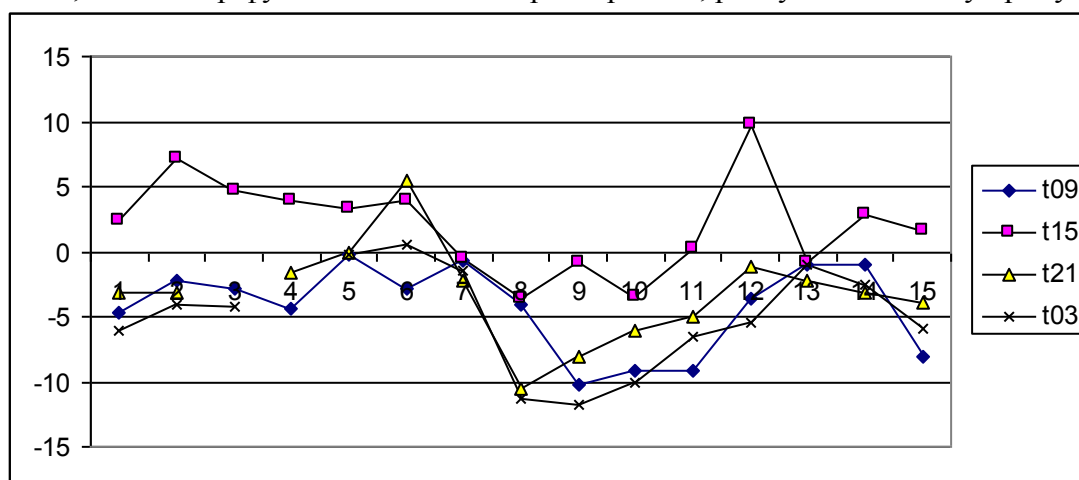


Рисунок 6—Графики температурных рядов в различные сроки измерения за период 1–15 декабря 2005 г. после восстановления одиночных пропусков

С увеличением размерности функции цели погрешность моделирования возрастает. Надо отметить, что в основном в метеоданных имеются одиночные и двойные пропуски, чаще в ночные часы, в которых временные температурные ряды ведут себя более устойчиво, чем в дневные, что способствует более точному их моделированию.

Обсуждение результатов и выводы. Для контрольных множеств t_{03} , t_{09} , t_{15} и t_{21} был проведен сравнительный анализ восстановления пропусков с помощью методов линейной интерполяции соседних точек и ближайших соседей. В первом случае вычислялось среднее арифметическое значение между двумя соседними измерениями, во втором вычислялось евклидово расстояние между вектором моделируемого значения и всеми векторами обучающего множества и в качестве замещения пропуска выбиралась функция цели вектора с наименьшим расстоянием. Сравнительные результаты восстановления пропусков по трем методам для ВР t_{03} , ВР t_{09} , ВР t_{15} и ВР t_{21} приведены в табл. 2.

Таблица 2—Сравнительные результаты восстановления пропусков

Ряд	Метод линейной интерполяции		Метод ближайших соседей		Нейросетевой метод	
	Средняя абсолют. погрешность	Средняя относит. погрешность	Средняя абсолют. погрешность	Средняя относит. погрешность	Средняя абсолют. погрешность	Средняя относит. погрешность
ВР t_{03}	1,29	0,22	1,05	0,18	0,36	0,06
ВР t_{09}	3,29	0,52	2,54	0,42	0,61	0,1
ВР t_{15}	6,2	1,39	4	0,86	0,8	0,15
ВР t_{21}	3,15	0,64	1,94	0,33	0,48	0,1

Из данных табл. 2 следует, что максимальная погрешность моделирования пропусков всеми приведенными методами присуща значениям ВР t_{15} . Видимо, при моделировании пропущенных значений в дневное время суток следует учитывать дополнительные параметры, например, облачность. Минимальная погрешность при использо-

вании ИНС получена для ВР t_{03} , для которого в процессе обучения не использовались значения из ВР t_{15} .

Наименьшая погрешность восстановления пропущенных данных получена при использовании нейросетевых технологий, наибольшая – при использовании метода линейной интерполяции. Таким образом, в случае одиночных пропусков предложенный метод имеет несомненное преимущество перед простыми методами восстановления пропусков. Для дальнейшего уменьшения погрешности при использовании искусственных нейронных сетей требуется их дообучение на увеличенном объеме исходных данных. Более точные результаты также могут быть получены при сокращении срока между измерениями, например, 3 часа, что стало нормой в метеорологических наблюдениях в последние годы.

Таким образом, в работе рассмотрены возможности использования аппарата ИНС при решении задачи восстановления пропусков, предложен соответствующий алгоритм заполнения пропусков в температурных временных рядах и приведены результаты моделирования восстановления одиночных пропусков. Сравнение результатов моделирования с результатами, полученными на основе известных методов восстановления пропусков (линейная интерполяция соседних точек и метод ближайших соседей) показало эффективность предложенного алгоритма на базе нейросетевых моделей. Особо следует отметить потенциальные возможности нейросетевых моделей при восстановлении групповых пропусков во временных рядах.

Литература

1. Литтл Р. Дж. А., Рубин Д. Б. Статистический анализ данных с пропусками. М.: Финансы и статистика, 1990.
2. Абраменкова И. В., Круглов В. В. Методы восстановления пропусков в массивах данных // Программные продукты и системы. 2005. № 2. С. 18–22.
3. Снитюк В.Е. Эволюционный метод восстановления пропусков в данных // Сборник трудов VI межд. конф. «Интеллектуальный анализ информации». Киев, 2006. С. 262–271.
4. Загоруйко Н.Г. Методы распознавания и их применение. М.: Сов. радио, 1972. 216 с.
5. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. Теория и практика. М.: Горячая линия – Телеком, 2002.
6. Сташкова О.В., Шестопал О.В. Использование искусственных нейронных сетей для восстановления пропусков в массиве исходных данных // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. 2017. № 1. С. 37–42.
7. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. – М.: Вильямс. 2006. 1104 с.
8. Сайт прогноза погоды и архива метеорологических данных RP5 – URL: <https://rp5.ru>. Режим доступа: свободный, дата обращения: 1.08.2018.
9. Великанова Л.И. Кластеризатор сценариев погодных условий на базе нейросетевых технологий // Проблемы автоматизации и управления. 2016. № 2 (31). С. 24–33.

УДК 004.416.6

А.Н. Мансуров, sur98@mail.ru

Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР

МЕТОД АНАЛИЗА ИНТЕРФЕЙСА И ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ПРОГРАММНЫХ ПАКЕТОВ, СОСТОЯЩИХ ИЗ СКОМПИЛИРОВАННЫХ ФАЙЛОВ Р-КОДА MATLAB

Рассматривается метод, позволяющий в имеющемся программном пакете, состоящем из файлов Р-кода Matlab, проанализировать связи между компонентами, построить дерево вызовов, диаграмму компонентов и, возможно, установить спецификации интерфейсов компонентов и построить частичную или полную диаграмму потоков данных. Предложенный метод применяется к программным пакетам *grid_strain* и *grid_strain3*.

Ключевые слова: Matlab; Р-код; программный пакет; взаимодействие компонентов; интерфейс компонента; анализ; дерево вызовов; диаграмма потоков данных.

Введение. Программный пакет Matlab представляет собой мощную среду для выполнения и автоматизации различных научных и инженерных расчетов. Одной из его ключевых особенностей является возможность разработки программ, имеющих сколь угодно сложную логику выполнения и могущих использовать большое количество встроенных функций и других уже существующих программ. Именно наличие огромного множества уже написанных программ (крупные библиотеки таких программ называются тулбоксами – англ. *tool box*) делает Matlab столь привлекательным инструментом на фоне аналогов.

Программы, написанные на скриптовом языке Matlab, могут быть запущены (интерпретированы средой Matlab) непосредственно из исходных текстов (m-файлов). В этом случае, как только для выполнения программы понадобится впервые выполнить код из некоторого m-файла, Matlab считывает этот файл, скомпилирует его в формат промежуточного кода и затем будет исполнять этот промежуточный код. Matlab также позволяет разработчикам программ заранее преобразовать исходный код в промежуточный при помощи встроенной функции *rcode* [1; 2, с. 551]. Промежуточный код называется р-код и сохраняется в специальных р-файлах. Ранее (до Matlab версии 6.5) преобразование в р-код использовалось для оптимизации времени выполнения программ (тогда еще не поддерживалось создание промежуточного кода «на лету» и исходный код выполнялся прямой интерпретацией). В настоящее время преобразование в р-код применяется преимущественно для сокрытия авторами исходных текстов своих программ при их распространении. Для этого р-код специально обфусцируется, хотя сами разработчики Matlab признают, что защита от анализа р-кода не является на 100 % надежной [1].

На сегодняшний день опубликовано большое количество программных пакетов, состоящих из скомпилированных р-файлов Matlab. Многие из них заброшены разработчиками, и даже документация по ним зачастую носит обрывочный характер. При этом отдельные компоненты (р-файлы) этих программных пакетов могут оказаться полезными в будущем, но для этого необходимо знать спецификацию их интерфейса.

Например, если в некоторой организации ранее использовался сторонний программный пакет и планируется заменить его собственной улучшенной разработкой, то можно делать первые версии собственных модулей совместимыми с компонентами

стороннего пакета. Это позволит получать преимущества от внедрения улучшений до завершения разработки собственной версии программного пакета целиком, а также тестировать правильность работы собственных модулей, сравнивая их с аналогичными из стороннего пакета. Кроме того, знание принципа взаимодействия компонентов может быть полезным при продвинутых сценариях эксплуатации такого пакета.

В данной работе рассматривается метод анализа интерфейса и взаимодействия компонентов программных пакетов, состоящих из скомпилированных *p*-файлов Matlab. Приведен пример применения этого метода к пакетам *grid_strain* и *grid_strain3*.

Предлагаемый метод анализа. Согласно [3, 4] в зависимости от поставленных целей анализ скомпилированных программ может заключаться в:

- исследовании обмена данными между частями исследуемой программной системы для получения ее протоколов обмена данными и структурной организации,
- дизассемблировании кода программы для получения её листинга на языке ассемблера,
- декомпиляции машинного или байт-кода программы для создания исходного кода на языке программирования высокого уровня.

Согласно политике разработчиков Matlab, компиляция исходного кода в *p*-файлы служит для сокрытия исходного кода и деятельность, направленная на анализ их содержимого и декомпиляцию, неприемлема. То есть неприемлемы второй и третий варианты вышеприведенного списка. Поэтому в данной работе использован подход, основанный на первом варианте – исследование интерфейсов и взаимодействия отдельных *p*-файлов путем анализа обмена данными между ними.

Программные пакеты, выпущенные в виде скомпилированных кодов в среде Matlab, представляют собой набор функций и скриптов с неизвестной реализацией, но известными именами (черный ящик). При этом они работают как единое целое за счет того, что связаны друг с другом по именам: когда одна из этих функций хочет запустить другую, она указывает системе Matlab символьное имя запускаемой функции, а система Matlab загружает и запускает соответствующий файл (имя файла должно совпадать с именем функции). Если это вызов функции, а не скрипта, то этой функции передаются позиционные аргументы и она может возвращать ноль или больше значений. При этом если в вызывающей функции в качестве аргумента использована переменная (а не константа или составное выражение), то вызываемая функция может узнать имя этой переменной.

Благодаря такой открытости взаимодействия скомпилированных модулей Matlab-кода можно применить метод анализа обмена данными между частями исследуемой программной системы: перехватывать вызовы функций между скомпилированными модулями. Проще всего сделать это, создав в текущей директории файлы исходного кода на языке Matlab-скрипт с такими же именами, как файлы скомпилированного кода из анализируемого пакета, а файлы скомпилированного кода временно переименовать. Тогда система Matlab запустит созданный файл исходного кода. В этот файл помещается определение Matlab-функции с соответствующим именем, которая может принимать произвольное число входных и выходных параметров, и определяет конкретное число этих параметров во время выполнения (Matlab поддерживает такой механизм, если в определении функции используются ключевые слова *varargin* и *varargout*). Будем называть эту функцию *враппером*. После чего эта функция сообщает о факте своего вызова и о том, какие входные аргументы были ей переданы. Затем функция переименовывает файл, в котором она содержится (Matlab не препятствует переименованию выполняемого в данный момент файла, так как весь код из файла загружается в память перед началом выполнения) так, чтобы он не использовался при вызове функции с та-

ким именем, переименовывает соответствующий файл скомпилированного кода из анализируемого пакета в его оригинальное имя и запускает функцию анализируемого пакета с соответствующим именем, передавая ей свои входные параметры и запрашивая соответствующее число выходных параметров. После того, как эта функция отработает, управление возвращается к функции-вращателю. Она сообщает значения выходных параметров, полученные от функции анализируемого пакета, и возвращает их вызвавшей ее функции, чтобы не нарушать процесс работы пакета.

Таким образом, анализ интерфейса и взаимодействия компонентов программных пакетов, состоящих из скомпилированных *m*-файлов Matlab, можно выполнить по следующему алгоритму:

- 1 –написание вращателей для скомпилированных модулей;
- 2 –запуск программного пакета во вращателях;
- 3 – вращатели выдают дерево вызовов и имена и значения параметров функций;
- 4 – построение по дереву вызовов диаграммы компонентов [5];
- 5 – по именам и значениям параметров по возможности восстанавливаются интерфейсы компонентов-функций;
- 6 – по дереву вызова и интерфейсам компонентов-функций восстанавливается диаграмма потоков данных (DFD) [6].

Программные пакеты *grid_strain* и *grid_strain3* [7] предназначены для расчета пространственного распределения значений тензора скорости деформации земной поверхности по каталогу скоростей движения ее точек. Такой каталог может быть получен посредством высокоточных GPS или спутниковых наблюдений, а получаемое распределение значений тензора скорости деформации в зависимости от масштаба изучаемой территории отражает тектонические процессы в земной коре или динамику развития оползней. Расчет производится по методике, описанной в [8]. Ее суть состоит в том, что сначала в исследуемой области задается сетка точек расчета, а затем расчет в каждой из этих точек производится независимо друг от друга на основе (1) исходных данных – каталога скоростей движения точек наблюдений и (2) выбранной исследователем величины параметра сглаживания d_0 . Расчет выдает значения компонент тензора и оценки их среднеквадратических отклонений. Для полученных значений тензора вычисляются скалярные параметры (например, след тензора – суммарное изменение площади/объема). Также для каждого узла сетки вычисляется критерий достоверности результата, смысл которого заключается в недопущении экстраполяции.

Пакет *grid_strain* производит расчет в двумерном пространстве (высоты точек земной поверхности и вертикальная компонента движений не рассматривается), а пакет *grid_strain3* производит расчет по трехмерной модели. На практике из-за того, что в пространственных масштабах порядка сотен километров земная кора является приблизительно плоской, расчет по трехмерной модели оказывается крайне неустойчивым, и основную ценность представляет пакет *grid_strain*. Ниже приведены результаты анализа интерфейса и взаимодействия компонентов пакета *grid_strain*, хотя аналогичная работа была частично произведена над пакетом *grid_strain3*.

Применение разработанного метода к программным пакетам *grid_strain* и *grid_strain3*. Пакеты *grid_strain* и *grid_strain3* при каждом запуске позволяют пользователю выбрать один из трех вариантов использования:

1. Пользователь предоставляет файл с исходным каталогом скоростей и параметры расчетной сетки (в пакете *grid_strain3* сетка формируется на основе предоставленной пользователем цифровой модели рельефа), выбирает используемые в расчете точки исходного каталога; эти данные сохраняются в файле **_grid.mat*; затем пользователь выбирает значение d_0 , производится расчет по этим параметрам, результат

расчета сохраняется в файле **_strain.mat* и опционально в текстовых файлах; результат расчета визуализируется.

2. Пользователь предоставляет файл **_grid.mat*, может изменить параметры расчетной сетки и набор используемых в расчете пункты каталога; эти данные сохраняются в файле **_grid.mat*; затем пользователь выбирает значение d_0 , производится расчет по этим параметрам, результат расчета сохраняется в файле **_strain.mat* и опционально в текстовых файлах; результат расчета визуализируется.
3. Пользователь предоставляет файлы **_grid.mat* и **_strain.mat* с результатами ранее проведенного расчета, эти результаты визуализируются; опционально пользователь выбирает новое значение d_0 , производится расчет, результат сохраняется в файле **_strain.mat* и опционально в текстовых файлах; результат визуализируется.

В первую очередь было проанализировано содержимое файлов **_grid.mat* и **_strain.mat* – сохраненные переменные среды Matlab. Путем сопоставления имен и значений переменных удалось установить их смысл. Файл **_2D_grid.mat* содержит переменные: векторы, соответствующие столбцам исходного каталога: e , n – координаты, ve , vn – компоненты скорости, eve , evn – среднеквадратические отклонения компонент скорости; pre – вектор флагов-неисключений точек исходного каталога из расчета; скаляры, описывающие сетку: fvx , lvx , nx , dx , – начало, конец, количество узлов и шаг по оси X, fyv , lyv , ny , dy – то же по оси Y; строка *grep* – текстовое описание сетки. Файл **_2D_strain.mat* содержит переменные: $d0$ – радиус сглаживания; pre – то же, что и в **_2D_grid.mat*; массивы, по размеру совпадающие с расчетной сеткой и содержащие: $EMAX$ и $EMIN$ – максимальное и минимальное собственные значения тензора деформации, PHI – азимут направления максимального собственного значения, $eEMAX$ и $eEMIN$ – среднеквадратические отклонения максимального и минимального собственных значений, $numb$ – некая численная оценка качества расчета в точке сетки, FLC – вероятно, флаг успешности расчета, FLS – флаг достоверности расчета: 0 – низкая, 1 – средняя, 2 – высокая.

Пункты 1–5 алгоритма анализа скомпилированных модулей были выполнены отдельно для каждого из этих вариантов использования, в результате получены деревья вызовов функций пакета, по которым были построены диаграммы компонентов (для пакета *grid_strain* показаны на рисунках 1–3). В результате выполнения пункта 6 восстановлены диаграммы потоков данных (DFD). DFD для первых двух вариантов использования пакета *grid_strain* показаны на рис. 4.

Как видно из диаграмм компонентов, пакет *grid_strain* не очень хорошо структурирован: модули *gs_gridgene*, *gs_gridload* и *gs_gridmod* (а также *grid_rep* и *gs_gridrep*) имеют сходный функционал, который из них не вынесен, модули *gs_strashow* и *ifok_load_kn* вызываются в третьем варианте использования напрямую, а в первых двух – опосредованно.

Из анализа диаграммы потоков данных можно представить весь ход обработки состоящим из трех этапов:

- подготовка исходных данных (бирюзовый);
- расчет поля скорости деформации (зеленый);
- визуализация результатов (красный).

Этап визуализации при двух изображенных вариантах использования выполняется внутри процесса, ответственного за расчет, а при третьем варианте использования (на рисунке не показан) он выполняется сначала отдельно, а потом внутри того же процесса, что тоже негативно характеризует качество проектирования пакета *grid_strain*.

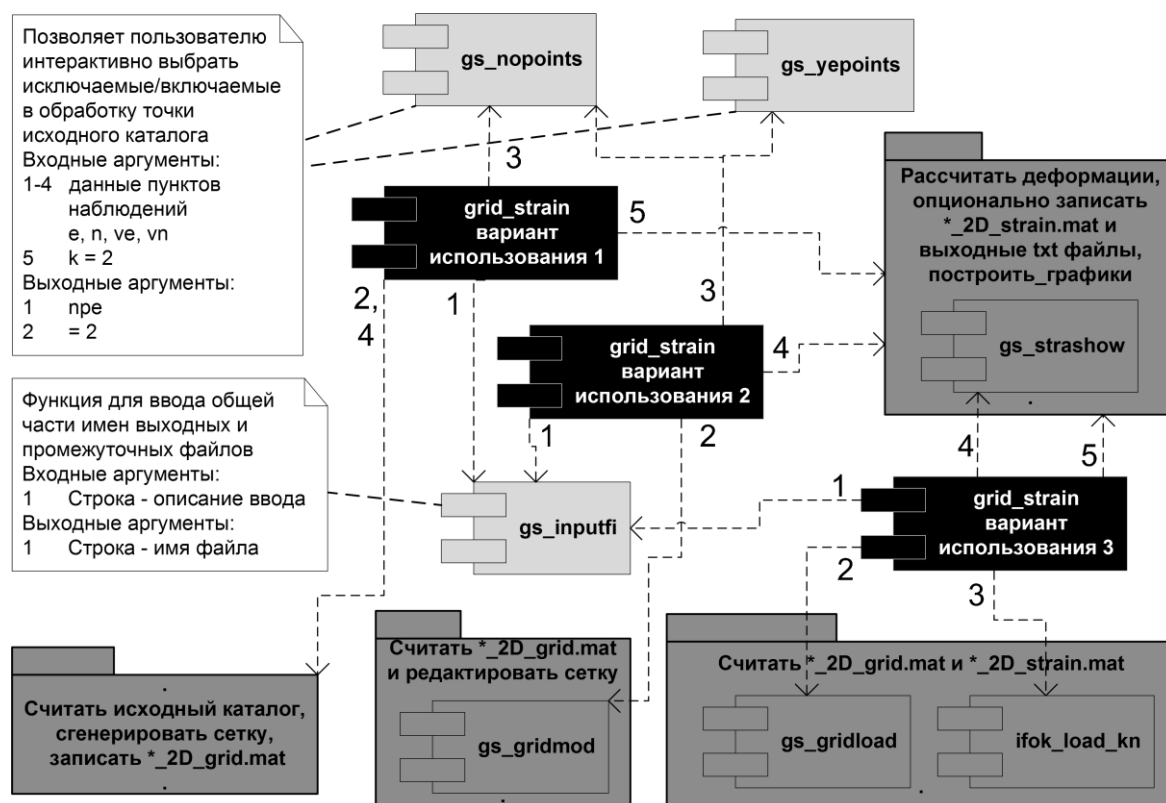


Рисунок 1 – Диаграмма компонентов программного пакета *grid_strain*

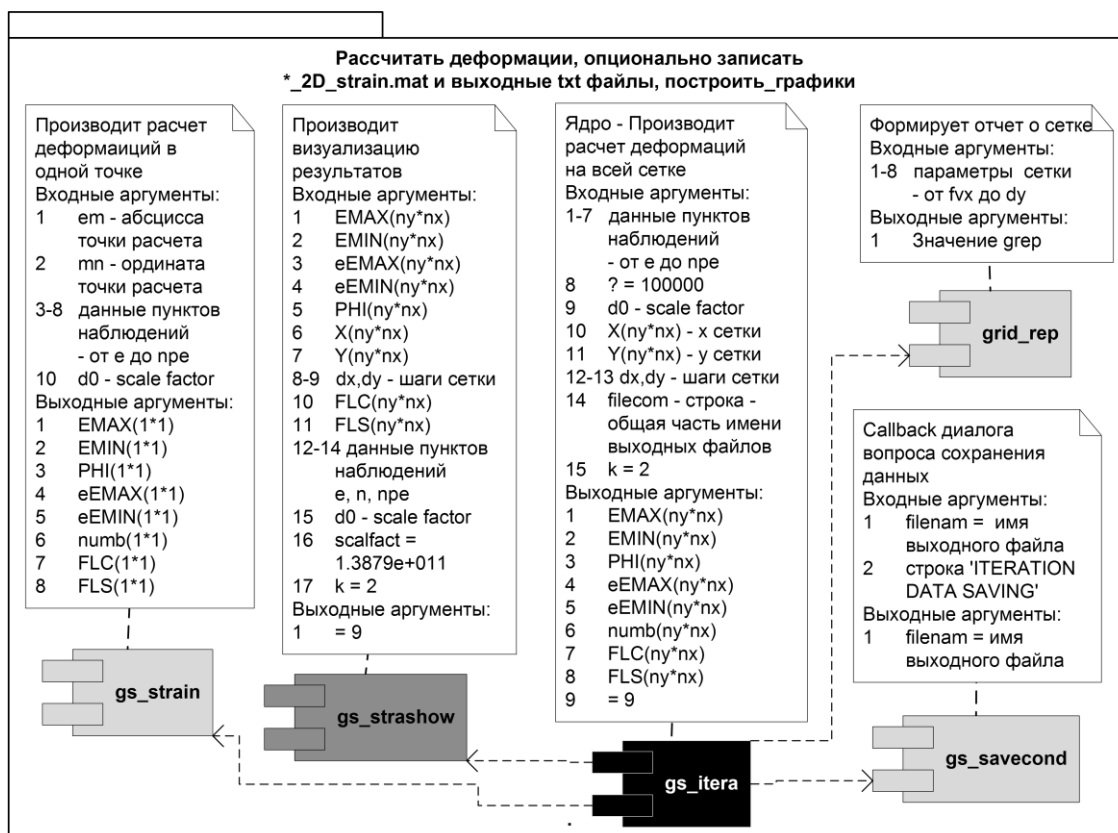


Рисунок 2 – Диаграмма компонентов программного пакета *grid_strain*. Внутренняя структура пакета расчета, визуализации и сохранения распределений тензора скорости деформации и его скалярных параметров

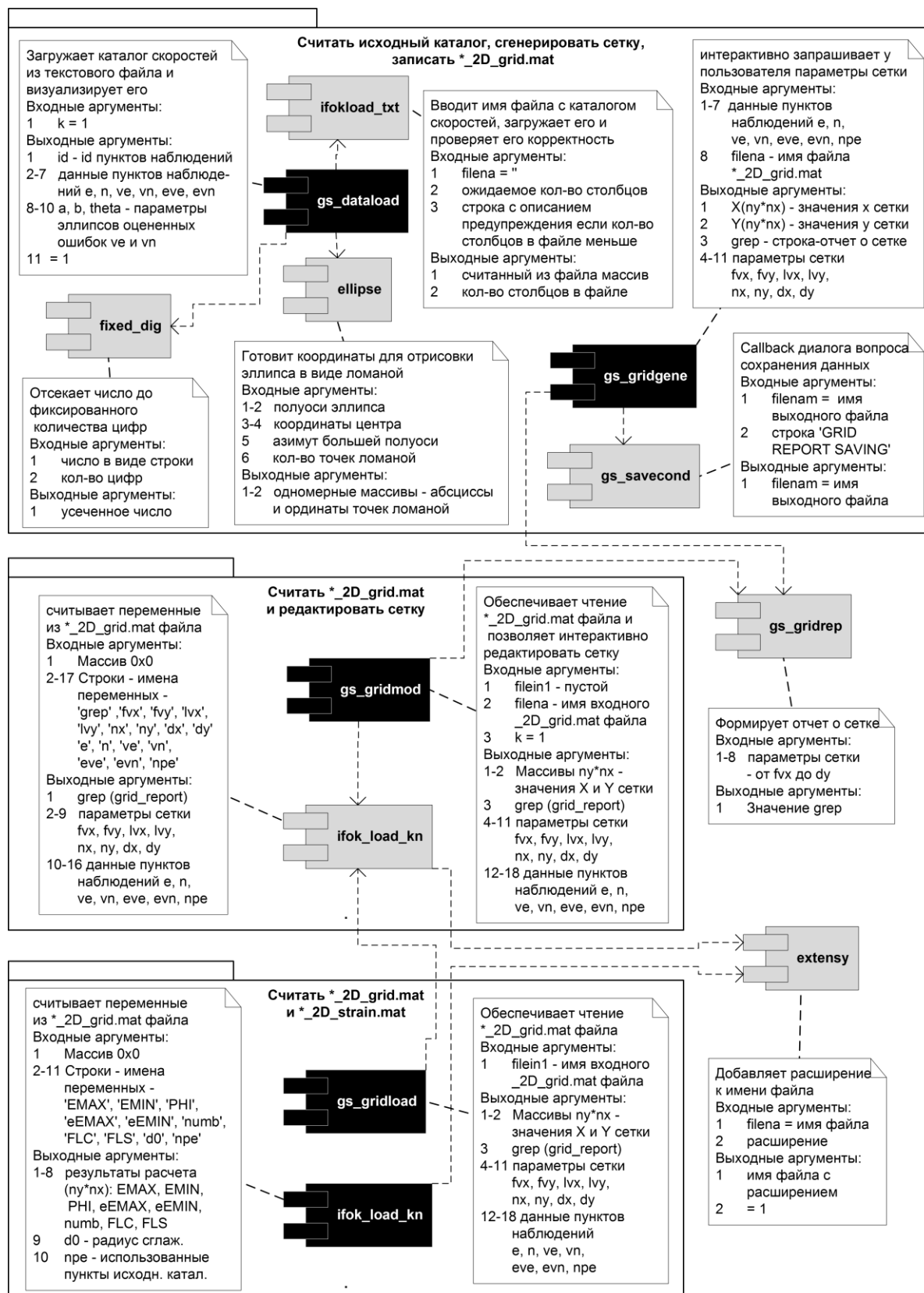


Рисунок 3 – Диаграмма компонентов программного пакета *grid_strain*.
Внутренняя структура пакетов загрузки данных и сохранения сетки

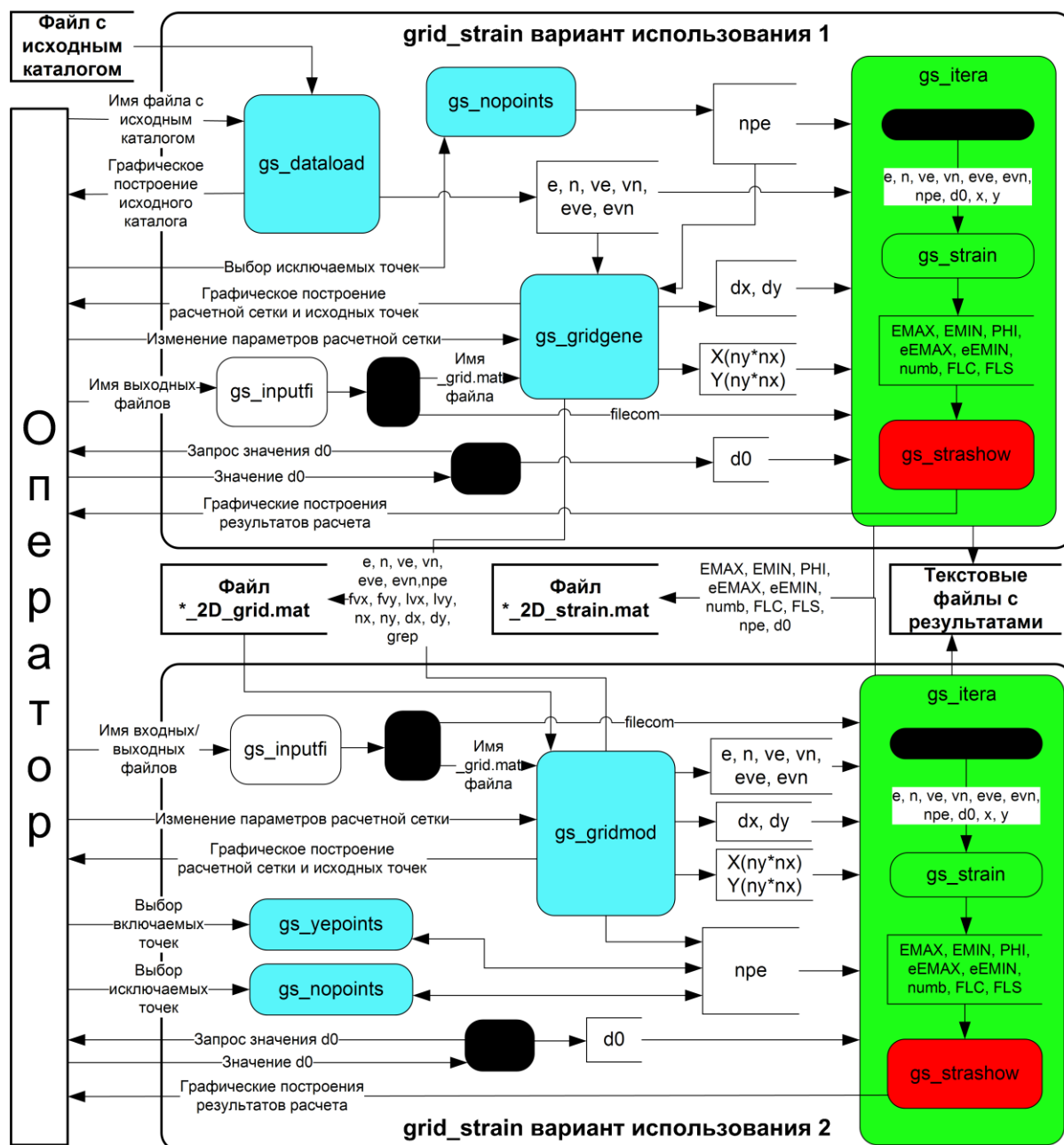


Рисунок 4 – Диаграмма потоков данных программного пакета *grid_strain* для двух вариантов использования. Черный цвет подпроцессов означает внутреннюю логику объемлющих процессов. Другими цветами показаны условные этапы обработки: подготовка исходных данных (бирюзовый), расчет поля скорости деформации (зеленый), визуализация результатов (красный)

По результатам анализа автором данной работы были заложены основы структуры нового программного пакета *SUR_GPS_STRAINS* [9]. В частности, в [10] приводится структурная модель ранней версии *SUR_GPS_STRAINS*, совместимая с *grid_strain* и *grid_strain3* по форматам промежуточных данных (файлов **_grid.mat* и **_strain.mat*). Впоследствии сравнительное тестирование *grid_strain/grid_strain3* и *SUR_GPS_STRAINS* показало, что:

1. *grid_strain/grid_strain3* на расчет значений тензоров скорости СДЗК тратят в несколько раз больше времени, чем *SUR_GPS_STRAINS*. Вероятно, это вызвано неэффективной реализацией численных алгоритмов в *grid_strain/grid_strain3*.

2. Результаты расчета *grid_strain3* и *SUR_GPS_STRAINS* для трехмерного случая отличаются.

Касательно этого различия было проведено исследование, показавшее, что при вызове функции *gs_strain3* из функции *gs_itera3* аргументы, которые должны содержать среднеквадратические отклонения скоростей точек наблюдений на самом деле содержат копию значений этих скоростей (одни и те же данные передаются одновременно в разных аргументах). Таким образом, можно отметить факт наличия в программном пакете *grid_strain3* версии от 25 мая 2008 года ошибки в реализации численных алгоритмов при расчете по трехмерной модели.

В конечном итоге автор работы постепенно перешел от использования в своих исследованиях пакетов *grid_strain* и *grid_strain3* к использованию собственного пакета *SUR_GPS_STRAINS*, дорабатывая его по мере возникновения новых требований.

Заключение. В данной работе предложен метод анализа интерфейса и взаимодействия компонентов программных пакетов, состоящих из скомпилированных р-файлов Matlab. Метод заключается в перехвате вызовов одних р-файлов из других за счет создания m-файлов-вращающих с такими же именами. Метод позволяет построить дерево вызовов и диаграмму компонентов исследуемой системы, а также путем анализа передаваемых между компонентами данных, по возможности, написать спецификации отдельных модулей системы и получить диаграмму потоков данных.

Предложенный метод успешно применен к программным пакетам *grid_strain* и *grid_strain3*, что позволило быстро разработать и начать использовать первую версию нового программного пакета *SUR_GPS_STRAINS*, впоследствии полностью заменившего проанализированные пакеты.

Приложение – листинг программы на языке Perl для создания функций-вращающих

Эта программа служит для автоматического создания функций-вращающих для данного набора скомпилированных р-файлов анализируемого программного пакета. Исходные р-файлы должны располагаться в директории *\$src_dir*. В ходе работы программы содержимое директории *\$work_dir* будет удалено и заменено на совокупность р-файлов и их вращающих. После этого нужно запустить анализируемый программный пакет таким образом, как если бы он был установлен в директорию *\$work_dir*.

```
$copy_command = 'copy >NUL 2>NUL';
$unlink_command = 'del /Q';
$rename_command = 'ren';
$shell_path_delim = "\\\";
$src_dir = "grid_strain";
$work_dir = "wrapper_grid_strain";
$call_tree_file_from_work_dir = 'call_tree.txt';
$max_nargin = 30;
$max_nargout = 30;
$max_array_height = 10;
$max_array_width = 20;
$max_string_length = 300;

# get list of names of *.p files
opendir GSD, $src_dir;
@gs_files = grep { /^.*\.p$/; } readdir GSD;
closedir GSD;

# clean and prepare work_dir
print "This script is about to delete all files in \"$work_dir\".\nType \"y\" to continue or anything else to abort\n";
die "aborted by user" unless <STDIN> eq "y\n";
system ($unlink_command . ' ' . $work_dir . $shell_path_delim . '.*.*');

foreach (@gs_files) {
    $funcname = $_;
```



```

$funcname =~ s/^(.*)\.p$/\1/;
system ($copy_command . ' ' . $src_dir . $shell_path_delim . $funcname . '.p'
        . ' ' . $work_dir . $shell_path_delim . $funcname . '.p.bak');
open MSCRIPT, ">" . $work_dir . $shell_path_delim . $funcname . ".m";
print MSCRIPT
"
function [varargout] = $funcname(varargin)\n

% fill call tree
global call_stack_depth call_tree cnt_run_$funcname
if(isempty(call_stack_depth))
    call_stack_depth = 0;
    call_tree = {};
    this_is_root_function = 1;
end

if isempty(cnt_run_$funcname)
    cnt_run_$funcname = 1;
else
    cnt_run_$funcname = cnt_run_$funcname + 1;
end
call_tree = {call_tree{:} , [repmat(' ', 1, call_stack_depth) , '$funcname']};
system(['echo \"', repmat(' ', 1, call_stack_depth) , '$funcname\" >>
$call_tree_file_from_work_dir']);
call_stack_depth = call_stack_depth + 1;

% display input args
if (cnt_run_$funcname <= 2)
    disp('=====')
    disp(sprintf('STARTING $funcname taking %d arguments. They are\\', nargin))
    format short
    for varargin_idx = 1:nargin
        disp(sprintf('\\name %d: %s\\', varargin_idx, inputname(varargin_idx)))
" . m_code_print_arg('varargin{varargin_idx}', 'varargin_idx') . "
    end
    disp('-----')
    pause
end

% replace m-file with p-file
system ('$rename_command $funcname.p.bak $funcname.p');
system ('$rename_command $funcname.m $funcname.m.bak');

% run p-file with input and output arguments of m-file
varargout = cell(1, nargin);
[ varargout{:} ] = $funcname ( varargin{:} );

% replace p-file with m-file
system ('$rename_command $funcname.p $funcname.p.bak');
system ('$rename_command $funcname.m.bak $funcname.m');

% write m-code that displays output args
if (cnt_run_$funcname <= 2)
    disp('-----')
    disp(sprintf('FINISHED $funcname producing %d results. They are\\', nargin))
    format short
    for varargout_idx = 1:nargout
" . m_code_print_arg('varargout{varargout_idx}', 'varargout_idx') . "
    end
    disp('=====')
    pause
end

% save call tree
if (this_is_root_function)
    fid = fopen('$call_tree_file_from_work_dir', 'w');
    for i=1:length(call_tree)
        fprintf(fid, '%s\\r\\n', call_tree{i});
    end
    fclose(fid);
end
call_stack_depth = call_stack_depth - 1;
";

    close MSCRIPT;
}

```

```
print "All operations complete\n";

sub m_code_print_arg {
    my ($var_name, $var_idx) = @_ ;
    return
    "
        max_idx_1 = size($var_name, 1);
        max_idx_2 = size($var_name, 2);
        disp(sprintf('\val  %d:  array %d x %d\'', $var_idx, max_idx_1, max_idx_2))
        if(ischar($var_name) && max_idx_1==1)
            disp('(displaying as string)')
            if(max_idx_2 > $max_string_length)
                max_idx_2 = $max_string_length;
            end
        else
            if(max_idx_1 > $max_array_height)
                max_idx_1 = $max_array_height;
            end
            if(max_idx_2 > $max_array_width)
                max_idx_2 = $max_array_width;
            end
        end
        end
        disp($var_name(1:max_idx_1, 1:max_idx_2))
    ";
}
```

Литература

1. Protect Your Source Code – Matlab & Simulink [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/pcode.html>
2. Дьяконов В.П. Matlab. Полный самоучитель [Текст] / Дьяконов В.П. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 768 с.
3. Складов Д. Искусство защиты и взлома информации [Текст] / Д. Складов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 288 с.
4. Russel J. Обратная разработка [Text] / J.Russel, R.Cohn // PoD. – 2012.–56 с.
5. Буч Г. Язык UML. Руководство пользователя [Текст] / Буч Г. – Изд. 2-е. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 496 с.
6. Калянов Г. Н. Структурный системный анализ [Текст] / Г. Н. Калянов. – М.: Лори, 1996. – 242 с.
7. Teza G. Grid_strain and grid_strain3: software packages for strain field computation in 2D and 3D environment [Text] / G. Teza, A. Pesci, A. Galgaro // Computers & Geosciences. – 2008. – Vol. 34. – P. 1142-1153.
8. Shen Z.-K. Crustal deformation across and beyond the Los Angeles basin from geodetic measurements [Text] / Z.-K. Shen, D. D. Jackson, B. X. Ge // Journal of Geophysical Research. – 1996. – Vol. 101. – P. 27957-27980.
9. А. с. № 2016610153. Программа для расчета деформаций земной коры по данным GPS-наблюдений SUR_GPS_STRAINS: программа для ЭВМ [Текст] / А.Н.Мансуров (KG); правообладатель Федеральное гос. бюджетное учреждение науки Науч. ст. Рос. академии наук в г. Бишкеке (НС РАН) (KG). заявка № 2015661945; заявл. 12.11.2015; опубл. 20.02.2016, Бюл. № 2(112), (Ч. 1.). 212 Кб.
10. Мансуров А. Н. Структурное проектирование автоматизированной системы расчета поля скорости деформации земной коры по данным GPS наблюдений [Текст] / А. Н. Мансуров // Проблемы автоматизации и управления. – 2012. – № 2. – С. 120–127.

УДК 681.3

*Н.Н. Цыбов, Кыргызский Государственный Университет Строительства
Транспорта и Архитектуры nikolay_research@mail.ru*

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ СРЕДСТВ ОТОБРАЖЕНИЯ БОЛЬШИХ ОБЪЕМОВ ВИЗУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИИ

В статье рассмотрены вопросы отображения информации и аспекты психофизиологических возможностей человека-оператора при приеме определенных объемов отображаемой информации. С целью создания новых средств отображения визуальной информации и решения проблем «режимов перегруженных мониторов» в статье рассмотрены возможность применения технологий отображения дополненной и смешанной реальности при проектировании средств отображения визуальной информации для интеллектуальных обучающих систем и вариант их реализации с применением оптических световодных устройств на базе фотонных кристаллов с управляемым размером «запрещенных энергетических зон».

Ключевые слова: средства отображения; обучающие системы; смешанная реальность; дополненная реальность; фотонные кристаллы.

Постановка задачи. Одним из действенных методов повышения эффективности образовательного процесса в высших учебных заведениях является применение автоматизированных интеллектуальных обучающих систем. Эффективность современного образовательного процесса также значительно зависит от оперативности вузов проводить своевременную модернизацию способов представления новых знаний, с учетом изменений в восприятии информационных потоков молодым поколением и обретении им мышления «нового типа» [1, 2]. Возможность восприятия современного студента характеризуется высокой скоростью обработки информации и повышенной эффективностью при представлении информации в «образном» виде. Современные специальные средства отображения визуальной информации систем «человек-машина» активно применяют зрительные и звуковые дисплеи, гаптические, тактильные и силовые дисплеи, а также различные индикаторы и счетчики. Но применительно к отображению информации для учебного процесса приоритет всегда остается за зрительными визуальными дисплеями и мониторами. Поэтому визуализация на сегодня, как способ представления информации в учебном процессе, занимает лидирующее положение. В связи с этим создание эффективных средств отображения визуальной информации для интеллектуальных автоматизированных обучающих систем является актуальной задачей.

Анализ существующих подходов к проектированию средств отображения визуальной информации.

Возможности визуального восприятия, обработки и запоминания информации человеком исследуются психологами с прошлого столетия. Результаты этих исследований весьма актуальны как при проектировании средств отображения визуальной информации, так и при формировании визуальных блоков информации в поле зрения человека. По мнению Ричарда Грегори среднестатистический человек воспринимает только 10 % поступающей информации, а недостающую информацию мозг человека достраивает, используя предыдущий опыт, который человек получил в процессе жизненного опыта.

При создании средств отображения визуальной информации немаловажное значение имеет грамотное использование комбинации цветов, насыщенности и формы [3, 4]. Эмоциональное воздействие цвета на подсознание человека, его настроение и сло-

жившиеся черты характера хорошо изучены Максом Люшером. Исследования Т. Саноки и Н. Сулмана дают возможность оптимизировать цветовое сочетание объектов при формировании информационных блоков. Согласно их исследованиям наиболее эффективное восприятие визуальной информации достигается при формировании контрастных изображений с гармоничными сочетаниями не более трех цветовых оттенков. При индивидуальном обучении с помощью изменения цветового представления информационных блоков появляется возможность благотворно влиять на психо-эмоциональное состояние обучающихся, например на сангвиника и холерика более благотворно влияют зеленый и голубой цвета, но отрицательно воздействуют на флегматика и меланхолика. Оптимизация параметров многофункциональных цветных индикаторов (мониторов) особенно важна при формировании цветовой палитры и оценки значений яркостного контраста для различных моделей ЖК-мониторов в условиях солнечной засветки [5].

Эффективность восприятия и запоминания визуальной информации при применении различных шрифтов (типографика) исследованы К. Ларсеном и Р. Пикардом. Проблемы и ограничения визуализации достаточно подробно изучены в работе «Проблемы визуализации больших данных» [6]. Психофизиологические характеристики процесса приема информации и передача количественной информации по зрительному, слуховому и тактильному каналам достаточно подробно представлены в файловом архиве студентов в работе [7].

Создание средств отображения визуальной информации при проектировании систем «человек-машина» предполагает разумное распределение функций между оператором и машиной. Оптимальность такого распределения возможна при соответствии характеристик программно-аппаратного средства (машины) психофизиологическим, антропометрическим, физиологическим характеристикам человека-оператора. При этом внедрение в учебный процесс средств отображения визуальной информации должно всегда учитывать гигиеническую составляющую, влияющую на утомляемость зрительного канала оператора [8–11].

Проектирование автоматизированных интеллектуальных обучающих систем не обходится без создания аналитических систем и информационных панелей, при разработке которых весьма актуальными становятся решения задач оптимального восприятия визуальной информации, а также задач исключения «режима перегруженных дисплеев». Решение этих задач требует от разработчиков учета психофизиологических возможностей восприятия человеком визуальной информации, а также учета возможностей программно-аппаратных средств отображения информации, а именно:

1. Увеличение объема и скорости обрабатываемой визуальной информации ужесточает требования к производительности программно-аппаратных средств за счет увеличения вычислительных ресурсов.

2. Увеличение объема и скорости обрабатываемой визуальной информации ограничиваются физиологическими возможностями оператора воспринимать информацию. В процессе увеличения объема и скорости изменения визуальной информации наступит момент, когда человек не успеет реагировать на изменения визуальных данных.

3. Ограничения на процесс восприятия человеком визуальных данных возникают при значительном увеличении размеров графических изображений, при которых человек уже не способен анализировать представленную ему визуальную информацию.

Но не все виды отображения визуальной информации пригодны при создании средств отображения смешанной и дополненной реальности. Рассмотрим основные технологии, применяемые при создании средств отображения визуальной информации.

OLED-технологии (*OLED* англ. organic light-emitting diode) позволяют создавать мониторы, в которых яркость контролируется попиксельно. Такие мониторы имеют

весьма малую толщину экрана, с малым энергопотреблением, с большими углами обзора, малыми искажениями и малым временем отклика пикселей при качественной цветопередаче и контрастности. Но в связи с высокой ценой и малым сроком службы в большинстве случаев разработчики мониторов отдают *LED*-технологиям (*LED* англ. light-emitting diode), отличающимися сравнительно не большой ценой и повышенной четкостью при одинаковом разрешении.

TN-матрицы (*TN* англ. Twisted – nematic), несмотря на их высокую надежность и малую стоимость имеют сравнительно низкую контрастность и цветопередачу, а также явно выраженный «колоршифт», (При колоршифте в зависимости от угла обзора монитора цвета меняются в зависимости от угла взгляда, в связи с чем мониторы на базе *TN*-матриц имеют малый угол обзора).

Недостатков, присущих *TN*-мониторам, лишены *IPS*-мониторы (*IPS* англ. In Plane Switching). В отличие от *TN*-мониторов, имеющих для получения цветов матрицы шесть бит на канал, *IPS*-мониторы имеют восемь бит на канал. В связи с этим имеют повышенную яркость, контрастность и четкость изображений. Но применения *IPS*-мониторов ограничено высокой стоимостью и весьма значительным временем отклика пикселей.

Создание средств отображения визуальной информации для автоматизированных интеллектуальных обучающих систем.

В условиях постоянно растущих объемов учебной информации интеллектуальные автоматизированные обучающие системы основной объем отображаемой информации передают, как правило, через средства визуального отображения. В связи с психофизиологическими возможностями человека-оператора при определенных объемах отображаемой информации для обучающегося (оператора) создаются «режимы перегруженных дисплеев», что приводит к снижению эффективности процесса обучения. Особенно это актуально для операторов, работающих в ситуационных центрах. В условиях больших объемов информационных потоков одним из вариантов оптимизации представления информационных блоков по визуальному каналу может быть использование технологий с применением дополненной и смешанной реальности, при которой формируется в поле зрения оператора отображение реального физического мира и дополнительная вспомогательная информация. По терминологии Константина Иванова, под смешанной реальностью понимают дополнение реальности виртуальностью со степенью дополнения 25 % и более.

Достоинством смешанной и дополненной реальности является возможность формировать вспомогательную информацию из реального физического мира. Применение смешанной реальности позволяет формировать в поле зрения оператора физические и цифровые объекты в режиме реального времени.

Технологии дополненной и смешанной реальности в настоящее время широко используются в таких областях, как медицина, полиграфия, маркетинг, реклама, видеонаблюдение в охранных ведомствах. В зависимости от вида отображаемой информации при проектировании мониторов для этих целей применяются различные видеоматрицы, имеющие выраженные качественные и экономические преимущества конкретно для определенных форм визуального отображения. Наиболее успешной реализацией технологий смешанной реальности являются работы HoloLens от Microsoft, выполненные на базе Windows 10 и предназначенные для применения в сфере игр, бизнеса, медицины и космических исследований. Устройствами, включающими в себя элементы смешанной реальности, также являются разработки Impression Pi, Magic leap, Sulon Q и Meta 2. Особый интерес представляет устройство Meta 2, которое подключается к компьютеру вместо монитора и позволяет отображать голографические двух- и трехмерные информационные блоки, а также имеет режим управления данными с помощью жестов и го-

лоса.

Одно из новых направлений создания средств отображения визуальной информации основано на применении оптических световодных устройств на базе фотонных кристаллов с управляемым размером «запрещенных энергетических зон». Фотонные кристаллы в настоящее время нашли применение не только при проектировании дисплеев, но и в других областях, таких как создание сред с отрицательным коэффициентом преломления, создание компактных волноводов с малыми потерями, создание низкороговых и беспороговых лазеров, создание оптических логических и запоминающих устройств, создание суперпризм.

Функционирование фотонных кристаллов можно сравнить с работой полупроводников в электрических цепях. В полупроводниках формируются разрешенные и запрещенные зоны для энергий носителей заряда. Аналогично полупроводникам в фотонных кристаллах формируются запрещенные и разрешенные зоны для энергий фотонов. Запрещенные и разрешенные зоны образуются в связи с тем, что в фотонном кристалле интенсивность стоячих волн с частотами, близкими к частоте запрещенной зоны, смещаются в разные области фотонного кристалла. При этом интенсивность поля низкочастотных волн концентрируется в области с большими коэффициентами преломления, а в области с низкими коэффициентами преломления концентрируется интенсивность поля высокочастотных волн.

При описании процессов в фотонных кристаллах применимы волновая теория и численные методы решения уравнений Максвелла. Вариантом реализации такого устройства отображения визуальной информации на базе фотонных кристаллов является «комплекс технических средств отображения информации дополненной и смешанной реальности» (патент КР №2028 от 31. 01. 2018) (см. рис. 1 и 2) [12].

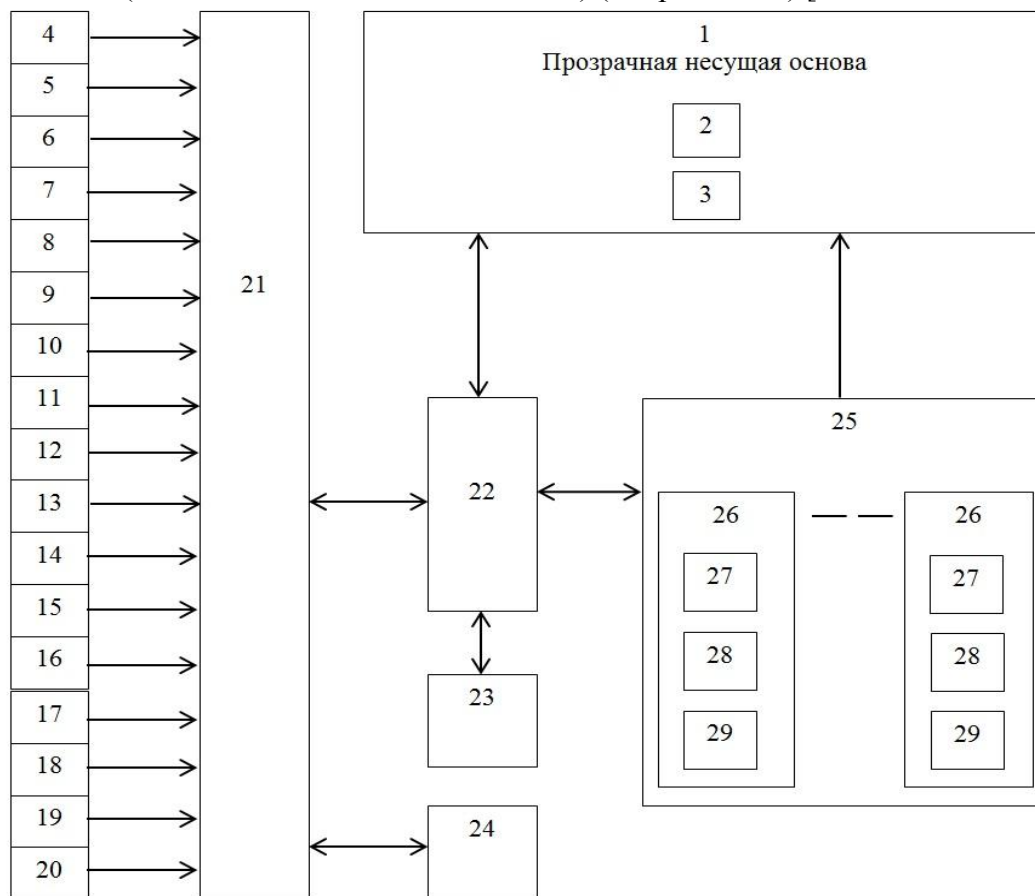


Рисунок 1 – Комплекс технических средств отображения информации дополненной и смешанной реальности

На рис. 1 изображено:

1 – прозрачная несущая основа; 2 – многосекционная оптическая среда на фотонных кристаллах с управляемым размером запрещенных зон; 3 – фотоэлектрические динамические пиктограммы; 4 – левая система контроля мимики, глазных яблок и зрачков; 5 – правая система контроля мимики, глазных яблок и зрачков; 6 – фронтальная видеокамера; 7 – левая видеокамера; 8 – правая видеокамера; 9 – видеокамера заднего вида; 10 – гироскоп; 11 – виртуальный прицел с приближением; 12 – дальномер с функцией определения направления ветра; 13 – прибор ночного видения; 14 – тепловизор; 15 – ультразвуковой сканер; 16 – сканер оптического излучения; 17 – ультрафиолетовый сканер; 18 – инфракрасный сканер; 19 – широкополосный электромагнитный сканер; 20 – распознавание свой-чужой; 21 – узел сбора данных; 22 – центральный процессор; 23 – коммуникационный порт; 24 – узел приема-передачи информации; 25 – активная многосекционная оптическая система корректировки и ввода изображения; 26 – узел ввода и коррекции информации; 27 – оптоэлектронный коммутатор; 28 – лазер проецирующий; 29 – лазер корректирующий.

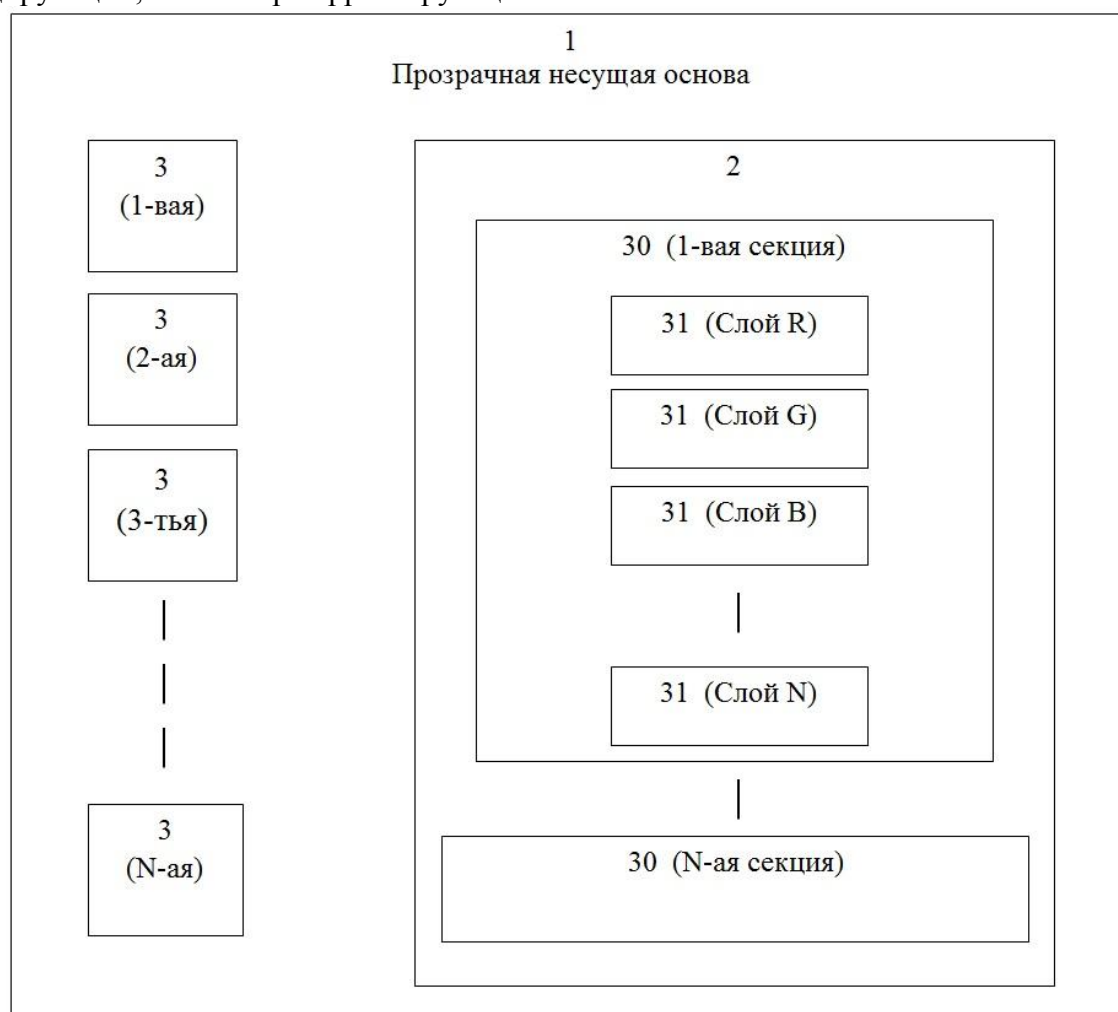


Рисунок 2 – Многосекционное устройство отображения

На рис. 2 изображено:

1 – прозрачная несущая основа; 2 – многосекционная оптическая среда на фотонных кристаллах с управляемым размером запрещенных зон; 3 – фотоэлектрические динамические пиктограммы; 30 – секции многосекционной оптической среды; 31 – слои секций многосекционной оптической среды.

Комплекс технических средств отображения информации дополненной и смешанной реальности относится к комплексам, содержащим оптические устройства с нелинейным распространением оптического сигнала. Предлагаемый комплекс наиболее эффективен при создании шлем-дисплеев, позволяющих наблюдать реальный физический мир и на его фоне дополнительную видеоинформацию.

Комплекс технических средств отображения информации дополненной и смешанной реальности в целом и его компоненты могут применяться при проектировании мониторов обучающих комплексов, шлемов для виртуальных игр и тренажеров, а также шлемов сил специального назначения. В отличие от имеющихся средств отображения виртуальной реальности предлагаемый комплекс кроме изображений виртуальной и дополненной реальности имеет возможность наблюдения реального мира в поле зрения оператора. В случае использования элементов комплекса для создания интеллектуальных обучающих систем многосекционное устройство визуального отображения на фотонных кристаллах с управляемым размером запрещенных зон решает проблемы «перегруженных мониторов». Это особенно актуально для операторов ситуационных центров. В условиях применения комплекса в ситуационных центрах, при формировании общего набора дополненных изображений, устранение «дублирования информации» от различных датчиков производится через коммуникационный порт. При этом формирование группового набора визуальной информации производится в зависимости от специализации члена команды ситуационного центра.

В отличие от устройств, описанных в работах [13, 14], применение многосекционной оптической среды на фотонных кристаллах позволило в данном комплексе избежать оптических дефектов, искажений цветопередачи и очертаний объекта в поле зрения ввиду отсутствия анизотропных зон в поле зрения.

Регулировка яркости изображения и корректировка оптических свойств системы в зависимости от условий окружающей среды осуществляется с помощью корректирующего инфракрасного лазера (см. рис. 1).

В комплексе предусмотрена возможность управления функциями системы и подключения необходимого набора датчиков с помощью мимики лица и глаз посредством активизации фотоэлектрических динамических пиктограмм (см. рис. 2).

Предлагаемый комплекс работает следующим образом (см. рис. 1 и 2).

Оператор наблюдает реальную визуальную информацию сквозь прозрачную основу, на которую нанесена многосекционная оптическая среда на фотонных кристаллах. Визуальная информация дополненной реальности формируется проецирующим лазером на матрице изображения, информация с которой проецируется в многосекционную оптическую среду на базе фотонных кристаллов с управляемым размером «запрещенных энергетических зон». При этом от каждой секции многосекционной оптической системы генерируются дополнительные изображения стандартной цветовой RGB структуры, которые накладываются на визуальную информацию. Оптическая среда на базе фотонных кристаллов с управляемым размером «запрещенных энергетических зон» представляет собой оптический фильтр с нелинейным распространением оптического сигнала, коэффициент преломления в пространственных направлениях которого регулируется интенсивностью проецирующего лазера, воздействующего на «запрещенные энергетические зоны».

В разработанном комплексе предусмотрена возможность сонастройки системы отображения с психофизиологическими характеристиками восприятия оператора. В зависимости от психотипа оператора средство отображения оптимизирует цветовое сочетание объектов при формировании информационных блоков. В зависимости от освещенности наблюдаемого поля зрения средство визуального отображения автоматически регулирует яркость и контрастность формируемого изображения.

Выводы

1. Применение оптических световодных устройств на базе фотонных кристаллов с управляемым размером «запрещенных энергетических зон» дало возможность формирования многослойного изображения дополненной и смешанной реальности от различных датчиков. При этом в поле зрения оператора возможно формировать дополнительные изображения от датчиков бокового обзора, заднего видения, ночного видения, тепловизора, датчиков инфракрасного и ультрафиолетового излучения. При этом цветовое сочетание информационных блоков, яркость и контрастность изображения учитываются в соответствии с условиями наблюдаемой среды и психофизиологическими особенностями восприятия оператора.

2. Проектирование средств отображения визуальной информации с применением оптических световодных устройств на базе фотонных кристаллов с управляемым размером «запрещенных зон» позволило создавать устройства, не имеющие выраженной зависимости оптических параметров от температуры окружающей среды, а также не имеющие анизотропных зон в поле зрения оператора, приводящих к оптическим дефектам и некоторому искажению цветопередачи и очертаний объекта в поле зрения [15, 16].

Литература

1. Бирюкова Л.В., Кожоголова А.К., Лыченко Н.М. Моделирование и разработка программных средств мониторинга и управления расписанием аудиторных занятий в вузе // Проблемы автоматизации и управления. – 2016. – № 2 (31). – С. 40-50.
2. Бримкулов У.Н., Жумабаева Ч., Барктобасов К., Майтыков Т. Система мониторинга движения учащихся школы «билим-агым-монитор» // Проблемы автоматизации и управления. – 2015. – № 1(29). – С. 276-285.
3. Агостон Ж. Теория цвета и её применение в дизайне. М.: Мир, 1992. – 120 с.
4. Никулова Г.А. Цветовое оформление учебных материалов и его влияние на восприятие информации // Вестник Пермского государственного педагогического университета. Сер. Информационные компьютерные технологии в образовании. – 2006. – № 2. – С. 77-84.
5. Костишин М.О., Жаринов И.О., Жаринов О.О. Исследование визуальных характеристик средств отображения пилотажнонавигационных параметров и геоинформационных данных в авионике // Информационно-управляющие системы. – 2014.
6. Агабейли А.Ф. Проблемы визуализации больших данных // Новые технологии и проблемы технических наук/Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции. Красноярск, 2014. 156 с.– Режим доступа: <http://izron.ru/articles/novye-tekhnologii-i-problemy-tekhnicheskikh-nauk-sbornik-nauchnykh-trudov-po-itogam-mezhdunarodnoy-n-sektsiya-20-informatsionnye-tekhnologii-spetsialnost-05-25-05/problem-vizualizatsii-bolshikh-dannykh> / (дата обращения 13.05.18).
7. Иванова Г.С. Психофизические особенности человека, связанные с восприятием, запоминанием и обработкой информации // Технология программирования: Учеб-

- ник для вузов. – Изд. 2-е, стереотип. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. – 320 с.
8. Степанова М. И., Сазанюк З.И., Лапонова Е.Д., Воронова Б.З., Лашнева И.П. Обоснование регламентов безопасного использования компьютеров с жидкокристаллическим монитором в процессе учебных занятий // Гигиена и санитария. Издательство «Медицина». – Москва, – 2014. – №1. – С. 108–110.
 9. Баранов А. А., Кучма В.Р., Сухарева Л.М., Степанова М.И., Текшева Л.М. Медико-профилактические основы безопасности использования информационно-коммуникационных технологий в образовательных учреждениях // Вестник РАМН. – 2010. – № 6. – С. 18–21.
 10. Кучма В. Р. Безопасность для детей современных информационно-коммуникационных технологий: состояние, гигиенические проблемы и пути их решения // Школа здоровья. – 2010. – №2. – С. 3–6.
 11. Мартиросова В. Г., Назаренко В.И., Сорокин В.М., Галинский А.Д. Физиолого-гигиеническая оценка излучения светодиодных источников света // Украинский журнал проблем медицины труда. – 2011. – № 2. – С. 27–35.
 12. Цыбов Н. Н., Сомов А.А., Шаршеналиев Ж.Ш. Пат. №2028 Кыргызская Республика, МПК G02F 1/35, G02F 1/01, G02F 1/29 Комплекс технических средств отображения информации дополненной реальности // – Бишкек. №20170069.1; заявл. 05.06.17; опубл. 28.02.18, интеллектуалдык менчик расмий бюл. №2/2018.- 6 с.
 13. Пат. US №7457040, В2, кл. G02В 27/14, 5/08, G09G 5/00, 2008) оптическое световодное устройство.
 14. Сомов А.А., Цыбов Н.Н., Тороев А.А., Янчевский В.И. Пат. №1607 Кыргызская Республика, МПК G01R 19/25 Оптическое световодное устройство // Бишкек. – №20120106.1; заявл. 29.11.12; опубл. 31.01.14, интеллектуалдык менчик расмий бюл. №1/2014.– 6 с.
 15. Глезер В.Д. Механизмы опознания зрительных образов. – М.: Наука, 1966. – 204 с.
 16. Зальцман А.Г. Особенности переработки зрительной информации в правом и левом полушариях головного мозга человека // Физиология человека. – 1990. – № 2. С. 135–148.

УДК: 681.511.42

Р. А. Акматбеков, nark@mail.kg; А. К. Конокбаева, aizik2787@gmail.com;

Ю. И. Каракай, avtomatika_nankr@mail.ru

Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР, г.Бишкек,

К РАЗРАБОТКЕ ЛАБОРАТОРНОЙ МОДЕЛИ ДВУХУРОВНЕВОЙ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ

Современные системы автоматизации и управления являются пространственно-распределенными. Пространственно-распределенные объекты встречаются почти во всех отраслях хозяйственно-экономической деятельности. Для решения различных вопросов разработки и проектирования распределенной системы автоматизации целесообразно создать ее лабораторную модель. В работе представлены сведения о разработке лабораторной модели двухуровневой распределенной системы автоматизации.

Ключевые слова: распределенная система автоматизации; физическая модель; двухуровневая система; центральный пункт управления; программируемый логический контроллер; GSM/GPRS модем; программа; лестничная логическая диаграмма; система программирования.

Введение. В жизнедеятельности людей имеет место большое количество объектов технической и нетехнической природы, которые имеют пространственно-распределенный характер. Примерами таких систем могут служить системы электрической связи, производства машиностроительной и горнорудной отраслей, системы передачи и распределения электрической энергии, системы экологической безопасности, системы метео- и сейсмомониторинга, транспортные системы и т. д.

Исследование, анализ и разработка систем автоматизации для пространственно-распределенных объектов являются чрезвычайно актуальными.

Современные системы автоматизации, в особенности распределенные системы автоматизации (РСА), строятся на дискретном элементном базисе. Таким образом, РСА являются цифровыми системами.

В РСА широко используется ПЛК (программируемый логический контроллер – Programmable Logic Controller). ПЛК представляет собой одну из разновидностей электронных вычислительных машин, которая предназначена для использования в системах автоматизации как устройство хранения, обработки информации и принятия решения. ПЛК конструктивно могут быть модульными или моноблочными. Модульность и программируемость ПЛК придает цифровым РСА важное свойство гибкости.

Моделирование систем управления и автоматизации позволяет проверить правильность теоретических расчетов и принятых проектных решений и обычно является последним этапом проектирования системы. Для успешной разработки РСА целесообразно иметь ее лабораторную модель, которая также позволяет ведение исследовательской и экспериментальной инженерной работы. В данной работе представлена разрабатываемая физическая лабораторная модель двухуровневой распределенной системы автоматизации.

Построение такой модели требует не только значительных усилий, но и материальных затрат.

Постановка задачи. Требуется разработать и построить физическую лабораторную модель РСА с учетом следующих требований [1, 2]:

1. Лабораторная модель должна иметь модульную структуру и состоять из двух частей: 1) физической модели объекта управления; 2) подсистемы автоматизации.
2. Установка должна быть переносной для демонстрации с выездом.
3. Установка должна отвечать требованиям электробезопасности.
4. Должны быть соблюдены условия электромагнитной совместимости.
5. Лабораторная модель должна быть ремонтируемой и доступной для обслуживания.
6. В качестве устройства для сбора, хранения, обработки информации и принятия решения следует использовать ПЛК.
7. В лабораторной модели должна быть реализована двухуровневая РСА с беспроводной системой связи между уровнями.

Лабораторная модель предназначена для обоснованного принятия проектных решений в следующих задачах:

1. Обоснование, выбор и компоновка технических средств РСА.
2. Разработка принципиальных и функциональных схем РСА.
3. Разработка типовых алгоритмов и программ ПЛК для сбора, преобразования, хранения, передачи и обработки информации в РСА.
4. Технико-экономическое обоснование (ТЭО) РСА.

Разработка типовых обеспечений РСА имеет научную и практическую ценность, т.к. позволяет адаптировать разработанные виды обеспечений в кратчайшие сроки при создании и реализации конкретных систем автоматизации и управления, сокращая тем самым сроки разработки и введения систем автоматизации в эксплуатацию.

Функциональная структура модели. Лабораторная модель представляет собой двухуровневую распределенную систему автоматизации (рис. 1), нижний уровень которого есть локальная система автоматизации (ЛСА), а верхний уровень – центральный пункт управления (ЦПУ). ЛСА реализуется на базе программируемого логического контроллера (ПЛК) и физической модели объекта управления, а ЦПУ – на базе персонального компьютера.

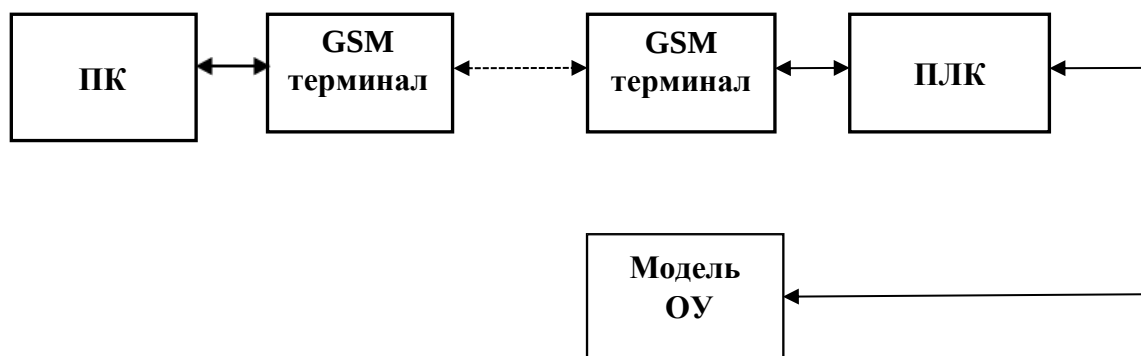


Рисунок 1 – Функциональная схема двухуровневой распределенной системы автоматизации: ПК – персональный компьютер, ПЛК – программируемый логический контроллер, GSM терминал – промышленный GSM/GPRS модем, ОУ – объект управления

Эти два уровня системы автоматизации должны быть связаны между собой с по-

мощью промышленных GSM терминалов, которые реализуют беспроводную линию связи для обмена информацией.

Датчики измерительной информации располагаются на лабораторной модели объекта управления и соединяются с ПЛК с помощью проводной линии связи. Компьютер ЦПУ может находиться в этом же помещении или в другом, удаленном от ЛСА, в принципе, на любое расстояние, т.к. GSM терминалы обеспечивают практически неограниченную дальность связи.

Аппаратурное обеспечение. Передача измерительной информации от датчиков к ПЛК, команд управления от ПЛК к ОУ выполняется с помощью одного из интерфейсов, которые преобразовывают информацию, поступающую от различных систем, к унифицированному виду: RS-232C (V.28), RS-422A (V.11, X.27), RS-423A (V.10, X26), RS-485 и V.35. Обмен данными между ПЛК и средствами визуализации осуществляется с помощью стандартных COM и USB портов, т.к. средства визуализации располагаются в непосредственной близости от ПЛК.

Для организации беспроводной связи между ЛСА и ЦПУ планируется использовать промышленный терминал Siemens TC65. TC65 – это внешний GSM/GPRS модем на базе модуля TC-65, представляющий собой легкое компактное устройство, выполненное в ударопрочном пластиковом корпусе. Предназначен для эксплуатации в жестких промышленных условиях, температурный диапазон работы: $-30^{\circ}\text{C} \dots +65^{\circ}\text{C}$. На передней панели размещены разъемы RS-232 и Micro-N-LOK, на задней – аудио разъем RJ11 для подключения телефонной трубки, разъем питания, SMA разъем для подключения внешней антенны, держатель SIM-карты с автоматическим выталкивателем и кнопка включения и выключения терминала. Диапазон напряжения питания: 8 В... 30 В; размеры: 130 x 90 x 38 мм; вес: менее 190 г. Для программирования и настройки модема используются AT-команды GSM 07.05 и GSM 07.07 (рис. 2).



Рисунок 2 – Промышленный GSM/GPRS модем Siemens TC65

ПЛК является устройством сбора, хранения информации и принятия решения, т.е. центральной частью системы автоматизации. Для создания системы автоматизации лабораторной модели используется ПЛК MINICONTROL базовой модели MCGE232-022 с модулем ЦП CP32 австрийской компании Industrie Elektronik GmbH (Berneker&Reiner) и/или ПЛК Micro 612-03 немецкой компании Schneider Automation AEG (рис.3).



Рисунок 3 – ПЛК MINICONTROL и Micro 612-03

Почему выбрано именно это оборудование: TC65, MINICONTROL и Micro 612-03? Это объясняется тем, что именно они имеются в распоряжении научной группы. Применение имеющегося оборудования с экономической позиции вполне оправдано, так как приобретение другого оборудования требует значительных затрат.

В качестве устройства программирования ПЛК используется персональный компьютер (ПЛК MINICONTROL, ПЛК Micro 612-03) или ручной пульт программирования ННР (ПЛК Micro 612-03), который имеется в стандартном комплекте поставки.

Модель объекта управления. Модель объекта управления воспроизводит (имитирует) в упрощенной форме процесс биологической очистки бытовых сточных вод (БСВ) [2, 6–9] и вместе с системой автоматизации образует нижний уровень РСА – локальную систему автоматизации (ЛСА).

В ЛСА решаются следующие задачи:

- 1) измерение, первичная обработка и контроль важных параметров;
- 2) управление компрессорами аэрации, электромагнитными вентилями и насосами;
- 3) хранение информации;
- 4) визуализация и сигнализация;
- 5) выгрузка информации в ЦПУ;
- 6) ведение журнала событий.

В модели к первоочередным задачам измерения и контроля относятся:

- 1) измерение и контроль уровня жидкой среды;
- 2) измерение и контроль температуры жидкой среды;
- 3) измерение и контроль кислотности жидкой среды;
- 4) измерение и контроль концентрации кислорода в жидкой среде.



Рисунок 4 – Внешний вид лабораторной модели объекта управления: вид сбоку



Рисунок 5 – Внешний вид лабораторной модели объекта управления: вид сверху

Все элементы модели ОУ размещены на прямоугольном полотне из ДСП. Для удобства перемещения полотно установлено на четыре ножки (рис. 4 и 5). Схема размещения элементов приведена на рис. 6:

- 1 – резервуар для очищенной воды;
- 2 – резервуар для БСВ;

- 3 – электромагнитный клапан ЭМК3;
- 4 – электрический насос ЭН4;
- 5 – электрический воздушный компрессор для аэрации ЭВК5;
- 6 – электромагнитный клапан для перекачки очищенной воды ЭМК6;
- 7 – электрический насос перекачки очищенной воды ЭН7;
- 8 – электромагнитный клапан подачи сточных вод ЭМК8.
- 9 – блок питания модели;
- 10 – контактный разъем;
- 11 – блок соединительных клемм;
- 12 – блок управления датчика уровня;
- 13 – блок светодиодных индикаторов.

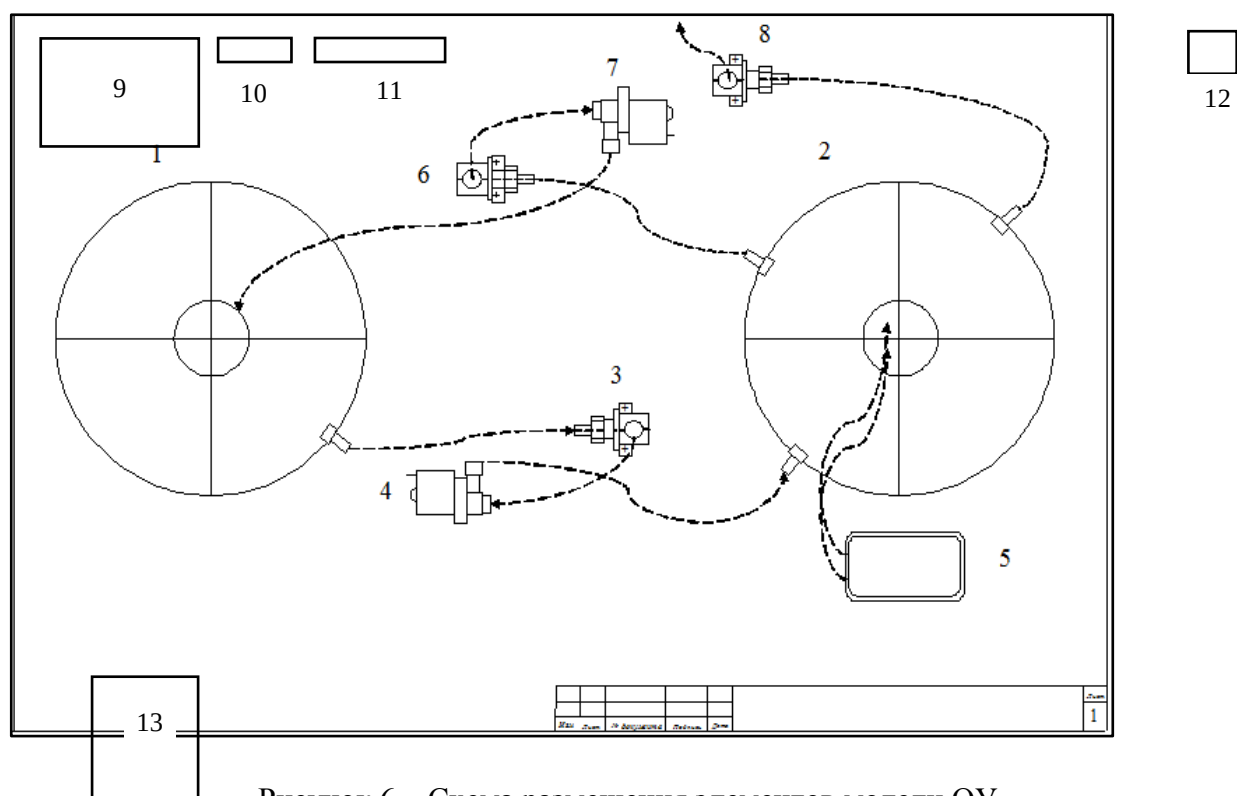


Рисунок 6 – Схема размещения элементов модели ОУ

Предусматривается два режима работы лабораторной модели.

В первом режиме предполагается, что БСВ поступают по трубопроводу подачи. В качестве БСВ используется водопроводная вода, которая подается посредством ЭМК8 в резервуар сточных вод 2. Подачей БСВ управляет ПЛК по состоянию датчика нижнего уровня. При достижении верхнего допустимого уровня по сигналу датчика ПЛК закрывает ЭМК8. Начинается цикл очистки, в течение которого измеряются температура, кислотность и концентрация кислорода БСВ. Длительность цикла очистки задается ПЛК. Для стимулирования процесса биологической очистки производится аэрация БСВ путем подачи воздуха с помощью ЭВК5, в результате чего БСВ насыщаются кислородом. Аэрация БСВ заканчивается за определенное время до завершения очистки, которое задается ПЛК. По окончании процесса биологической очистки открывается ЭМК6, включается ЭН7 и очищенная вода перекачивается в емкость очищенной воды – резер-

вуар 1. Откачка заканчивается по срабатыванию датчика нижнего уровня. Цикл очистки закончен, что отмечается ПЛК в журнале событий. Модель готова к очередному циклу очистки.

Второй режим предполагает, отсутствие возможности подключиться к водопроводу. Такая ситуация возможна при демонстрации модели с выездом. В этом случае источником БСВ служит резервуар 1. ПЛК по состоянию датчика нижнего уровня резервуара 2 открывает ЭМК3 и включает ЭН4. Таким образом выполняется перекачка воды из резервуара 1 в резервуар 2. При достижении верхнего допустимого уровня по сигналу датчика ПЛК закрывает ЭМК3 и выключает ЭН4. Начинается цикл очистки, в течение которого измеряются температура, кислотность и концентрация кислорода БСВ, а также производится аэрация БСВ путем подачи воздуха с помощью ЭВК5. Длительность цикла очистки задается ПЛК. По окончании процесса биологической очистки открывается ЭМК6, включается ЭН7 и очищенная вода перекачивается в емкость очищенной воды – резервуар 1. Откачка заканчивается по срабатыванию датчика нижнего уровня. Цикл очистки закончен. Модель переходит в режим готовности к следующему циклу очистки.

Модем ТС65 служит для передачи данных в ЦПУ и приема командных сигналов от ЦПУ.

Математическое обеспечение лабораторной модели. Лабораторная модель РСА должна иметь следующее математическое обеспечение:

- 1) алгоритмы и программы измерения и первичной обработки;
- 2) алгоритмы и программы контроля параметров;
- 3) алгоритмы и программы преобразования и хранения информации;
- 4) алгоритмы и программы визуализация и сигнализация;
- 5) алгоритмы и программы управления;
- 6) алгоритмы и программы обмена информацией с вышестоящим уровнем;
- 6) алгоритмы и программы обслуживания журнала событий.

Состояние разработки. К настоящему моменту физическая модель ОУ в основном построена: все необходимые элементы модели смонтированы на несущем основании, соединены. Каждый элемент модели протестирован в ручном режиме. Выполнены все электрические соединения согласно принципиальной электрической схеме (рис. 7). Установлены датчики уровня и температуры в резервуаре 2.

Для измерения и контроля уровня воды в резервуаре 2 используется изделие ННУ7G китайской компании C-Lin с тремя электродными датчиками и блоком реле на 220В, 5А. Блок реле служит для выработки команд управления уровнем воды и может работать автономно, но в настоящей разработке блок реле применяется лишь для питания чувствительных элементов, которые срабатывают при контакте с водой, и выработки сигналов для ПЛК. Первый электродный датчик ЭД1 (минимальный уровень L_0) устанавливается в нижней части емкости так, что указывает на наличие или отсутствие воды (БСВ). Если вода отсутствует, то ПЛК формирует команду на заполнение резервуара 2, открыв электромагнитный клапан ЭМК8 или ЭМК3 и соответствующие насосы в зависимости от режима работы. ПЛК формирует команду на отключение электромагнитного клапана и насоса при достижении максимального уровня воды (третий электродный датчика ЭД3, уровень $L_{\text{макс}}$). Датчик ЭД3 установлен вверху резервуара и указывает на верхний допустимый уровень, выше которого вырабатывается сигнал переполнения. Ниже датчика ЭД3 на 10 % устанавливается

датчик ЭД2 (уровень $L_{\min}$), который указывает на нижний допустимый уровень воды в емкости. Если уровень воды с $L_{\max}$ опускается до $L_{\min}$, то включаются клапан и насос для подачи воды. Датчики уровня подключаются к входам модуля (порта) ввода дискретных сигналов ПЛК через блок реле устройства ННУ7G. Датчики работают как двухпозиционные элементы: «вода есть» – логическая «1» – сигнал с блока реле равен 20 В, «воды нет» – логический «0» – сигнал с блока реле равен 0 В.

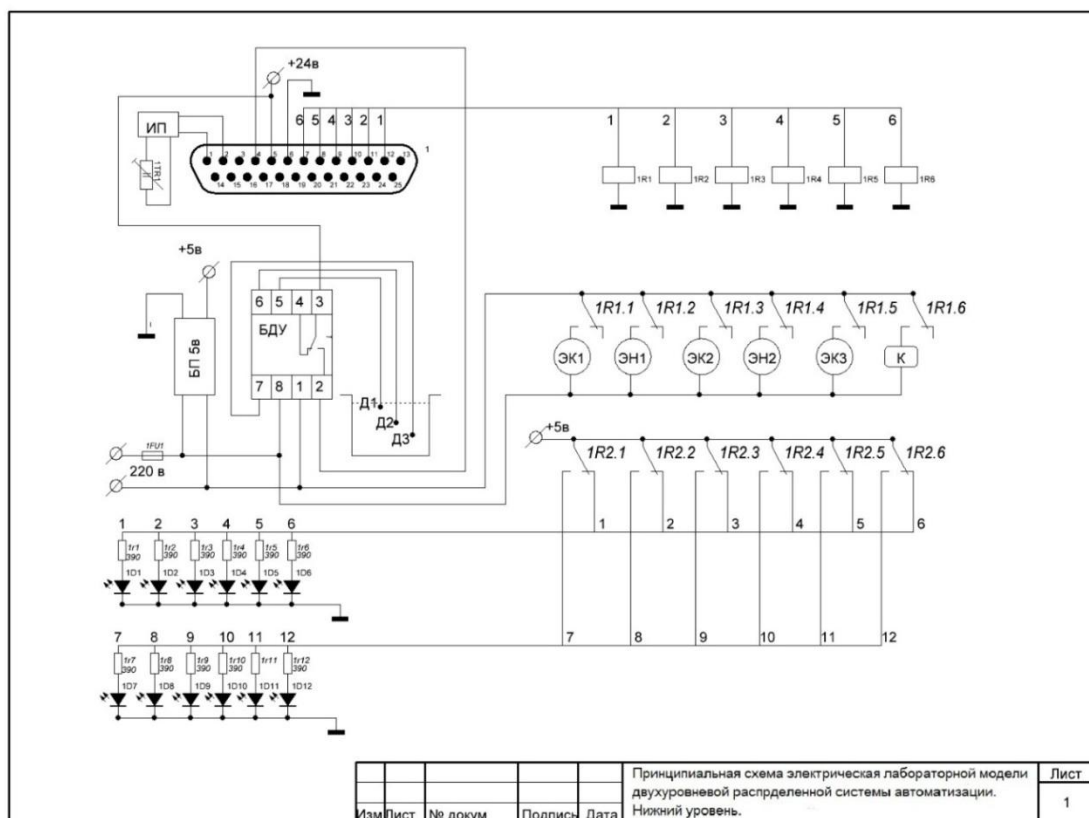


Рисунок 7 – Принципиальная электрическая схема модели ОУ

Разработана программа управления циклом очистки БСВ для ПЛК MINICONTROL в системе программирования ProSys на языке лестничных логических диаграмм LD для режима 1.

Строка 00 программы реализует команду на заполнение резервуара 2. Информация с ОУ о наличии БСВ в резервуаре поступает на вход I 030 модуля ввода дискретных сигналов. При отсутствии БСВ в резервуаре управляющее воздействие на включение ЭМК8 формируется на выходе О 020 модуля вывода дискретных сигналов. Командный сигнал дублируется также на О 021 (логическая 1) для блока светодиодных индикаторов.

Следующие три строки реализуют функциональный блок (ФБ) TOFF – таймер выключения, который используется для организации операции задержки. Задержка имитирует процесс очистки БСВ, с началом которого включается аэратор ЭВК5. По окончании процесса очистки дискретный выход О 022 отключает аэратор ЭВК5, а инверсный О 022 выход О 023 используется для перехода на строку 05, где дискретный выход О 024 включает ЭМК3 и насос ЭН4 для перекачки очищенных БСВ в резервуар 1. Цикл очистки БСВ закончен, модель переходит в режим ожидания следующего цик-



Рисунок 8 – Подсистема локальной автоматизации с ПЛК и ПК.

Заключение. Построена физическая лабораторная модель двухуровневой РСА с учетом сформулированных выше требований. Модель состоит из физической модели объекта управления, подсистемы локальной автоматизации с ПЛК и вышестоящего уровня в виде ЦПУ на персональном компьютере.

На сегодня на физическую модель установлены два датчика из пяти запланированных. Начаты практические работы по программированию лабораторной модели – разработана и протестирована программа управления работой модели в режимах 1 и 2.

Ведется работа по организации обмена информацией с парой модемов TC65, подключенных к разным удаленным друг от друга персональным компьютерам, для создания предпосылок организации связи между уровнями модели РСА.

Предстоит выполнить всю намеченную программу, отраженную в пункте «математическое обеспечение модели».

Литература

1. Акматбеков Р. А. Лабораторная модель установки биологической очистки / КГТУ им. И. Раззакова. – Бишкек: ИЦ «Текник», 2014, № 32. – С. 120–124.
2. Акматбеков Р. А. Распределенная система управления биологической очисткой бытовых сточных вод // «Известия НАН КР». – Бишкек: Илим, 2015, № 1. – С. 101–107.
3. Акматбеков Р. А., Конокбаева А. К. Информационное обеспечение распределенной системы автоматизации // Проблемы автоматизации и управления. – 2014, № 2 (27). – С. 109–114.
4. Конокбаева А. К. Программирование ПЛК MINICONTROL / Проблемы автоматизации и управления. – 2014. №2 (27). – С. 103–108.
5. Петров И. В. Программируемые контроллеры. Стандартные языки и приемы прикладного проектирования / Под ред. В. П. Дьяконова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2004. – 256 с.
6. Peter A. Wilderer, Robert L. Irvin, Mervin C. Goronszy. Sequencing Batch Reactor Technology. – London: TI International Ltd., 2001. – 96 p.
7. Kompaktkäranlage KOMBIBLOCK. – Burbach-Würgendorf: SI-Abwassertechnik Kammler, 2002. – 43 S.
8. Hardware Manual Minicontrol. – Bernecker und Rainer Industrie-Elektronik GmbH, 1997.
9. Standart Software user's Manual. – B&R Industrie-Elektronik GmbH, 1997.

Б.Т. Укуев, Б.Б. Назаров

Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова, Международный университет инновационных технологий, г. Бишкек. sos_research_man@mail.ru

ОБЗОР И АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫМИ АКТИВНО-АДАПТИВНЫМИ СИСТЕМАМИ

В статье рассматриваются истоки и сущность модернизации энергетики, описываются основные особенности инновационного развития энергетики в условиях перехода к интеллектуальной энергетике с элементами активно-адаптивных сетей. Делается вывод, что новые стратегические возможности управления на базе smart grid, технологий векторных измерений создают условия для перехода к новому этапу управления всеми видами ресурсов в энергетической системе Кыргызской Республики для быстрой адаптации к непрерывным изменениям передачи и потребления электроэнергии в рыночных условиях с соответствующим повышением конкурентоспособности энергетического и энерго-бизнеса. Применение средств искусственного интеллекта расширяет потенциальные возможности систем управления, позволяя реализовать управление объектами с неизвестной математической моделью, повысить их эффективность за счет включения в них процедур распознавания образов, планирования действий и накопления знаний.

Ключевые слова: интеллектуальная сеть; активно-адаптивные системы; инновация; энергетика; интеллектуальная энергетика; модель управления; интеллектуальная активно-адаптивная сеть; модель умного города.

Адаптация зарубежных проектов к условиям реализации на территории Кыргызской Республики на сегодняшний день является популярным направлением.

Иностранные компании предлагают оригинальные проектные решения высокого качества, которые востребованы отечественными организациями, в частности, в промышленном и жилищном строительстве. Однако полностью перенести их на кыргызскую действительность не представляется возможным, поскольку они основываются на требованиях, значительно отличающихся от принятых в нашей стране строительных норм и правил технического и нормативного характера.

Поэтому адаптацию зарубежных проектов к условиям реализации на территории Кыргызской Республики необходимо доверить профессионалам. На данный момент существует определенная схема электроэнергетики, которая представлена на рисунке 1.

Реализация проектов, разработанных иностранными компаниями, без привлечения специалистов по их адаптации к нашим условиям может повлечь за собой возникновение трудностей и рисков, поскольку требует необходимых профессиональных знаний, понимания деталей и их тщательной проработки, а также проведения дополнительных расчетов и разработки новых технических решений.

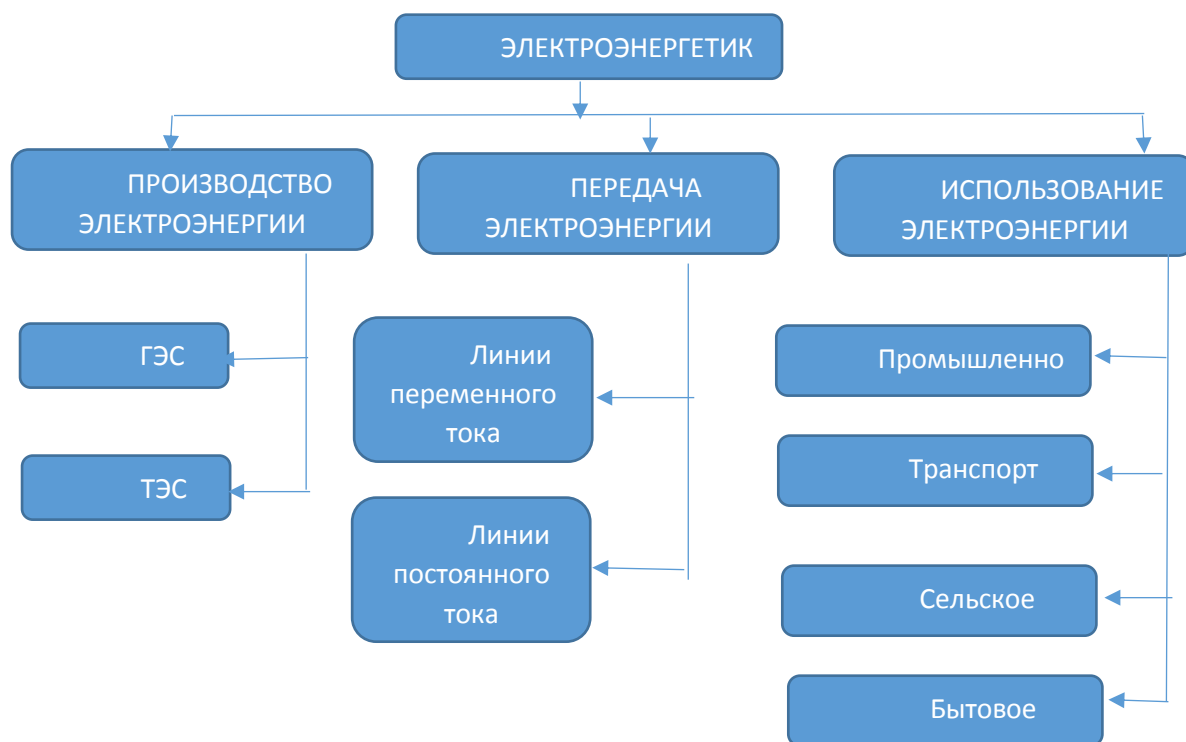


Рисунок 1 – Общая схема электроэнергетики

Например, компания ТВЕА при реализации проекта «Модернизация ТЭЦ Бишкека» обязана была по условиям контрактного соглашения подготовить проектно-сметную документацию в соответствии с внутренним законодательством Кыргызской Республики. Более того, по окончании строительства передать ПСД Заказчику. Однако, компания ТВЕА не выполнила указанные условия Соглашения. Пользуясь высоким положением своих «покровителей», не удосужилась даже провести адаптацию проекта.

Так, в ходе экспертизы были найдены проектные чертежи, абсолютно не адаптированные к нашему законодательству. Объем этих чертежей составил около 40% общего объема чертежей. Значит, компания ТВЕА строила два новых энергоблока на территории ТЭЦ Бишкека по не адаптированному проекту [1].

В 2015 г. Всемирный банк провел исследование системы централизованного теплоснабжения в стране, которое показало, что около 70 % оборудования в системе используется более 25 лет – что намного дольше, чем следовало бы. Проблема усугубляется еще и тем, что денежные средства, собираемые с домохозяйств за услуги центрального отопления, покрывают всего лишь 30 % стоимости выработки и распределения тепла. Сохраняя социально ориентированный тариф на теплоснабжение, правительство страны на протяжении многих лет могло осуществлять лишь текущий ремонт и модернизацию части оборудования, в том числе за счет привлечения льготного кредитного финансирования из международных финансовых институтов под государственную гарантию. Всемирный банк, совместно с другими партнерами по развитию, включая Азиатский банк развития и Евразийский банк развития, на протяжении многих лет оказывает финансовую помощь энергетическому сектору Кыргызской Республики [2].

Предлагаемая нами интеллектуальная электроэнергетическая система с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) представляет собой электроэнергетическую систему нового поколения, основанную на мультиагентном принципе организации и управления ее функционированием и развитием с целью обеспечения эффективного использования всех ресурсов (природных, социально-производственных и человеческих) для надежного и качественного энергоснабжения потребителей за счет гибкого взаимодействия всех ее субъектов (всех видов генерации, электрических сетей и потребителей) на основе современных технологических средств и единой интеллектуальной иерархической системы управления (рис. 2) [3–6, 10].

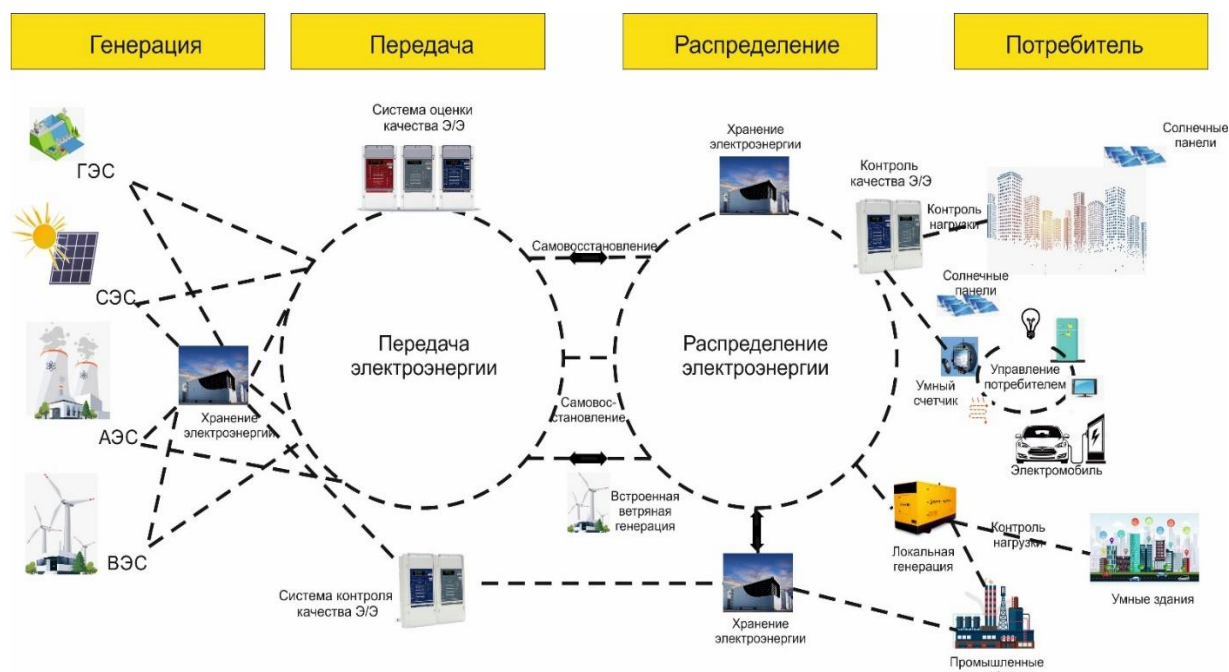


Рисунок 2 – Модель интеллектуальной энергосистемы

На современном этапе развития ЭЭС наряду с вопросами совершенствования технологий преобразования и передачи электроэнергии актуальны вопросы управления такими свойствами систем, как их экономичность, надежность, безопасность и живучесть. Каждое из перечисленных свойств рассматривалось и ранее, на предыдущих этапах развития ЭЭС, однако нередко в отдельности, без взаимосвязи между собой. В настоящее время рациональное решение задач перспективного развития, организации эксплуатации и технического обслуживания, оперативно-технологического управления возможно при комплексном учете и рассмотрении перечисленных свойств, определяющих качество функционирования энергосистем [7].

Концепция интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью подразумевает, что устройства, работающие в подобной сети, будут обладать достаточным быстродействием и интеллектуальной системой управления (СУ), чтобы реагировать на всевозможные возмущения и изменения режимов работы энергосистемы. Подобные функциональные возможности устройств позволят предотвращать нежелательные и аварийные режимы (рис 3).



Рисунок 3 – Участники интеллектуальной энергетической системы

Тестирование подобных устройств осложняется тем, что речь идет об устройствах, предназначенных для работы в составе единой взаимосвязанной энергосистемы, неполадки и аварии на одном из участков которой могут сказаться на работе всей системы в целом. Одним из эффективных подходов к разработке и отладке подобных устройств, их СУ, совместной работы СУ и силовой части является моделирование, которое может реализовать имитацию всевозможных режимов работы как самого устройства, его СУ, так и участка энергосистемы, в котором планируется установка [8].

Важным этапом, предшествующим моделированию, является разработка моделей и расчет их параметров. Очевидно, что в зависимости от требований, предъявляемых к быстродействию, функционалу и результатам моделирования, будут меняться и сами модели, каждая из которых будет иметь свои достоинства и недостатки. В основе моделирования лежит теория подобия, которая утверждает, что абсолютное подобие может иметь место лишь при замене одного объекта другим, точно таким же. При моделировании абсолютное подобие не имеет места. Исследователи стремятся к тому, чтобы модель достаточно хорошо отображала исследуемую сторону функци-

онирования объектов. На рис. 4 приведена общая классификация основных видов моделирования [9].

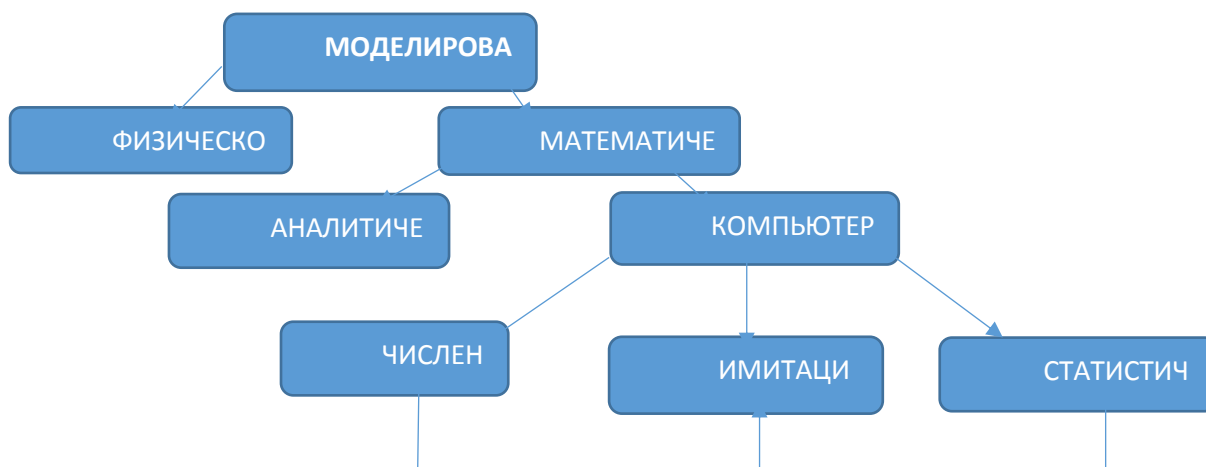


Рисунок 4 – Классификация видов моделирования

Современные электроэнергетические системы (ЭЭС) содержат большое количество элементов, имеют многообразные внутренние и внешние связи и требуют большого объёма информации для описания режимов их работы. Все это определяет целесообразность использования при управлении ЭЭС методов математического моделирования, реализуемых с использованием инновационных технологий [9].

Выводы. Цель работы – разработка модели управления интеллектуальными активно-адаптивными системами на основе системного подхода, позволяющей обеспечить эффективное управление активно-адаптивными системами электрической энергии при динамично меняющейся структуре.

Данная цель должна реализовываться решением следующих задач:

- анализ требований нормативной базы по нормированию и контролю ААС к построению модели электрической сети;
- выявление новых свойств в современных электрических сетях, влияющих на ААС;
- разработка принципов построения модели ААС;
- построение модели электрической сети для управления ААС.

Новая интеллектуальная энергетика приведет к формированию новых типов рыночных отношений между участниками процессов энергоснабжения, так как открывает новые возможности улучшения наблюдаемости энергосистемы и управления электрическими режимами, а также применения новых бизнес-моделей энергетической деятельности, которые будут изменяться по мере формирования возможности мониторинга, обработки и анализа потоковых данных как непрерывной цепочки сложных событий. В то же время выработка интеллектуального формата преобразования энергетики Кыргызстана с учетом перспективных задач управления сверхсложными системами может рассматриваться как интегрирующий элемент управления процессами модернизации широкого спектра секторов кыргызской

электроэнергетики. Результатом также является преодоление ранее существовавших ведомственных, организационных, информационных, технических и т.п. ограничений для эффективной и оперативной совместной (в том числе одновременной, параллельной) работы системных взаимосвязей.

Литература

1. Адаптация зарубежных проектов на территории Кыргызской Республики <https://vesti.kg/politika/item/55661-chertezhi-dlya-modernizatsii-tets-bishkeka-na-40-ne-byli-adaptirovany-pod-zakony-kr.html>.
2. Энергетика Кыргызстана: Настало время решительных мер <http://blogs.worldbank.org/europeandcentralasia/ru/energy-challenges-in-the-kyrgyz-republic> (дата обращения 15.11.2018).
3. Бердников Р.Н., Дементьев Ю.А., Моржин Ю.И., Шакарян Ю.Г. Основные положения концепции интеллектуальной энергосистемы с активно-адаптивной сетью // Энергия Единой сети №4 – 2012. С. 4–11.
4. Бураков М. Системы искусственного интеллекта: М.:Проспект,2017.– 440 с.
5. Дорофеев В.В., Макаров А.А. Активно-адаптивная сеть – новое качество ЕЭС России/В.В.Дорофеев, А.А Макаров // Энергоэксперт, 2009, № 4 (15). – С. 29–34.
6. Евменов В.П. Интеллектуальные системы управления. Либроком.: Изд-во Либроком, 2009. 304 с.
7. Скопинцев В.А. Качество электроэнергетических систем: надежность, безопасность, экономичность, живучесть. – М.: Энергоатомиздат, 2009.
8. Укуев Б.Т., Назаров Б.Б. Проблемы моделирования и управления интеллектуальными активно-адаптивными сетями // Проблемы автоматизации и управления. – 2018. – №1 (34). – С. 43–49.
9. Латинский Г.В. Построение и функционирование сложных систем управления. К.: Высш. шк., 2009. – 336 с.
10. Пупков К.А. Интеллектуальные системы: проблемы теории и практики // Изв. вузов. Приборостроение, 2004. Т.34. № 9. С.5–7.

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.3.011.31

С.Н. Верзунов, verzunov@hotmail.com

Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР

СПОСОБ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАТУШЕК ИНДУКТИВНОСТИ МАГНИТОМЕТРОВ И ЕГО РЕАЛИЗАЦИЯ НА ОСНОВЕ ПЛАТЫ СБОРА ДАННЫХ Л КАРД Е 502

В работе рассмотрен способ измерения параметров катушек индукционных магнитометров на основе известного метода преобразования полного комплексного сопротивления в напряжение и его реализация на основе платы сбора данных Л КАРД Е 502. Катушки индукционных магнитометров являются активными элементами, так как в них наводится значительная ЭДС индукции, оказывающая влияние на измерительные приборы. Для учета этой особенности предложено вычислять параметры катушки индуктивности таким образом, чтобы измеряемые значения полного комплексного сопротивления на разных частотах наилучшим образом соответствовали рассчитанным на основе выбранной схемы замещения.

Ключевые слова: магнитометр; измерение индуктивности; паразитная емкость; плата сбора данных.

Введение. Проблема измерения параметров электротехнических компонентов очень часто возникает при конструировании, наладке и ремонте различных измерительных систем. Например, во многих устройствах катушка индуктивности используется для получения резонансной цепи, настроенной на определённую частоту, применяется в электронных балластах питания, радиоприёмных устройствах, фильтрах разделения частот и так далее. Иногда помимо значения индуктивности крайне желательно знать ещё и паразитную ёмкость катушки, а также ее активное сопротивление потерь. Измерение этих параметров может иметь самостоятельное значение в ходе экспериментальных работ. К примеру, для измерений неэлектрических величин, таких как температура, влажность, давление, ускорение, часто применяют резистивные, емкостные и индуктивные приемные преобразователи, в этом случае параметры измеряют для оценки значений неэлектрических величин [1]. Наконец, проблема определения всех параметров катушки индуктивности возникает при моделировании поведения различных приборов и систем [2, 3], например индукционных магнитометров в измерительных системах.

Формулировка задачи. Для катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником применяются различные схемы замещения с сосредоточенными параметрами. Правильность результатов расчета электрической цепи, содержащей индуктивность, во

многим зависит от того, насколько выбранная схема замещения реальной катушки индуктивности соответствует принятым тем или иным допущениям и определяется влиянием побочных параметров на уравнения, связывающие между собой параметры режима работы и параметры схемы замещения при допущении идеальности источника ЭДС. Наиболее адекватной эквивалентной схемой замещения реальной катушки индуктивности является схема, показанная на рис. 1. Основным параметром это индуктивность L , а, побочные параметры – сопротивления потерь R_c , R_l и собственная емкость катушки C .

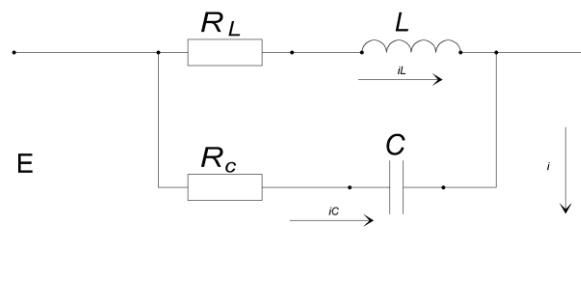


Рисунок 1 – Схема замещения катушки индуктивности.

Оценка использования других схем замещения реальной катушки индуктивности приведена в работе [4]. Физический смысл сопротивления катушки переменному току R_c заключается в учете потерь в изоляции проводов и каркасе катушки. Они, в свою очередь, складываются из потерь в диэлектрике межвиткового конденсатора (межвитковые утечки и прочие потери, характерные для диэлектриков конденсаторов) и потерь, обусловленных магнитными свойствами диэлектрика (эти потери аналогичны потерям в сердечнике). Потери в сердечнике складываются из потерь на вихревые токи, потерь на перемагничивание ферромагнетика – на «гистерезис». Как известно, переменное магнитное поле индуцирует вихревые ЭДС в окружающих проводниках, например, в сердечнике, экране и в проводах соседних витков. Возникающие при этом вихревые токи (токи Фуко) становятся причиной потерь из-за омического сопротивления проводников [5]. Следует заметить, что в общем случае, для современных катушек общего применения потери в диэлектрике чаще всего достаточно малы, но для катушек индукционных магнитометров, ввиду большого количества витков и значительной межвитковой ёмкости, могут достигать значительной величины.

Кроме того, катушки индукционных магнитометров могут содержать несколько сотен тысяч витков и поэтому обладают, как правило, значительным активным сопротивлением, достигающим нескольких десятков тысяч Ом, и заметной паразитной ёмкостью. Особое значение имеет еще и то, что в катушке магнитометра с большим числом витков под действием электрического поля промышленной электрической сети наводится значительная ЭДС индукции, амплитудой до нескольких вольт, оказывающая значительное воздействие на измерительные приборы, построенные по мостовой схеме, и приводит к большой погрешности или невозможности измерения отдельных параметров катушки индуктивности. Это обуславливает необходимость разработки более совершенного метода измерений параметров таких катушек индуктивности, позволяющего учесть эту особенность.

Необходимые теоретические сведения. Существуют три основных метода измерений: мостовой, резонансный и преобразования параметра во временной интервал или напряжение. При мостовом методе измеряемые полные сопротивления сравнивают с образцовыми сопротивлениями, отдельно регулируя действительную и мнимую части последних. Для сравнения используют четырехплечие, шестиплечие и трансформаторные мосты. Из-за сильных паразитных связей между элементами измерительных мостов такие приборы применяют преимущественно на низких частотах, например 1 кГц . При резонансном методе измеряемые реактивные параметры замещают образцовой емкостью, а потери определяют расчетным путем по изменению добротности измерительного контура. Измерители добротности позволяют измерять параметры L , C , R в широком диапазоне частот – от десятка килогерц до долей гигагерц со значительной основной погрешностью 2–10 % и более [6].

Метод преобразования измеряемого параметра в напряжение в простейшем случае реализуют с помощью цепи, состоящей из измеряемого и образцового резистора, подключенной к источнику образцового напряжения. Измеряемое комплексное сопротивление катушки оценивают по падению напряжения на одном из резисторов. В микропроцессорных измерителях может быть получена погрешность 0.1 % в диапазоне частот 100 Гц... 10 МГц. Таким образом, измерители с преобразованием измеряемого сопротивления в напряжение имеют погрешность, соизмеримую с погрешностью мостовых схем, но значительно проще по структуре. Очень важно, что такие измерители содержат образцовые элементы только в виде резисторов, в то время как в мостовых измерителях необходимы и образцовые конденсаторы [7].

Для реализации метода преобразования необходима микропроцессорная система, поэтому приборы подобного типа появились значительно позже, чем мосты и измерители резонансного типа и считаются наиболее перспективными приборами. Традиционная структурная схема такого прибора показана на рис. 2. Измеряемое сопротивление Z_x образует последовательную цепь с резистором R и образцовым резистором R_0 , включенным в цепь отрицательной обратной связи операционного усилителя $A1$. Гармоническое напряжение питания формируется с помощью ФНЧ из меандра, вырабатываемого генератором G .

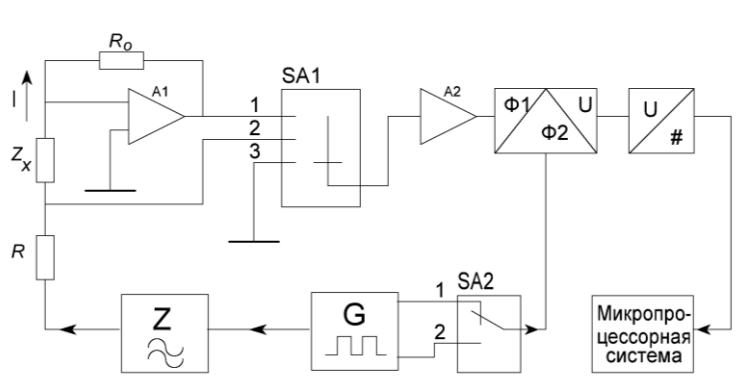


Рисунок 2 – Микропроцессорная система измерения параметров катушки индуктивности.

При большом коэффициенте передачи усилителя можно считать, что его входное напряжение практически равно нулю. Если входной ток усилителя пренебрежимо мал

по сравнению с током I цепи, то можно записать $U_{Z_x} = IZ_x = IZ_x e^{j(\varphi_x + \varphi_l)}$, где φ_x и φ_l – фазовые углы комплексного сопротивления Z_x и тока I . Исключая ток, получается, что

$$Z_x = -R_0 U_{zx} / U_{R0},$$

откуда следует, что полное сопротивление можно определить по отношению напряжений, причем результат не зависит от амплитуды тока и от сопротивления R .

Процесс измерений состоит из четырех тактов, осуществляемых при положениях 1,1; 1,2; 2,1; 2,2, управляемых микропроцессорной системой переключателей SA1 и SA2.

В первом такте ко входу фазового детектора подводят усиленное напряжение $KU_{R0} = -KIR_0 e^{j\varphi_l}$, где K – коэффициент усиления усилителя переменного напряжения A2. В качестве опорного используют напряжение в форме меандра с первого выхода генератора G с фазовым углом φ_r . Выходное напряжение фазового детектора $U_{o1} = -K_1 IR_0 \cos(\varphi_l - \varphi_r)$, где K_1 – общий коэффициент передачи усилителя A2 и фазового детектора. С помощью АЦП напряжение U_{o1} преобразуют в число $n_1 = -K_2 IR_0 \cos(\varphi_l - \varphi_r)$, где K_2 – коэффициент передачи, а затем фиксируют в ОЗУ. Подобным образом преобразуют результаты измерений и в остальных тактах. Во втором такте используют опорное напряжение со второго выхода генератора, сдвинутое на $\pi/2$ по сравнению с напряжением с первого выхода. Следовательно, $n_2 = -K_2 IR_0 \sin(\varphi_l - \varphi_r)$. В третьем и четвертом тактах

$$n_3 = K_2 IZ_x \cos(\varphi_l - \varphi_r + \varphi_x),$$

$$n_4 = K_2 IZ_x \sin(\varphi_l - \varphi_r + \varphi_x)$$

также фиксируют в ОЗУ.

По окончании последнего такта микропроцессорная система (МПС) вычисляет параметры измеренного комплексного сопротивления. Например, для последовательной схемы замещения $Z_x = R_x + jX_x$:

$$R_x = Z_x \cos \varphi_x = \frac{n_1 n_3 - n_2 n_4}{n_1^2 + n_2^2};$$

$$X_x = Z_x \sin \varphi_x = \frac{n_2 n_3 - n_1 n_4}{n_1^2 + n_2^2}.$$

Используя соответствующие формулы, микропроцессорная система может рассчитывать любые параметры комплексного сопротивления: емкость, индуктивность, добротность, тангенс угла потерь, постоянную времени, модуль и фазу комплексного сопротивления, а также параметры схемы замещения [8].

Предлагаемое решение и его теоретическое обоснование. Таким образом, устройство для реализации способа преобразования полного сопротивления в напряжение состоит из таких основных узлов, как генератор, АЦП, фазовый детектор и МПС. Все эти узлы могут быть заменены устройством сбора данных E502 производства «ЛКард» и программным обеспечением, осуществляющим сбор и анализ данных. Устройство сбора данных Л Кард E502, представляющее собой универсальный 16 битный модуль ввода/вывода до 32-х аналоговых и 17-ти цифровых сигналов в

компьютер через интерфейсы USB 2.0 (high-speed) и Ethernet (100 Мбит) с частотой преобразования до 2 МГц и возможностью их цифровой обработки в реальном времени. Кроме того, ООО «Л Кард» приветствует интеграцию своих модулей в различные системы [9].

Структурная схема предлагаемого устройства показана на рис. 3. Так как амплитуда напряжения ЦАП задается программно и АЦП имеет программируемые

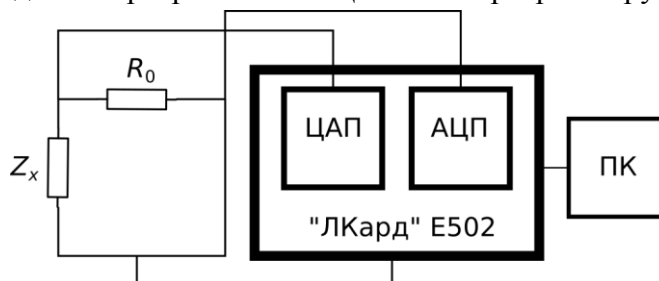


Рисунок 3 – Устройство для измерения параметров катушки индуктивности на базе платы сбора данных Л Кард E502.

пределы измерения, необходимость в операционном усилителе отсутствует, и формула для вычисления полного комплексного сопротивления в связи с этим имеет вид:

$$Z_x = R_0(U_{zx} - U_{R0}) / U_{R0}. \quad (1)$$

Напряжение U_{zx} генерируется ЦАП устройства в режиме синхронного циклического вывода с аппаратно заданной частотой дискретизации, амплитуда, частота и фаза при этом известны, т.к. задаются программно, так что:

$$U_{zx} = A_0 \sin(2\pi \nu t_0 + \varphi_0), \quad (2)$$

где A_0 – амплитуда; ν – частота; φ_0 – фаза U_{zx} ; $t_0=0, \Delta_0, 2\Delta_0, 3\Delta_0, \dots, \varphi_0=0$. В формуле (2) возникает задача определения амплитуды и фазы измеренного с помощью АЦП напряжения U_{R0} , которое можно представить в виде модели

$$\hat{U}_{R0}(t_1) = A_1 \sin(2\pi \nu t_1 + \varphi_1), \quad (3)$$

где A_1 – амплитуда; ν – частота; φ_1 – фаза напряжения $\hat{U}_{R0}$; $t_1=0, \Delta_1, 2\Delta_1, 3\Delta_1, \dots, p\Delta_1$, где Δ_1 – известная частота дискретизации АЦП. Среднеквадратическая ошибка модели равна

$$E_p = \frac{1}{2} (U_{R0,p} - \hat{U}_{R0,p})^2 = \frac{1}{2} e_p^2, \quad (4)$$

где $p=1, 2, \dots, n$ – количество измерений U_{R0} .

Для нахождения A_1 и φ_1 таких, чтобы ошибка (4) была минимальна, нужно ввести определение суммарной среднеквадратической ошибки:

$$\Omega_n = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n E_p = \frac{1}{2n} \sum_{p=1}^n e_p^2 = \frac{1}{2n} \sum_{p=1}^n (U_{R0} - \hat{U}_{R0})^2.$$

Тогда задача определения амплитуды и фазы напряжения записывается как

$$\Omega_n \rightarrow \min_w,$$

где $w = \{A_1 \text{ и } \varphi_1\}$ – параметры модели (3) и она представляет собой типичную задачу многомерной оптимизации, при этом параметры модели находятся по итерационной формуле

$$w_{k+1} = w_k + \alpha_k \rho_k, \quad (5)$$

где w_k – параметры модели на предыдущей итерации k ; w_{k+1} – обновленные параметры модели; α_k – длина шага; $\rho_k = -B_k^{-1} \frac{\partial L_n}{\partial w_k}$, где B_k – приближенное значение Гесса.

Параметры α_k , B_k находятся на каждой итерации по методу Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно [8].

Для использования формулы (5) необходимы частные производные суммарной среднеквадратической ошибки

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Omega}{\partial w} &= \frac{1}{2n} \sum_{p=1}^n \frac{\partial E_p}{\partial w} = \frac{1}{2n} \sum_{p=1}^n \frac{\partial E_p}{\partial \hat{U}_{R0,p}} \frac{\partial \hat{U}_{R0,p}}{\partial w} = \\ &= \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n -\left(U_{R0,p} - \hat{U}_{R0,p}\right) \frac{\partial \hat{U}_{R0,p}}{\partial w} = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^n -e_p \frac{\partial \hat{U}_{R0,p}}{\partial w}. \end{aligned}$$

Частная производная по амплитуде и фазе соответственно равна

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{U}_{R0,p}}{\partial A_1} &= \sin(2\pi \nu_1 + \varphi_1), \\ \frac{\partial \hat{U}_{R0,p}}{\partial \varphi_1} &= A_1 \cos(2\pi \nu_1 + \varphi_1). \end{aligned}$$

Вычисления продолжаются до достижения заданной точности ε определения параметров A_1 и φ_1 , то есть тех пор, пока два последовательно полученных по итерационной формуле (5) значения амплитуды и фазы не будут отличаться друг от друга менее чем на ε .

Найдя с помощью формулы (5) значения A_1 и φ_1 , можно вычислить $U_{R0} = A_1 e^{i\varphi_1}$ и затем по формуле (1) найти Z_x . Таким образом, для множества заданных частот может быть найдено соответствующее значение Z_x .

Комплексное сопротивление схемы замещения, показанной на рис.1, равно

$$\begin{aligned} \hat{Z}_x(\omega) &= \frac{(i\omega L + R_L) \left(\frac{1}{i\omega C} + R_C \right)}{i\omega L + R_L + \frac{1}{i\omega C} + R_C}, \\ \operatorname{Re}(\hat{Z}_x) &= \frac{(C^2 L^2 R_C) \omega^4 + (C^2 R_C^2 R_L + C^2 R_C R_L^2) \omega^2 + R_L}{(C^2 L^2) \omega^4 + (C^2 R_C^2 + 2C^2 R_C R_L + C^2 R_L^2 - 2LC) \omega^2 + 1}, \\ \operatorname{Im}(\hat{Z}_x) &= \frac{(C^2 L R_C^2 - C L^2) \omega^3 + (L - C R_L^2) \omega}{(C^2 L^2) \omega^4 + (C^2 R_C^2 + 2C^2 R_C R_L + C^2 R_L^2 - 2LC) \omega^2 + 1}, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\omega = 2\pi\nu$. Среднеквадратическая ошибка равна:

$$E_s = \frac{1}{2} \left(\left[\operatorname{Re}(Z_{x,s}) - \operatorname{Re}(\hat{Z}_{x,s}) \right]^2 + \left[\operatorname{Im}(Z_{x,s}) - \operatorname{Im}(\hat{Z}_{x,s}) \right]^2 \right) = \frac{1}{2} \left(\operatorname{Re}(\mathbf{e}_s)^2 + \operatorname{Im}(\mathbf{e}_s)^2 \right),$$

где $s=1, 2, \dots, m$ – количество измерений $\mathbf{Z}_s$. Суммарная среднеквадратическая ошибка равна

$$L_m = \frac{1}{m} \sum_{s=1}^m E_s = \frac{1}{2m} \sum_{s=1}^m (\text{Re}(\mathbf{e}_s)^2 + \text{Im}(\mathbf{e}_s)^2) = \frac{1}{2m} \sum_{s=1}^m \left[\text{Re}(\mathbf{Z}_{x,s}) - \text{Re}(\hat{\mathbf{Z}}_{x,s}) \right]^2 + \left[\text{Im}(\mathbf{Z}_{x,s}) - \text{Im}(\hat{\mathbf{Z}}_{x,s}) \right]^2. \quad (7)$$

Тогда задача определения параметров катушки индуктивности записывается как

$$L_n \rightarrow \min_v,$$

где $w=\{L, C, R_c, R_l\}$ – параметры катушки индуктивности в формуле (6) и представляет собой также задачу многомерной оптимизации, при этом параметры модели находятся по той же итерационной формуле (5). Частные производные суммарной среднеквадратической ошибки в этом случае равны

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial v} &= \frac{1}{2m} \sum_{s=1}^m \frac{\partial E_s}{\partial v} = \frac{1}{2m} \sum_{s=1}^m \left(\frac{\partial E_s}{\partial \text{Re}(\hat{\mathbf{Z}}_{x,s})} \frac{\partial \text{Re}(\hat{\mathbf{Z}}_{x,s})}{\partial v} + \frac{\partial E_s}{\partial \text{Im}(\hat{\mathbf{Z}}_{x,s})} \frac{\partial \text{Im}(\hat{\mathbf{Z}}_{x,s})}{\partial v} \right) = \\ &= \frac{1}{m} \sum_{s=1}^m \left[\left(\text{Re}(\mathbf{Z}_{x,s}) - \text{Re}(\hat{\mathbf{Z}}_{x,s}) \right) \frac{\partial \text{Re}(\hat{\mathbf{Z}}_{x,s})}{\partial v} + \left(\text{Im}(\mathbf{Z}_{x,s}) - \text{Im}(\hat{\mathbf{Z}}_{x,s}) \right) \frac{\partial \text{Im}(\hat{\mathbf{Z}}_{x,s})}{\partial v} \right] = \\ &= \frac{1}{m} \sum_{s=1}^m \left(\text{Re}(\mathbf{e}_s) \frac{\partial \text{Re}(\hat{\mathbf{Z}}_{x,s})}{\partial v} + \text{Im}(\mathbf{e}_s) \frac{\partial \text{Im}(\hat{\mathbf{Z}}_{x,s})}{\partial v} \right). \end{aligned}$$

И, в частности:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \text{Re}(\hat{\mathbf{Z}})}{\partial L} &= \frac{2C\omega^2 C^3 L R_c^3 \omega^4 + C^3 L R_c^2 R_l \omega^4 - C^2 L^2 R_c \omega^4 + C^2 R_c^2 R_l \omega^2 + C^2 R_c R_l^2 \omega^2 + C L R_c \omega^2 - C L R_l \omega^2 + R_l}{C^2 L^2 \omega^4 + C^2 R_c^2 \omega^2 + 2C^2 R_c R_l \omega^2 + C^2 R_l^2 \omega^2 - 2C L \omega^2 + 1^2}, \\ \frac{\partial \text{Re}(\hat{\mathbf{Z}})}{\partial C} &= - \frac{2\omega^2 C^2 L^3 R_c \omega^4 + C^2 L R_c^2 R_l \omega^2 + C^2 L R_c R_l^2 \omega^2 - C L^2 R_c \omega^2 + C L^2 R_l \omega^2 + C R_c R_l^2 + C R_l^3 - L R_l}{C^2 L^2 \omega^4 + C^2 R_c^2 \omega^2 + 2C^2 R_c R_l \omega^2 + C^2 R_l^2 \omega^2 - 2C L \omega^2 + 1^2}, \\ \frac{\partial \text{Re}(\hat{\mathbf{Z}})}{\partial R_c} &= \frac{\omega^2 C^2 R_l^2 + 2R_c C^2 R_l + C^2 L^2 \omega^4}{\omega^2 C^2 R_c^2 + 2C^2 R_c R_l + C^2 R_l^2 - 2L C + C^2 L^2 \omega^4 + 1} - \\ &- \frac{\omega^2 2C^2 R_c + 2C^2 R_l R_l + \omega^2 C^2 R_c^2 R_l + C^2 R_c R_l^2 + C^2 L^2 R_c \omega^4}{\omega^2 C^2 R_c^2 + 2C^2 R_c R_l + C^2 R_l^2 - 2L C + C^2 L^2 \omega^4 + 1^2}, \\ \frac{\partial \text{Re}(\hat{\mathbf{Z}})}{\partial R_l} &= \frac{-C^4 L^2 R_c^2 \omega^6 + C^4 R_c^4 \omega^4 + 2C^4 R_c^3 R_l \omega^4 + C^4 R_c^2 R_l^2 \omega^4 - 2C^3 L R_c^2 \omega^4}{C^2 L^2 \omega^4 + C^2 R_c^2 \omega^2 + 2C^2 R_c R_l \omega^2 + C^2 R_l^2 \omega^2 - 2C L \omega^2 + 1^2} + \\ &+ \frac{-4C^3 L R_c R_l \omega^4 + C^2 L^2 \omega^4 + 2C^2 R_c^2 \omega^2 + 2C^2 R_c R_l \omega^2 - C^2 R_l^2 \omega^2 - 2C L \omega^2 + 1}{C^2 L^2 \omega^4 + C^2 R_c^2 \omega^2 + 2C^2 R_c R_l \omega^2 + C^2 R_l^2 \omega^2 - 2C L \omega^2 + 1^2}, \\ \frac{\partial \text{Im}(\hat{\mathbf{Z}})}{\partial L} &= \frac{C^2 R_c^2 - 2C L \omega^3 + \omega}{\omega^2 C^2 R_c^2 + 2C^2 R_c R_l + C^2 R_l^2 - 2L C + C^2 L^2 \omega^4 + 1} + \frac{\omega L - C R_l^2 - \omega^3 C L^2 - C^2 L R_c^2 - 2C \omega^2 - 2C^2 L \omega^4}{\omega^2 C^2 R_c^2 + 2C^2 R_c R_l + C^2 R_l^2 - 2L C + C^2 L^2 \omega^4 + 1^2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \operatorname{Im}(\hat{\mathbf{Z}})}{\partial C} &= \frac{\omega C^2 L^4 \omega^6 - C^2 L^2 R_c^2 \omega^4 + 2C^2 L^2 R_c R_l \omega^4 + 2C^2 L^2 R_l^2 \omega^4 + C^2 R_c^2 R_l^2 \omega^2}{C^2 L^2 \omega^4 + C^2 R_c^2 \omega^2 + 2C^2 R_c R_l \omega^2 + C^2 R_l^2 \omega^2 - 2CL\omega^2 + 1^2} + \\ &+ \frac{\omega(2C^2 R_c R_l^3 \omega^2 + C^2 R_l^4 \omega^2 - 2CL^3 \omega^4 - 4CLR_c R_l \omega^2 - 2CLR_l^2 \omega^2 + L^2 \omega^2 - R_l^2)}{C^2 L^2 \omega^4 + C^2 R_c^2 \omega^2 + 2C^2 R_c R_l \omega^2 + C^2 R_l^2 \omega^2 - 2CL\omega^2 + 1^2}, \\ \frac{\partial \operatorname{Im}(\hat{\mathbf{Z}})}{\partial R_c} &= \frac{2C^2 \omega^3 C^2 L^3 R_c \omega^4 + C^2 LR_c^2 R_l \omega^2 + C^2 LR_c R_l^2 \omega^2 - CL^2 R_c \omega^2 + CL^2 R_l \omega^2 + CR_c R_l^2 + CR_l^3 - LR_l}{C^2 L^2 \omega^4 + C^2 R_c^2 \omega^2 + 2C^2 R_c R_l \omega^2 + C^2 R_l^2 \omega^2 - 2CL\omega^2 + 1^2}, \\ \frac{\partial \operatorname{Im}(\hat{\mathbf{Z}})}{\partial R_l} &= -\frac{2C\omega C^3 LR_c^3 \omega^4 + C^3 LR_c^2 R_l \omega^4 - C^2 L^2 R_c \omega^4 + C^2 R_c^2 R_l \omega^2 + C^2 R_c R_l^2 \omega^2 + CLR_c \omega^2 - CLR_l \omega^2 + R_l}{C^2 L^2 \omega^4 + C^2 R_c^2 \omega^2 + 2C^2 R_c R_l \omega^2 + C^2 R_l^2 \omega^2 - 2CL\omega^2 + 1^2}. \end{aligned}$$

Таким образом, параметры катушки индуктивности вычисляются по множеству измерений полного комплексного сопротивления на различных частотах и находятся исходя из наилучшего соответствия измеренным значениям в смысле минимума суммарного квадратического отклонения.

Практическое исследование и выводы. На рис. 4 показан пример измерения значений напряжения U_{R0} и вычисленных на основе формулы (3) значений $\hat{U}_{R0}$ на частоте $\nu = 2500$ Гц.

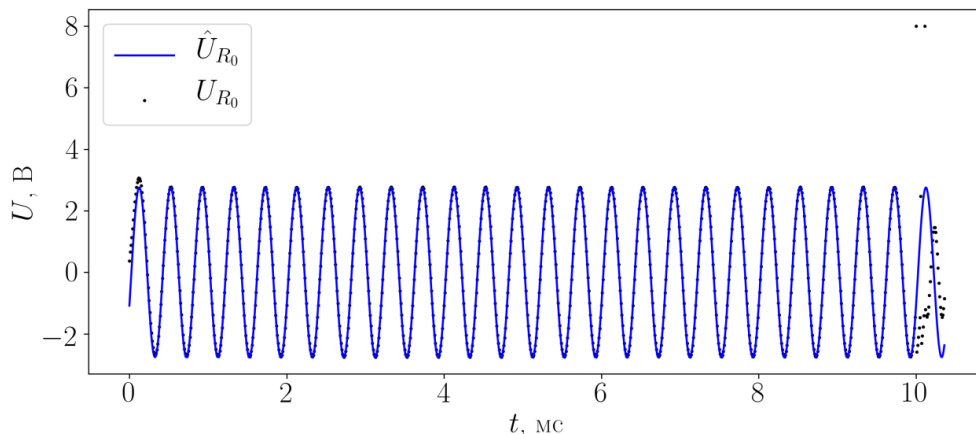


Рисунок 4 – Пример измерения значений U_{R0} .

Найденные значения фазы и амплитуды оказались равными: $\phi_1 = 0.403$ рад, $A_1 = 2.759$ В. Из рис. 4 можно видеть, что этот способ определения амплитуды и фазы с помощью оптимизационного метода Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно хорошо справляется с различного рода помехами, вызванными переходными процессами (рис. 4, слева), электромагнитными возмущениями (рис. 4, справа), а также возможными потерями данных в канале связи (рис. 4, справа сверху). Достигается это за счет того, что амплитуда и фаза вычисляются по многим измерениям, исходя из наилучшего соответствия измеряемым данным в смысле минимума суммарной среднеквадратической ошибки. Кроме того предложенный метод позволяет легко контролировать точность определения параметров за счет простого изменения условия окончания вычислений по формуле (5).

На рис. 5, 6 показан пример определения параметров катушки индуктивности по четырехэлементной схеме замещения (рис. 1) на частотах 50–200 Гц. Среднеквадратическая ошибка, вычисленная по формуле (7), $E_s = 71.595$ Ом².

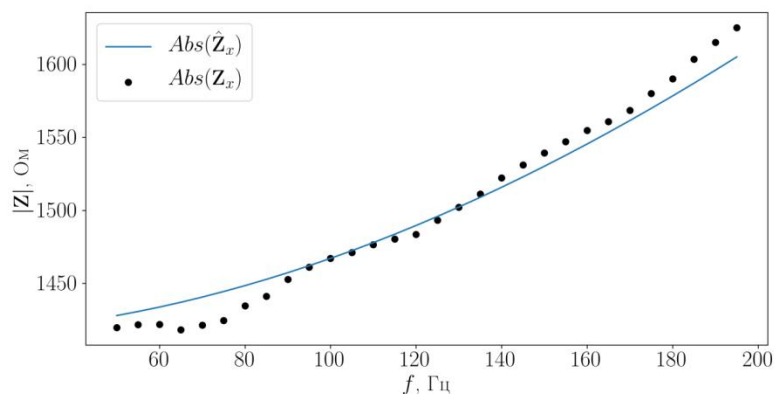


Рисунок 5 – Зависимость модуля полного сопротивления от частоты (50–200 Гц).

Вычисленные с помощью формулы (5) параметры катушки индуктивности равны: $C = 1.18126 \cdot 10^{-10} \text{ Ф}$, $L = 0.618958 \text{ Гн}$, $R_c = 8.2737 \text{ Ом}$, $R_l = 1415.52 \text{ Ом}$.

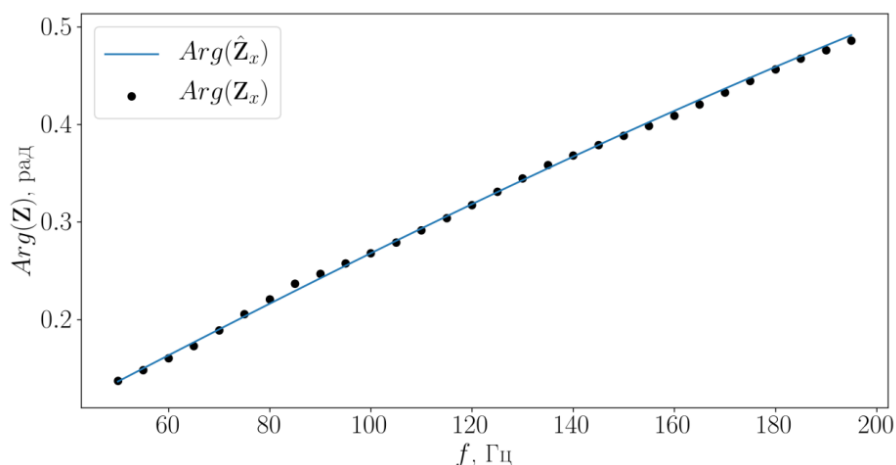


Рисунок 6 – Зависимость фазы полного сопротивления от частоты (50–200 Гц).

Активное сопротивление, измеренное вольтметром В7-22А, $R_l = 1381 \text{ Ом}$, т.е. ошибка составляет не более 2.5 %. Несмотря на то, что полученная ошибка измерения достаточно велика, предложенный способ определения параметров катушек индуктивности позволяет определить не только активное сопротивление, но и индуктивность, паразитную емкость, а также ее сопротивление переменному току, в то время как серийные приборы, предназначенные для этой цели, например цифровой измеритель L,C,R E7-12, не позволяют этого сделать ввиду того, что катушка индуктивности магнитометра с большим числом витков является активным элементом, в котором генерируется значительная ЭДС индукции, оказывающая влияние на работу приборов.

Заключение

Таким образом, в работе рассмотрены различные методы измерения параметров катушек индуктивности и предложен способ определения параметров катушек магнитометров на основе существующего метода преобразования полного комплексного сопротивления в напряжения и его реализация на основе платы сбора данных Л Кард E502. Рассмотрен способ определения амплитуды и фазы измеряемого напряжения, основанный на минимизации среднеквадратического отклонения между измеряемым

напряжением и моделью гармонического сигнала. Показано, что этот способ хорошо справляется с различного рода помехами. В работе решена проблема измерения параметров активной катушки индуктивности, на которую воздействуют фоновые электромагнитные поля. В предложенном способе это влияние нивелируется тем, что параметры катушки индуктивности вычисляются по множеству измерений полного комплексного сопротивления на различных частотах и находятся исходя из наилучшего соответствия измеренным значениям в смысле минимума суммарного квадратического отклонения.

Литература

1. Чечет, П.Л. Программная реализация измерения индуктивности с учётом паразитной ёмкости // Известия гомельского государственного университета им. Ф. Скорины. – 2012. – №6(75). – С. 152–155
2. Асанов, С.М., Ниязова Г.Н., Сатаркулов К. Моделирование электромагнитных взаимодействий смежных ЛЭП на основе метода переменных состояний // Проблемы автоматизации и управления. – 2015. – № 1 (28). – С. 231-236.
3. Брякин, И.В., Денисов, Г.С. Феррозондовый датчик с упругим возбуждением сердечника // Проблемы автоматизации и управления –2017. – №1 (32). С. 50–59.
4. Ковязин, В.А. Анализ применения схем замещения катушки индуктивности в расчетах электрических цепей постоянного тока / В. А. Ковязин, В. П. Кобазев, Л. И. Иванова // Наукові праці Донецького національного технічного університету. – Донецьк, 2008. – Вип.8(140). – С.55–57.
5. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники: учеб. / В. В. Пасынков, В. С. Сорокин. 5-е изд., стереотип. – СПб.; Лань, 2003. – 367 с.
6. Лушин, Е.В., Долгов, А.Н. Способы измерения индуктивности // Приволжский научный вестник. – 2013. – №2–12(28). – С. 36–40
7. Методы электрических измерений / Л.Г. Журавин и др. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
8. Дворяшин, Б. В. Основы метрологии и радиоизмерения: Учеб. пособие для вузов. – М.: Радио и связь, 1993.
9. http://www.lcard.ru/download/e-502_users_guide.pdf (дата обращения 02.10.18)
10. Банди Б. Методы оптимизации. Вводный курс, пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1988.

УДК 004.94

Верзунов С.Н., verzunov@hotmail.com

Токсаитов Д.А., toksaitov_d@auca.kg

Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ СБОРА И ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ ДЛЯ ЦИФРОВОГО ТРЁХКОМПОНЕНТНОГО ИНДУКЦИОННОГО МАГНИТОМЕТРА

Для анализа показаний индукционного магнитометра разработана система сбора и визуализации вариаций вектора геомагнитного поля. Подсистема сбора информации построена на базе микросервисной архитектуры с применением технологии контейнеризации для обеспечения простоты развертывания. Подсистема визуализации разработана для мобильных устройств для обеспечения возможности проведения научных экспериментов в полевых условиях. Все подсистемы используют базу данных временных рядов для сбора большого объема информации о вариациях геомагнитного поля с частотой дискретизации до 2 МГц.

Ключевые слова: цифровой магнитометр; магнитный датчик; базы данных временных рядов; сбор данных; визуализация.

Введение. Переход геомагнитных обсерваторий Кыргызстана с традиционных аналоговых магнитовариационных станций на основе кварцевых магнитных вариометров Боброва [1] с записью данных на фотобумагу на современные цифровые измерительные системы открывает новые возможности сбора, обработки и графического представления данных для последующего анализа геомагнитных измерений, что повышает эффективность геофизических исследований [2]. Это актуализирует разработку технического обеспечения и методов сбора и демонстрации геомагнитных явлений, которые позволят обсерваториям Кыргызстана вступить в международную программу INTERMAGNET для создания глобальной сети цифровых магнитных обсерваторий и интегрировать современные стандарты замеров и регистрации магнитных измерений [3].

Для проведения исследований был выбран индукционный датчик (рис. 1), состоящий из трёх катушек – продольной (X), поперечной (Y) и вертикальной (Z).

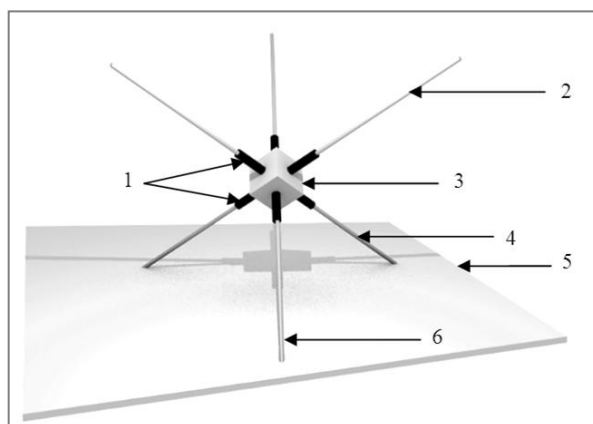


Рисунок 1 – Трёхкомпонентный индукционный датчик: 1 – крепежные стойки; 2 – поперечная катушка Y; 3 – соединительная коробка; 4 – продольная катушка X; 5 – платформа; 6 – вертикальная катушка Z

Катушки могут быть закреплены на платформе или штативе. Каждая из катушек содержит несколько сотен тысяч витков и состоит из двух последовательно соединённых частей, намотанных в несколько слоёв. Для повышения чувствительности индукционного датчика вводится сердечник на ферритовом стержне. Для уменьшения влияния промышленной электрической сети используется двойной Т-образный фильтр с буферным усилителем (рис. 2), препятствующий влиянию фильтра на индукционный датчик (рис. 1) [4]. Выходы фильтра соединены с входными каналами платы сбора данных [5], управляемой персональным компьютером. Это позволяет регулировать усиление измеряемого сигнала, а также выбирать необходимые для записи данные и частоту их дискретизации.

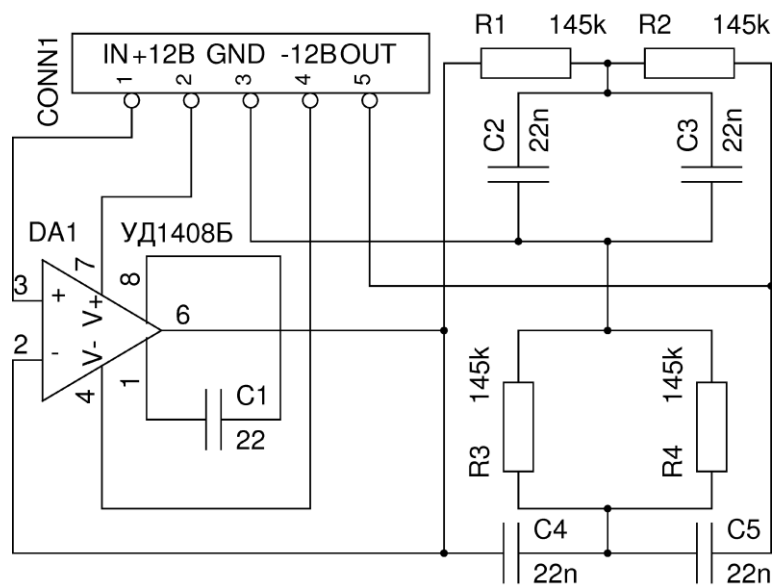


Рисунок 1 – Принципиальная схема двойного Т-образного фильтра с буферным усилителем

На рис. 3 приведен пример магнитограммы для трёх компонентов, полученной с устройства. На ней можно увидеть искусственные возмущения от электрической сети.

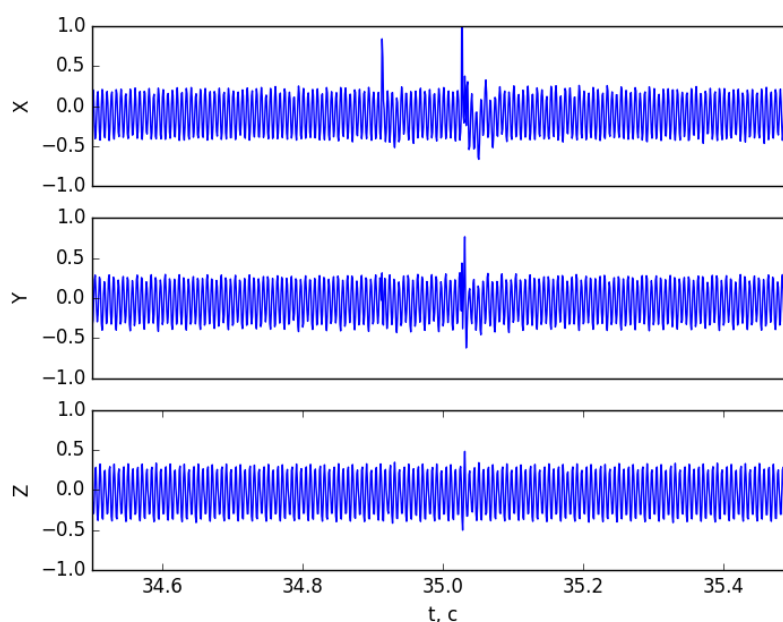


Рисунок 3 – Пример записи показаний магнитометра

Постановка задачи. Высокая частота дискретизации системы сбора данных, достигающая 2 МГц, требует наличия программной системы, способной быстро накапливать, обрабатывать и передавать данные для визуализации с минимальной задержкой. Таким образом, возникает задача разработки программной системы, которая должна уметь эффективно управлять памятью для предотвращения её переполнения.

Предлагаемое решение и его обоснование. Для решения этой проблемы предлагается использовать оптимизированную C библиотеку компании L-CARD для сбора данных, после чего информация об измерениях передается по сетевому UDP протоколу в базу данных временных рядов (Time Series Database, TSDB) InfluxDB для временного хранения перед рисованием.

InfluxDB является NoSQL TSDB базой данных, оптимизированной для хранения временных последовательностей. TSDB, такие как InfluxDB, значительно превосходят классические реляционные СУБД по скорости работы с временными вариациями (рис. 4). Например, InfluxDB поддерживает UDP протокол для передачи информации по сети. Сетевой протокол UDP, в отличие от протокола TCP, который традиционно используется реляционными системами управления базами данных, позволяет передавать пакеты с минимальной задержкой, так как протокол не устанавливает двунаправленное соединение, не требует буферизации, а также передачу пакетов подтверждения успешной доставки. Протокол UDP делает акцент на минимизацию задержки ценой возможной потери пакетов. В настоящей задаче потеря нескольких замеров из миллионов, приходящих каждую секунду, не является большой проблемой.

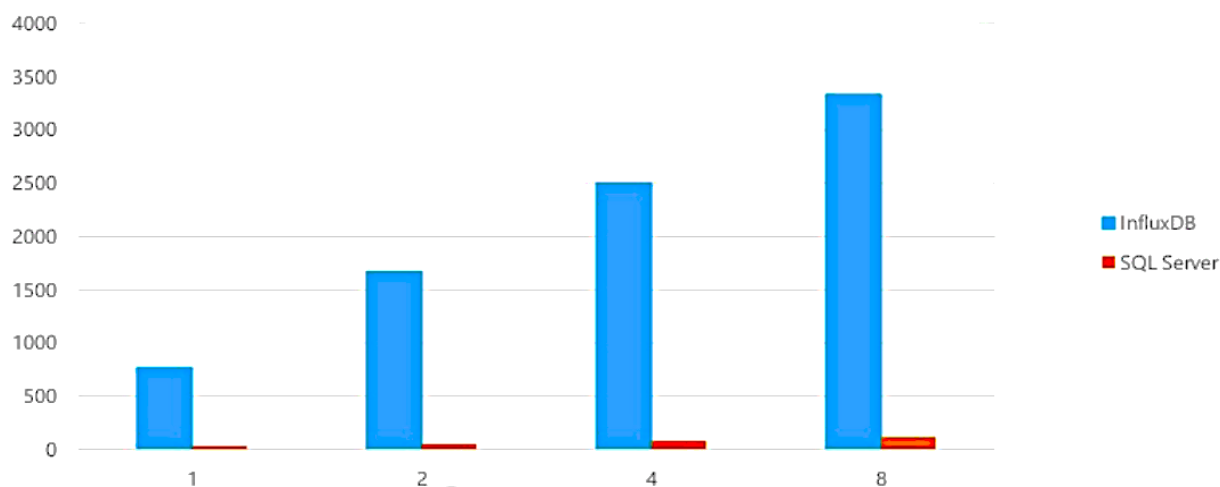


Рисунок 4 – Скорость выполнения запросов InfluxDB и Microsoft SQL Server на одноядерных и многоядерных машинах [6]

Кроме оптимизаций сетевого взаимодействия InfluxDB способна эффективно использовать память системы. База данных может проводить группировку и обобщение данных на лету, может хранить только указанное количество последних N-записей, может автоматически сжимать временные последовательности используя алгоритмы, специально адаптированные для проблемной области. Для выборки и обработки данных есть возможность использовать ограниченный SQL-подобный набор запросов [7].

Практическое исследование и выводы. Для проведения промежуточного анализа и построения запросов для базы InfluxDB была использована система Grafana (рис. 5). Grafana имеет визуальный конструктор для запросов, что позволяет исследователям проводить предварительную обработку данных без детального изучения языка запросов InfluxDB.

Для наглядного представления компонентов вектора и демонстрации его временных изменений была разработана графическая система расчета графики для мобильных устройств. Использование мобильных устройств, таких как планшетные компьютеры, позволит проводить проверку и анализ данных системы магнитометра не только в лабораторных, но и в полевых условиях на местах установки индукционных вариометров.

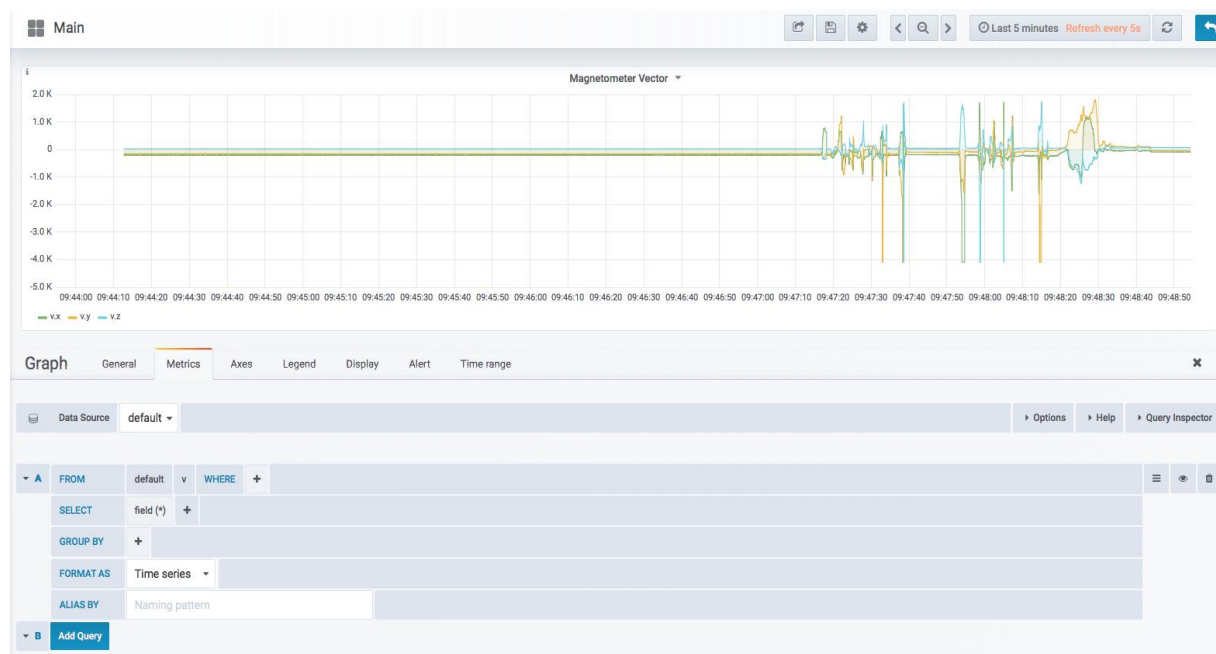


Рисунок 5 – Построение выборки в конструкторе запросов Grafana.

Многие мобильные устройства, такие как планшетные ПК, содержат программные интерфейсы графического адаптера, которые не имеют представления о природе мобильного графического ускорителя (ГПУ), кардинально отличающегося архитектурой от адаптеров персональных компьютеров. Мобильные ГПУ используют архитектуру отложенного расчёта и обрабатывают изображение отдельными регионами фиксированного размера (тайлами) для минимизации потребления электроэнергии устройства [8, 9]. Архитектуре отложенного расчёта требуется, чтобы центральный процессор (ЦПУ) подготовил информацию обо всех запросах на рисование объектов сцены в специальных буферах на передачу. Такой подход взаимодействия между ЦПУ и ГПУ позволяет упростить схемотехническое решение чипа, минимизировать его потребление памяти в системе и уменьшить потребление энергии устройства [10]. К сожалению, этот подход требует выполнять дополнительную работу по сбору данных и поддержке буферов для каждого последующего кадра. Это приводит к серьезным ограничениям на максимальное количество объектов, которые можно рисовать на экране одновременно из-за ограниченного размера вышеупомянутых буферов [11]. Отложенные системы требуют от разработчиков тратить драгоценное время процессора на поддержку графической подсистемы, а НЕ на выполнение полезной работы их программ.

Временные положения геомагнитного вектора в пространстве и силовые сетки требуют рисовать большое количество простых графических примитивов. Архитектура нашего графического движка (рис. 6) [12] для проведения визуализации использует набор оптимизаций для увеличения количества объектов на мобильных платформах. Мы используем набор ухищрений для минимизации размера параметрического буфера,

а также обхода системы проверки параметрического буфера группировкой данных, не отражающих действительное количество видимых объектов.

Из набора оптимизаций можно отметить следующие ключевые методы:

1. Поддержка дерева обновлений объектов.
2. Объединение геометрии и параметров нескольких объектов.
3. Дублирование геометрии однотипных объектов.
4. Вычисление разности геометрии и частичное обновление буферов ГПУ.

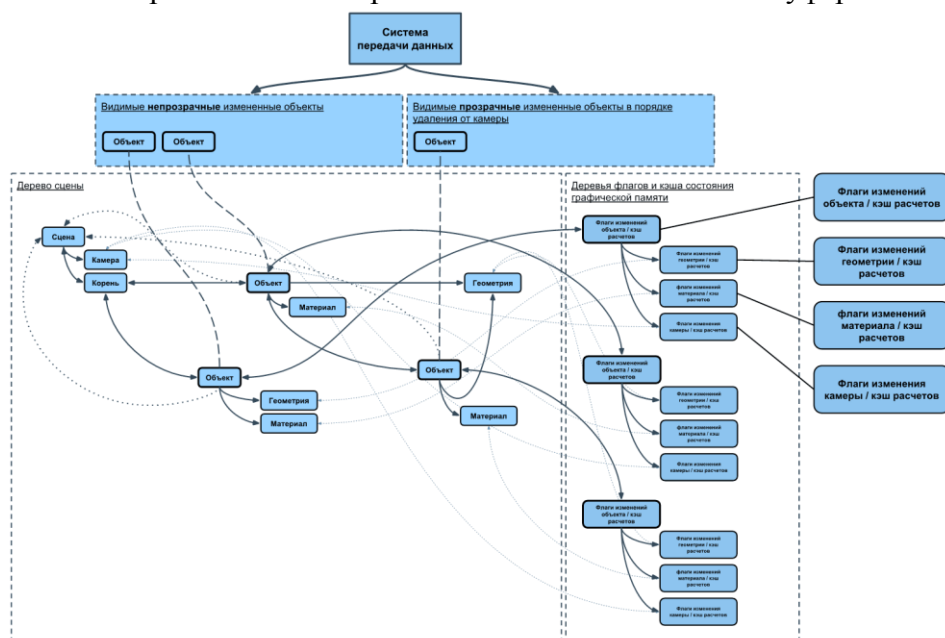


Рисунок 5 – Дерево сцены, деревья изменений и кэша (Renderables) и система передачи данных на ГПУ разработанного движка

Полученная система (рис. 6) может демонстрировать нынешнее положение вершины вектора относительно начала координат (фиолетовая сфера). Исторический набор предыдущих позиций представлен кривой в пространстве (белые точки в пространстве, формирующие кривую). Координатная плоскость отражена стрелками разных цветов. Плоскость, формирующаяся осями X и Z, отражена сеткой белого цвета из множества линий. В дальнейшем планируется демонстрация силовых полей на этой и других сетках.

Подсистема взаимодействия с платой сбора, подсистема промежуточного хранения и выборки данных, подсистема подготовки запросов и подсистема визуализации формируют нашу конечную системы. Развертывание такого количества компонентов может быть сложным для большого количества магнитометров. Для решения этой проблемы мы используем микросервисную архитектуру. Большинство подсистем организованы в изолированные контейнеры. Взаимодействие между контейнерами производится по оптимизированным протоколам удаленного вызова функций (RMI) или сетевому взаимодействию через протокол UDP. Для старта, конфигурации и оркестрирования микросервисов была использована система контейнеризации Docker и Docker Swarm. Docker имеет развитую экосистему инструментов и документации из-за большой популярности продукта на рынке в момент разработки системы.

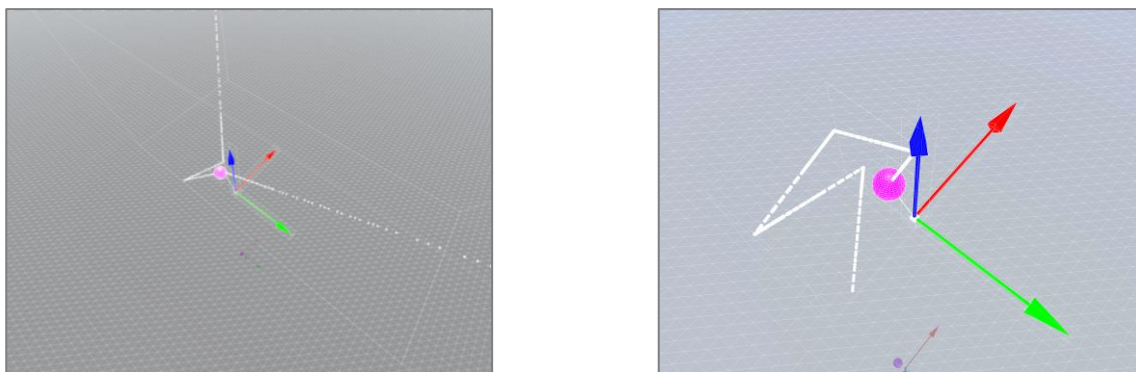


Рисунок 6 – Примеры работы системы визуализации

Заключение. Таким образом была разработана система, собирающая и обрабатывающая измерения трехкомпонентного магнитометра с частотой дискретизации до 2 МГц с последующей визуализацией данных в 3D пространстве. Визуализация может производиться на мобильных устройствах для проведения полевых работ с аппаратурой и работает с частотой обновления до 30–60 кадров в секунду с большим количеством 3D примитивов на экране. Графическая подсистема оптимизирована для мобильных тайловых графических процессорах отложенного рисования. Все подсистемы в целом используют специализированную базу данных InfluxDB для сбора временных рядов вместе с промежуточной подсистемой графического конструирования запросов. Несмотря на большое количество компонентов, система легка в развертывании и использовании благодаря архитектуре микросервисов на базе средства контейнеризации Docker.

Литература

1. Брякин, И.В. Прикладные аспекты малоглубинной магниторазведки // Проблемы автоматизации и управления.– 2016. – № 1(30). – С. 65–75.
2. Бобров, В.Н. Однокомпонентные магнитные вариационные станции // Геомагнетизм и аэрономия. – 1962 – Том 2. – № 5.
3. Верзунов, С.Н. Вейвлет-преобразование как инструмент анализа магнитовариационных данных // Проблемы автоматизации и управления.– 2014, № 2. – С. 52–61.
4. Ханасова, В.В., Верзунов С.Н. Двойной Т-образный фильтр для цифрового трёхкомпонентного индукционного магнитометра // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета.– 2017. –Т. 17. –№ 5. – С. 101–104.
5. Лыченко, Н.М., Брякин, И.В. О некоторых аспектах применения интегрированной среды Matlab при проектировании информационно-измерительных систем // Проблемы автоматизации и управления.– 2009. – № 2. – С. 31–38.
6. Ivo Andreed Time Series Databases for IoT (On-premises and Azure) // IoT Summit, Bulgaria. – 2017.
7. Leighton, B. A Best of Both Worlds Approach to Complex, Efficient, Time Series Data Delivery // ISESS, 2015. – P. 371–379.
8. Shebanow, M. An evolution of mobile graphics. // High Performance Graphics, 2013 .
9. PowerVR Hardware Architecture Overview for Developers. Imagination Tech Limited // PowerVR SDK Manuals. 2017.
10. McCaffrey, Jon Exploring Mobile vs. Desktop OpenGL Performance // OpenGL Insights. 2012.
11. De Dominicis, S. A New Era in Mobile GPUs: The Increasing Relevance of Energy Efficiency, Security and Virtualization. Mobile System Technologies Workshop (MST) // IEEE. – 2016.
12. Верзунов, С.Н., Токсаитов, Д.А. Способы оптимизации расчёта 3D графики для тайловых графических процессоров на примере визуализации моделирования гравитационного взаимодействия N-тел // Проблемы автоматизации и управления.– 2018, № 1 (34). – С. 26–36.

УДК 004.75

В. Гайдамако, dolpha@gmail.com

Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР

ИНФРАСТРУКТУРА SENSOR-CLOUD – ОБЛАЧНЫЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

В статье описана обобщенная архитектура Sensor-Cloud – информационно-измерительных систем, использующих облачные технологии для организации сбора, хранения, обработки и предоставления информации, управления физическими и виртуальными датчиками, предоставления инфраструктуры сбора данных как сервиса.

Ключевые слова: Sensor-Cloud облачные ИИС виртуальные датчики беспроводные сенсорные сети; IaaS; SensIaaS.

Введение. Количество измерительных систем и датчиков в мире возрастает с каждым годом, так как измерительные системы стали применяться не только в промышленности, военном деле, космосе, метеорологии, но и в быту – с появлением умного дома, умного города, интернета вещей. Возникла потребность в обработке колоссальных массивов данных, поступающих из огромного количества источников – спутников, самолетов, беспилотных летательных аппаратов, уличных видеокамер, датчиков, устанавливаемых иногда в самых глухих и удаленных местах. При этом обработка данных должна производиться в реальном времени. Датчики совершенствовались, оснащались устройствами для работы в сети, появились Беспроводные Сенсорные Сети (БСС), позволяющие быстро подключать и отключать новые датчики, управлять ими и передавать собираемые данные на серверы для анализа, хранения и обработки. Но БСС имеют естественные ограничения по скорости передачи данных, памяти, возможностям управления огромным количеством датчиков, совместному использованию, организации доступа для разных пользователей, надежности [1, 2]. В 2010 г. было предложено объединить беспроводные сенсорные сети с возможностями, которые предоставляют облачные технологии. В результате появилась инфраструктура Sensor-Cloud – Облачные измерительные системы [3] и парадигма Sensing as a Service [4]. Облачные информационно-измерительные системы собирают данные от нескольких БСС, передают их потребителям в реальном времени через виртуализацию датчиков, организуют хранение данных в Центрах Обработки Данных (ЦОД), визуализацию, анализ, поиск, совместный доступ к данным, используя ресурсы облака. В облачных ИИС датчики и центры обработки могут быть распределены по значительной территории, иногда по всей планете.

Определение IntelliSys:

Инфраструктура, предоставляющая повсеместную, всепроникающую технологию вычислений с использованием датчиков (сенсоров) в качестве интерфейса между физическим и компьютерным мирами, использующая кластеры сбора и обработки данных как компьютерную основу и Интернет как средство связи. [5, 6].

Определение MicroStrains:

Уникальное хранилище данных от сенсоров, платформа визуализации и удаленного управления, использующая облачные технологии для обеспечения

масштабирования, быстрой визуализации и задаваемого пользователем анализа данных. Первоначально разработанная для долговременной поддержки беспроводных датчиков MicroStrain, в настоящее время поддерживает любое устройство, подключенное к Web, сенсоры, беспроводные сенсорные сети через простой программный интерфейс OpenData API [7].

Инфраструктура датчиков как сервис (SensIaaS, Sensing as a Service). Рабочая среда Sensor-Cloud предоставляет сервисы датчиков по запросу конечному пользователю через web-интерфейс. Экземпляр сервиса – виртуальный датчик – создается в облаке и предоставляется пользователю автоматически – так же, как и другие облачные ресурсы, – память, дисковое пространство, процессорное время, сетевая инфраструктура. Для этого в облаке должен быть подготовлен шаблон сервиса. Шаблоны предоставляются поставщиком датчиков и могут добавляться и удаляться из системы.

На рис. 1 представлен общий, недетализированный вид архитектуры облачной информационно-измерительной системы – Sensor-Cloud, с возможностью предоставления инфраструктуры датчиков (SensIaaS – Sensor on IaaS – Инфраструктура датчиков как услуга).

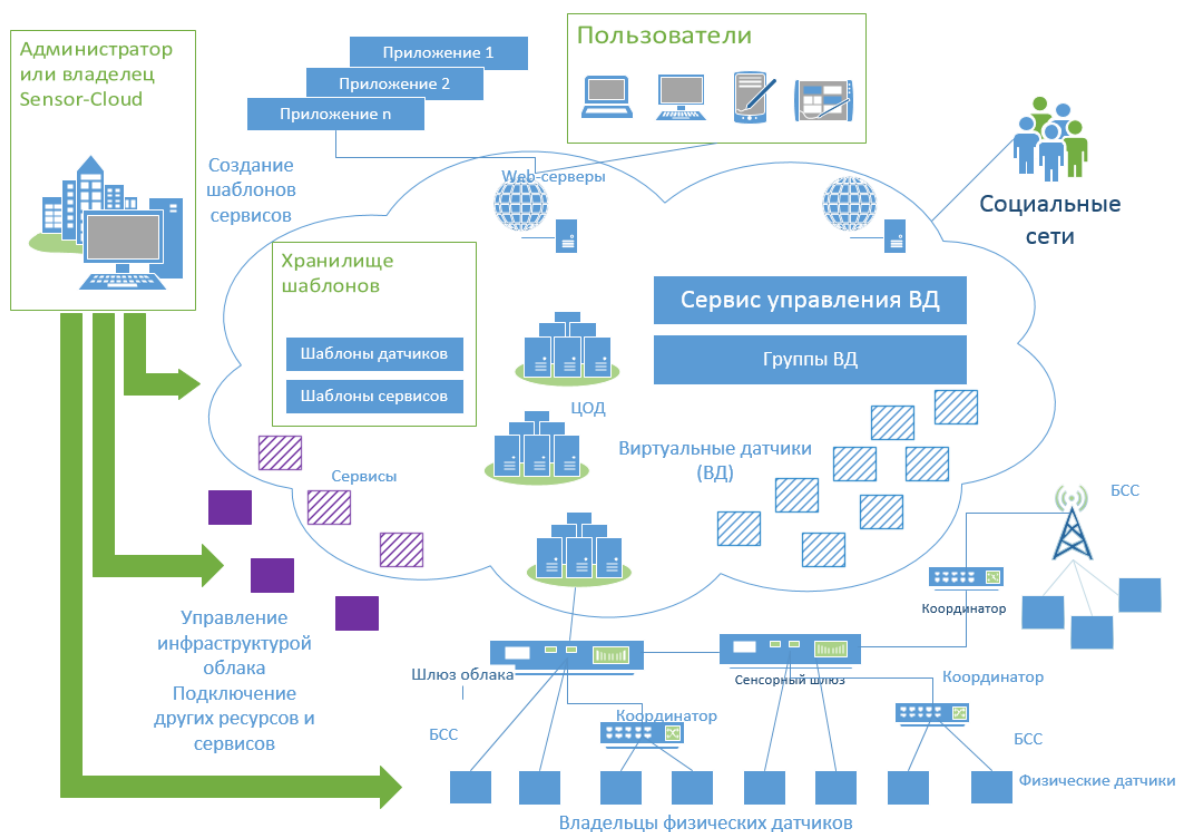


Рисунок 1 – Архитектура Sensor-Cloud

Главными действующими сущностями являются:

Архитектура:

- Владелец физических датчиков (человек, частная или правительственная организация) – подключает, отключает физические датчики в своих БСС и регистрирует их в облачной системе, создает шаблоны датчиков, таким образом делая доступными для широкого использования данные своих датчиков.

- Администратор/владелец инфраструктуры Sensor-Cloud – управляет инфраструктурой облака, подключает и регистрирует другие ресурсы и создает шаблоны сервисов и датчиков. Шаблоны сервисов и датчиков хранятся в хранилище (каталоге) шаблонов.
- Пользователи (люди, организации и приложения) – создают запросы на сервисы через Web-интерфейс и получают данные с физических датчиков для анализа и обработки, поиска интересующих событий.
- Социальные сети пользователей инфраструктуры облачных ИИС – обеспечивают взаимодействие пользователей, тем самым создавая возможность возникновения новых идей, междисциплинарных исследований, вовлеченности большого числа наблюдателей.

Компоненты инфраструктуры:

- Беспроводные сенсорные сети (БСС) – состоят из физических датчиков, координаторов, сенсорных шлюзов.
- Физический датчик, назначение – получение данных об объекте. Подключаются к координатору через интерфейсы различных типов. Некоторые датчики оснащены оборудованием для беспроводной передачи данных, которое может использоваться для подключения к сенсорному шлюзу или непосредственно к шлюзу облака.
- Координатор БСС – работает с одним или несколькими датчиками, снабжает их питанием и предоставляет возможности передачи данных, упаковывает и передает данные, собранные со всех подключенных датчиков. Координатор и некоторые датчики могут иметь возможность передачи данных на шлюз облака (подключены к Интернет). Если же возможна только кратковременная передача (например, через радиоканал), координатор передает данные на сенсорный шлюз.
- Сенсорный шлюз (Sensor gateway) – перенаправляет данные, полученные от координаторов или датчиков на шлюз облака.
- Шлюз облака (Cloud gateway) – принимает данные от сенсорных шлюзов, распаковывает их и перенаправляет на один из серверов облака для организации их использования, хранения, обработки и предоставления информации пользователям.

Виртуальные датчики. В БСС каждый датчик используется определенным приложением с определенной целью, к приложению принадлежат и сам датчик, и данные, другие же приложения не могут их использовать. Ресурсы датчика могли бы использоваться более эффективно, если бы другие приложения могли иметь доступ к нему. Инфраструктура Sensor-Cloud позволяет использовать ресурсы датчика путем виртуализации физического датчика в облаке. Пользователи управляют виртуальными датчиками через пользовательский Web-интерфейс, для определения типа датчика, точности измерений и других характеристик используется язык моделирования сенсоров SML (Sensor Modelling Language) [8]. Для кодирования данных и описания процессов физического датчика можно использовать расширенный язык разметки XML (eXtensible Markup Language), что делает датчик независимым от операционной системы и языка приложения.

Для управления физическими датчиками создаются специальные приложения, пользователи Sensor-Cloud не имеют доступа к физическим датчикам, ими управляют сервисы данного датчика, иначе нельзя было бы гарантировать правильное управление.

Многие сенсорные сети делают открытыми метаданные (тип, точность измерений, размещение и данные датчиков).

Множество исследований физических датчиков посвящались маршрутизации, синхронизации времени, обработке данных, управлению питанием, операционным системам, локализации и программированию. Управление же самими физическими датчиками специфично для каждой области применения, и для этого создаются отдельные специализированные приложения. В Sensor-Cloud пользователи, если только это не сервисы данного датчика, не могут использовать физические датчики, система управления датчиками должна гарантировать, что ресурсы датчиков используются правильным образом. Для выбора нужных датчиков приложения используют механизм публикации-подписки [3]. Во многих сенсорных сетях каждая сеть публикует данные и метаданные (тип, размещение, точность и т.п.) своих датчиков. Приложение подписывается на одну или несколько сенсорных сетей для получения данных от физических датчиков в реальном времени. SaaS/AaaS приложения (приложения, предоставляемые как сервис) подписываются на события, генерируемые физическими датчиками, затем алгоритм сопоставления событий (event-matching algorithm) выбирает набор подписчиков на основе событий, в которых подписчик выразил заинтересованность. В [4] предлагается создавать группы виртуальных датчиков. Группа виртуальных датчиков, состоящая из одного или более виртуальных датчиков, автоматически создается на виртуальном сервере.

После подготовки шаблонов сервисов виртуальные датчики могут совместно использовать связанные физические датчики для получения качественных данных.

Классификация виртуальных датчиков для реализации сервиса инфраструктуры датчиков SensIaaS [9]

- Сингулярные: одному физическому датчику соответствует один виртуальный датчик (соответствие один-к-одному);
- Селективные: много-к-одному, данные передаются с любого из набора физических датчиков на один виртуальный датчик;
- Аккумулирующие: много-к-одному, данные со всех физических датчиков набора собираются для дальнейшей передачи на виртуальный датчик;
- Агрегирующие: много-к-одному, данные для передачи выбираются из данных со всех физических датчиков набора с помощью агрегирующей функции h ;
- Квалифицирующие: один-к одному, но данные с физического датчика доставляются, только если они отобраны с помощью квалификационной функции f ;
- Квалифицирующие по контексту: как и квалифицирующие, но квалификационная функция f получает данные с одного или более физических датчиков.

Три слоя Sensor-Cloud. В архитектуре Sensor-Cloud можно выделить три главных слоя или уровня (рис. 2).

1. Слой приложений и пользователей, пользователи и их приложения могут получить доступ к данным с разных платформ, разных операционных систем, нужен доступ к Интернет и средства Web.
2. Слой облачных ресурсов и виртуализации — в этом слое происходит виртуализация физических датчиков, что позволяет предоставлять их, как и другие ресурсы облака, в виде сервисов, автоматически, причем один физический датчик может быть задействован в нескольких виртуальных. Таким

образом, физический датчик может одновременно использоваться несколькими пользователями и несколькими приложениями. Для этого владелец датчиков создает шаблоны датчиков и регистрирует их в хранилище шаблонов.

3. Слой создания шаблонов сервисов и физических датчиков – в этом слое владелец датчиков или администратор облака создают шаблоны сервисов, используя стандартный web-интерфейс, предоставляемый владельцем облака и регистрируют их в каталоге, шаблонов. Так как каждый физический датчик очень специфичен, имеет свой набор команд и способ сбора данных, для управления физическими датчиками создаются специальные приложения и специализированные БСС. В этом слое определяется стандартный механизм работы с физическими датчиками, определяются стандартные функции для управления виртуальными датчиками. В слое 2 при обращении к датчику функции работы с виртуальным датчиком транслируются в специализированные функции работы с физическими датчиками и передаются в слой 3 [10].

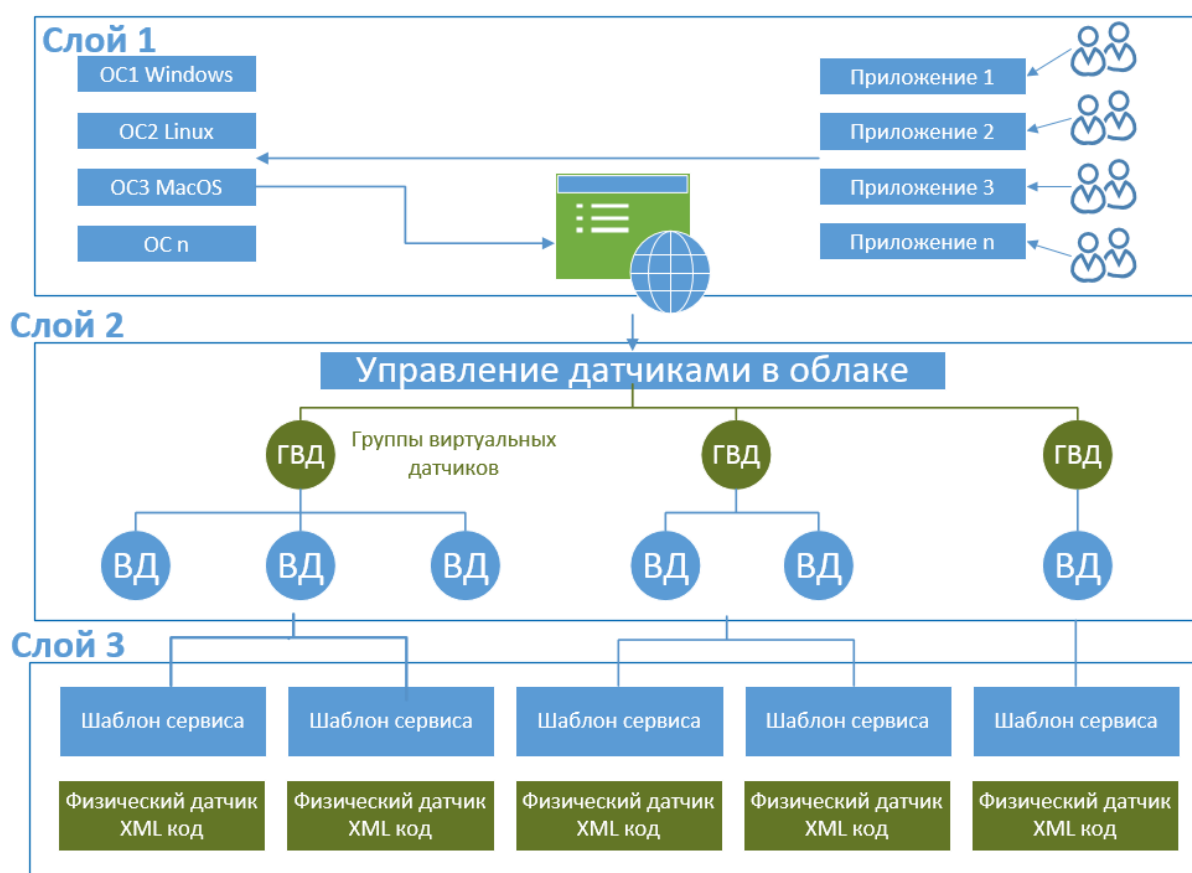


Рисунок 2 – Слои инфраструктуры Sensor-Cloud

Web-платформа сбора и презентации данных, создаваемая в облаке Sensor-Cloud, позволяет быстро разрабатывать и разворачивать пользовательские приложения анализа и обработки данных.

Без облачной инфраструктуры использование физических датчиков ограничено их владельцами (обычно организациями). При включении сервисов виртуальных датчиков в облако возникает возможность использования данного типа датчиков в новых, не предусмотренных ранее приложениях – мониторинге окружающей среды, здравоохранении, умном доме и городе [11]. Меню шаблонов датчиков и других сервисов предоставляются пользователю, новые сервисы могут создаваться из

существующих физических датчиков по запросу, то есть одни и те же физические датчики могут использоваться разными приложениями в разных целях, что повышает эффективность использования имеющихся ресурсов.

Преимущества и недостатки. Применение облачных технологий в реализации дает очевидные преимущества, присущие облакам – подвижность, надежность, переносимость, доступ к данным в реальном времени, использование огромных распределенных массивов архивных данных, гибкость. Это особенно важно для мониторинга окружающей среды, управления производством, управления движущимися объектами:

1. Анализ. Сбор огромных объемов данных от нескольких сетей датчиков и модель облачных вычислений дают возможность различным пользователям разворачивать свои собственные программы анализа данных с использованием вычислительных ресурсов облака.
2. Масштабируемость. Sensor-Cloud позволяет ранее созданным сенсорным сетям вырасти до очень больших размеров благодаря архитектуре маршрутизации в облаке [16]. Это означает, что когда потребность в ресурсах возрастает, организация может масштабировать, или добавлять нужные сервисы, в том числе датчики, от провайдеров облачных услуг без необходимости дополнительных затрат на оборудование.
3. Совместная работа. Sensor-Cloud позволяет совместно использовать данные различным группам пользователей через совместное использование различных физических сенсорных сетей, облегчает совместную работу различных пользователей и приложений. Создание собственных социальных сетей или предоставление доступа к информации существующим социальным сетям подключает еще более широкий круг пользователей и наблюдателей.
4. Визуализация. Платформа Sensor-Cloud предоставляет программный интерфейс для визуализации, который может использоваться, например, для создания диаграмм на основе данных, полученных и поступающих от разных наборов датчиков. Используя средства визуализации, пользователи могут предвидеть возможные тенденции развития событий и вовремя предпринять какие-либо действия.
5. Свободное предоставление вычислительных мощностей и пространства хранения данных. Облако предоставляет свободное пространство для хранения данных и организации могут без усилий помещать свои данные туда, а не в частные компьютерные системы. Также облако предоставляет огромные ресурсы хранения данных и вычислительные мощности для крупномасштабных приложений.
6. Динамическое предоставление сервисов. Пользователи Sensor-Cloud могут получить доступ к информации, где бы они ни находились, и когда бы он ни понадобился, используя любые аппаратные средства, на которых установлен web-браузер.
7. Мультиотенантность. Множество сервисов от нескольких провайдеров могут интегрироваться в облаке через Интернет и предоставляться для совместного

использования, обеспечивая гибкость и масштабируемость без дополнительных затрат.

8. Автоматизация. Автоматизация жизненно важна для организации облачных сервисов и уменьшения времени доступа до приемлемого уровня.
9. Гибкость. Облако Sensor-Cloud предоставляет пользователю большую гибкость, нежели другие методы. Пользователь может работать со многими приложениями, запуская их сколько угодно раз, предоставляется возможность гибкого доступа к различным датчикам, датчики быстро подключаются и так же быстро удаляются в соответствии с требованиями приложений.
10. Скорость предоставления услуг. Облако Sensor-Cloud предоставляет быстрые сервисы, и пользователь может получить высокотехнологичную инфраструктуру за относительно малую цену. Интеграция беспроводных сенсорных сетей и облака реализует высокоскоростную обработку данных.
11. Оптимизация ресурсов. Инфраструктура Sensor-Cloud позволяет оптимизировать использование ресурсов посредством совместного использования ресурсов различными приложениями. Интеграция датчиков с облаком позволяет существенно уменьшить затраты и достичь высокого уровня сервиса. Используя Sensor-Cloud, и малые, и средние организации получают доступ к развитой инфраструктуре без необходимости непосредственно управлять ими.
12. Малое время отклика. Интеграция БСС с облаком обеспечивает очень быстрый ответ пользователю в реальном времени из-за развитой архитектуры маршрутизации в облаке. Быстрое время отклика при получении данных из нескольких БСС или устройство позволяет пользователю принимать критичные решения практически в реальном времени [10].

К **недостаткам** облачных информационно-измерительных систем можно отнести следующие:

1. Для работы в облаке необходима подготовка как самой инфраструктуры Sensor-Cloud, так и физических датчиков. [11, 12].
2. Предоставление данных через облако может отличаться по скорости и точности от прямого подключения к физическим датчикам [3].
3. Инфраструктура облака требует особого внимания к информационной безопасности [14–17].
4. В случае использования датчиков для обработки в реальном времени требуется длительное надежное соединение между пользовательским приложением и сервером Sensor-Cloud, что актуализирует проблему обеспечения электропитанием [10, 12–14].

Проблемы, которые должны приниматься во внимание при проектировании инфраструктуры Sensor-Cloud

При разработке облачной инфраструктуры Sensor-Cloud должны быть приняты во внимание следующие проблемы:

1. Проблемы проектирования. В некоторых приложениях существуют повышенные требования к надежности и отказоустойчивости, например, в здравоохранении, управлении движущимися объектами, производственном мониторинге, мониторинге окружающей среды и предупреждении о чрезвычайных и

опасных ситуациях, при установке датчиков в удаленных и труднодоступных местах и т.п., поэтому вопросы надежного и продолжительного соединения, резервирования соединений в сетях для доставки данных от датчика к серверу должны быть тщательно продуманы.

2. Хранение данных. Поставляемые данные должны снабжаться маркерами времени, локализации датчика, порядковым номером для контроля доставки и восстановления последовательности на стороне сервера. Обработка и анализ данных производится на стороне сервера, поэтому во избежание коллизий поведение систем при одновременном подключении нескольких пользователей должно быть рассмотрено, архитектура облака должна использовать распределенные системы хранения и балансировать нагрузку на серверы.
3. Авторизация. Права пользователей должны быть строго разграничены в соответствии с ролью в системе во избежание получения ненадлежащего доступа к данным, поэтому доступ к web-интерфейсу должен осуществляться через подтверждение пользователем своих прав (например, через форму входа в систему) [14–17].
4. Электропитание. Устройства связи, серверы и устройства доступа должны быть постоянно обеспечены электропитанием, при проектировании это должно быть учтено. При использовании батарей и аккумуляторов следует предусмотреть процедуры непрерывного обеспечения запасными батареями и аккумуляторами [12–14].
5. Управление событиями. Как происходит синхронизация обработки событий, когда сообщения о событии могут прийти от разных устройств в разное время из-за задержек в сети? Как изменить правила обработки события, избежав влияния на всю систему? Поддерживаются ли изменения типов сообщений и событий? Как оптимизировать обработку огромного количества событий?
6. Отслеживание качества предоставляемых услуг пользователями и владельцем облака, меры в случае нарушения качества.
7. Эффективное предоставление информации. Данные и информация о событиях должны предоставляться в виде, в котором они могут быть использованы и обнаружены приложениями. Должна быть разработана эффективная гибкая схема подписки на сервисы, позволяющая собирать и доставлять информацию о событиях независимо от количества событий, подписчиков и данных. Так источники и потребители данных могут быть разбросаны географически, следует принять во внимание вопросы размещения и доставки информации в зависимости от местонахождения пользователей.
8. Обеспечение безопасности данных. Пользователи должны знать, как хранятся их данные в центре обработки данных (ЦОД) облака, зашифрованы ли они, кто отвечает за ключи – владелец облака или сам пользователь, кто в конечном итоге отвечает за безопасность данных.
9. Доступ в реальном времени. Доступ к огромному количеству данных (часто мультимедийных) в реальном времени требуют большого количества распределенных систем хранения. Определение состава данных и доставка

пользователю, находящемуся в определенной географической точке, – это непростая задача, которая должна быть решена [5].

10. Коллективное принятие решений. Обоснованное принятие решений на основе анализа больших массивов информации в облаке, предоставление механизмов анализа данных для принятия решений также должно быть рассмотрено в процессе проектирования [5].
11. Ограничения полосы пропускания линий связи. Должны применяться эффективные механизмы распределения полосы пропускания линий связи для устройств и пользователей [12].
12. Управление доступом к сети. В инфраструктуре облачной ИИС могут быть представлены различные сети, поэтому должна быть создана эффективная схема управления доступом к этим сетям.
13. Стандартный интерфейс. Связь между пользователем и инфраструктурой облака осуществляется через web-интерфейс. Он должен работать с различными типами устройств (в том числе смартфонами и планшетами), не должен создавать дополнительную нагрузку на устройство или сервер.
14. Обслуживание системы. Следует избегать сбоев в предоставлении сервисов, поэтому нужны постоянный мониторинг состояния инфраструктуры и своевременное обслуживание элементов инфраструктуры, своевременное резервное копирование, использование распределенных систем хранения.

Заключение

Без создания информационно-измерительных систем с использованием облачных технологий в настоящее время обойтись невозможно. В данной статье проведен обзор инфраструктуры Sensor-Cloud, позволяющей обеспечить доступ к данным, собираемым беспроводными сенсорными сетями, разным пользователям, разным приложениям, с разных устройств и разных операционных систем. Совместный доступ позволяет развивать междисциплинарные исследования, подключать к наблюдениям большое количество пользователей через социальные сети, осуществлять обмен информацией между разными категориями пользователей. Это особенно важно для систем мониторинга окружающей среды и предупреждения чрезвычайных ситуаций.

Литература

1. Зеленин А. Н., Власова В. А., беспроводные сенсорные сети как часть инфокоммуникационной структуры. – 2013. URL: <http://openarchive.nure.ua/bitstream/document/3521/1/%D0%A1%D1%82%D0%B0%D1%82%D1%8C%D1%8F%20%D0%92%D0%BB%D0%B0%D1%81%D0%BE%D0%B2%D0%B0.pdf> (дата обращения 31.10.2018)
2. Проскочило А.В., Воробьев А.В., Зряхов М.С., Кравчук А.С. Анализ состояния и перспективы развития самоорганизующихся сетей / Научные ведомости, Серия Экономика. Информатика. – 2015.– №19 (216). Выпуск 36/1 URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sostoyaniya-i-perspektivy-razvitiya-samoorganizuyuschih-sya-seteyhttps://devblogs.nvidia.com/gpu-containers-runtime/> (дата обращения 31.10.2018).

3. Madoka Yuriyama, Takayuki Kushida, Sensor-Cloud Infrastructure - Physical Sensor Management with Virtualized Sensors on Cloud Computing // 13th International Conference on Network-Based Information Systems 2010.
4. Sarfraz Alam, Mohammad M. R. Chowdhury, Josef Nol – SenaaS: An Event-driven Sensor Virtualization Approach for Internet of Things Cloud. // 1st International Conference on Networked Embedded Systems for Every Application, NESEA 2010, Suzhou, China.
5. Lakshmanarao K., VinodKumar Ch.R., Kanakavardhini K. – Survey on different issues of Sensor-Cloud International // Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), Vol. 2 Issue 10, October – 2013.
6. . Lan K. T, “What’s Next? Sensor+Cloud?” // Proc. of the 7th International Workshop on Data Management for Sensor Networks, pp. 978–971, ACM Digital Library, 2010).
7. Sensor-Cloud, <http://sensorcloud.com/system-overview> (дата обращения 31.10.2018)
8. SensorML, <http://www.opengeospatial.org/standards/sensorml> (дата обращения 31.10.2018).
9. Gupta A., Mukherjee N. // Implementation of Virtual Sensors for Building a Sensor-Cloud Environment Accepted in the 8th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS) 2016.
10. Atif Alamri, Wasai Shadab Ansari, Mohammad Mehedi Hassan, M. Shamim Hossain, Abdulhameed Alelaiwi, and M. Anwar Hossain A Survey on Sensor-Cloud: Architecture, Applications, and Approaches // International Journal of Distributed Sensor Networks, Vol. 2013, Article ID 917923, February 2013.
11. Yuriyama M., Kushida T., and Itakura M. A new model of accelerating service innovation with sensor-cloud infrastruc-ture // Proceedings of the annual SRII Global Conference (SRII '11), pp. 308–314, 2011.
12. Замай В.И., Добровольский Н.С. Автоматизированная система сбора и передачи данных для целей мониторинга параметров окружающей среды в бассейнах горных рек // “Геориск”, 2012. – №4. – С. 64–69.
13. Замай В.И., Добровольский Н.С, Приезжев В.А. Разработка программно-аппаратных средств базовой станции системы мониторинга параметров природной среды // Проблемы автоматизации и управления. – 2016. – №2 (30). – С. 8–14.
14. Угрозы безопасности в облаке, <https://iecp.ru/articles/item/393951> (дата обращения 31.10.2018).
15. Исаев Е.А., Думский Д.В., Самодуров В.А., Корнилов В.В. Обеспечение информационной безопасности облачных вычислений // Математическая биология и биоинформатика – 2015. Т. 10. –№ 2. С. 567–579.
16. Брякин И.В., Корякин С.В. Информационная безопасность в системах реального времени // Проблемы автоматизации и управления. – 2017. – №2 (33). С. 116–129.
17. Корякин С.В. Современные тенденции развития систем информационной безопасности. // Проблемы автоматизации и управления. – 2017. – №2 (33). –С. 82–91.

СИСТЕМЫ АВТОМАТИКИ И ДИАГНОСТИКА

УДК 620.179.1:621.315

Брякин И. В., E-mail: bivas2006@yandex.ru

Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР

Бочкарев И. В., E-mail: elmech@mail.ru

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

Храмин В.Р., E-mail: hvrmgn@gmail.com

Магнитогорский государственный технический университет

им. Г.И. Носова

СПОСОБ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФЕКТОВ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ КАБЕЛЯ

Предложен новый способ определения места и вида дефекта электропроводящих элементов (ЭЭ) кабеля, основанный на использовании спин-поляризационных явлений, возникающих при воздействии переменного электрического поля на свободные электроны электропроводящих материалов. На продольно перемещающийся контролируемый кабель воздействуют направленным переменным электрическим полем, которым в ЭЭ кабеля возбуждают волновой физический процесс в виде поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов. Индукционным датчиком регистрируют этот процесс и формируют контрольный сигнал в виде ЭДС индукции. Параметры контрольного сигнала сравнивают с параметрами опорного сигнала, полученного заранее аналогичным образом с применением отрезка эталонного кабеля без дефектов, и по полученным отклонениям этих параметров судят о наличии и виде дефекта ЭЭ в месте расположения индукционного датчика.

Ключевые слова: проходной двухэлектродный цилиндрический конденсатор с сосредоточенной емкостью; индукционный датчик; собственный момент количества движения (спин) электрона; спиновый магнитный момент; резонансная частота поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов.

Введение

В состав системы электроснабжения входит большое количество различных элементов, от работы каждого из которых зависит работоспособность всей системы в целом. Поэтому необходимы комплексная оценка и использование различных мероприятий, обеспечивающих высокую работоспособность всех элементов системы электроснабжения [1, 2]. При этом, как показывает практика, ключевым фактором при возникновении чрезвычайных ситуаций и перебое питания зачастую является неисправность электрического кабеля.

Очевидно, что проверку качества и эксплуатационных параметров электрокабеля нужно сделать до начала его прокладки. Это позволит избежать быстрого выхода кабеля из строя и, соответственно, лишних отключений питания в случае некачественного кабеля. Особенно это относится к подземным кабельным линиям. Конечно, в отличие от воздушных линий, они в меньшей степени подвержены внешним погодным воздействиям и механическим повреждениям. Однако длительность устранения аварий на кабельных линиях значительно больше, чем на воздушных, поскольку не только сложнее определить точное место повреждения, но и после этого необходимо выполнить трудоемкие земляные работы по вскрытию траншеи. Поэтому

весьма актуальными являются работы, направленные на разработку новых способов и устройств для контроля технического состояния электропроводящих элементов электрического кабеля или провода как в процессе изготовления, так и непосредственно перед их укладкой, например, в процессе размотки с бобины. Последнее объясняется тем, условия транспортировки и хранения кабельно-проводниковой продукции не всегда являются идеальными, поэтому в ней могут появиться дефекты, приводящие к снижению ее работоспособности. Таким образом, повысить надежность системы электроснабжения без достоверного контроля исходных эксплуатационных характеристик кабелей и проводов невозможно.

Анализ известных методов дефектоскопии электрического кабеля

В настоящее время разработано достаточно большое количество различных способов и устройств для контроля параметров электрических кабелей в процессе их изготовления [3–6]. Очевидно, что необходимо проводить неразрушающую диагностику кабеля, которая осуществляется без ухудшения его эксплуатационных характеристик и без нарушения самой технологии процесса его производства.

Существуют различные методы неразрушающего контроля, которые в зависимости от физических явлений, положенных в их основу, делятся на следующие виды: оптические (визуально-оптические); акустические; виброакустические; с проникающими веществами (например, капиллярные); магнитные; радиационные; радиоволновые; тепловые; электрические; вихревые (или электромагнитные) [7]. Следует отметить, что для контроля кабеля может быть использован любой из перечисленных методов дефектоскопии. Однако наиболее широкое применение получили визуально-оптический, тепловой, акустический и электромагнитный методы контроля.

Рассмотрим основные особенности перечисленных выше методов дефектоскопии.

- Визуально-оптические способы контроля являются наиболее простыми, дешевыми и оперативными. Они применяются для внешнего осмотра и предназначены для обнаружения поверхностных дефектов достаточно большого размера. Очевидно, что визуальный контроль не позволяет обнаружить дефекты, находящиеся в подповерхностном слое или на глубине провода. При этом оптические способы дефектоскопии достаточно широко применяются для контроля диаметра и овальности внешней оболочки жилы электрических кабелей, а также для измерения смещения токоведущей жилы относительно центра изоляционного материала [8, 9]. Этими способами можно контролировать такие эксплуатационные параметры кабеля, как его частотные свойства и пропускающую способность, а также расход изоляционных материалов. Недостатком визуального и оптического способов дефектоскопии является их существенная ограниченность применения при осуществлении полного контроля параметров электропроводящих элементов электрических кабелей.

- Способы тепловой дефектоскопии используют для контроля локальных неоднородностей и качества электропроводящей проволоки в лабораторных и цеховых условиях [10]. Они основаны на регистрации процессов, возникающих при пропускании через контролируемый участок провода импульсов электрического тока. В области дефекта, например, при порыве или нарушении структуры провода, электрическое сопротивление увеличивается, что приводит к локальному росту температуры. Регистрируя температурное поле изделия, судят о наличии дефектов. При этом оптимальная длительность и частота следования импульсов зависят от толщины провода, а температура контролируется бесконтактным пирометрическим датчиком [11]. Для повышения точности указанного способа тепловой дефектоскопии предложено разбить контролируемый

участок проволоки на четыре части и включить их в мостовую схему Уитсона. Локальные дефекты приводят к росту электрического сопротивления, что вызывает разбаланс моста, что используется для регистрации количества дефектов электропроводящего провода [12]. Общими недостатками этих способов являются низкая достоверность обнаружения дефектов в электропроводящих элементах кабеля из-за неустойчивости теплового рельефа при воспроизведении дефектной картины участка проволоки, а также значительная тепловая инерционность дефектоскопии из-за инерционности тепловых процессов.

- Акустические методы неразрушающего контроля основаны на регистрации параметров упругих колебаний при их взаимодействии с объектом контроля [16]. В процессе контроля акустические сигналы отражаются от дефектов и неоднородностей материала и по их амплитудно-временным характеристикам оценивают качество контролируемого изделия. Метод позволяет выявлять механические параметры электропроводящих элементов кабеля (трещины, обрывы, расслоения), а также применяется для структурного анализа. К недостаткам этого способа следует отнести сложность его практического использования для контроля длинномерного кабеля в условиях его изготовления или прокладки, а также низкую точность определения места нахождения дефекта. Кроме того, он не позволяет осуществлять контроль технического состояния электрического кабеля в широком диапазоне контролируемых параметров.

- Электромагнитные вихревые методы являются одним из основных способов дефектоскопии электропроводящих элементов кабеля [13–15]. Они основаны на анализе взаимодействия первичного электромагнитного поля, создаваемого вихревым преобразователем, со вторичным электромагнитным полем, создаваемым вихревыми токами, наводимыми в электропроводящих элементах кабеля первичным полем. Характер вихревых токов и, соответственно, вторичное электромагнитное поле зависят от параметров токопроводящего элемента кабеля. Вторичное поле воздействует на катушки преобразователя, наводя в них ЭДС (при использовании вихревых преобразователей трансформаторного типа) или изменяя их полное электрическое сопротивление (при использовании параметрических преобразователей). Регистрируя и обрабатывая указанные параметры, получают информацию о свойствах кабеля. Например, при появлении в зоне преобразователя дефекта происходит перераспределение вихревого тока, магнитное поле которого наводит в измерительной обмотке преобразователя электрический сигнал, по параметрам которого можно контролировать локальные физико-химические свойства провода в зоне контроля, а также выявлять дефекты, расположенные на поверхности или в подповерхностном слое. Однако из-за скин-эффекта глубина проникновения электромагнитного поля в металл незначительная, что не позволяет обнаруживать дефекты на глубине более 6–8 мм.

Для электрических кабелей, содержащих стальные токопроводящие жилы, бронепокрытия, электромагнитные экраны существует модифицированный метод дефектоскопии, обладающий повышенной точностью обнаружения дефектов в этих ферромагнитных элементах [17]. Данный метод дефектоскопии заключается в том, что на контролируемый кабель и на эталонный кабель (без дефектов) одновременно воздействуют физическим полем, состоящим из переменного электрического и постоянного магнитного полей. В этом случае в ферромагнитных элементах обоих кабелей возбуждают магнитоэлектрический и магнитомодуляционные эффекты, при помощи которых формируют соответственно в контролируемом кабеле измерительный сигнал, а в эталонном кабеле – опорный сигнал. Эти сигналы сравнивают и по

параметрам результата сравнения судят о наличии дефектов в кабеле. Недостатком данного метода дефектоскопии является ограниченная область применения, т.к. данный модифицированный метод дефектоскопии ориентирован на конструктивные элементы кабеля только из ферромагнитных материалов и не позволяет при этом проводить контроль параметров электропроводящих элементов кабеля из немагнитных материалов.

Другие известные методы дефектоскопии электрических кабелей в основном ориентированы на контроль качества их изоляции [18].

Обоснование нового метода дефектоскопии электрического кабеля

Анализ известных способов контроля дефектов электрических кабелей показал, что каждый из них имеет определенные недостатки, обусловленные теми физическими явлениями, которые реализованы и которые определяют свойства и возможности каждого метода. Авторами предлагается новый способ неразрушающего контроля электропроводящих объектов, который базируется на использовании принципиально нового физического эффекта, не оговоренного в [7], – изменения собственного момента количества движения электрона во внешнем поле. Этот способ, как будет показано ниже, обеспечивает расширение диапазона контролируемых параметров и повышение надежности контроля, что повышает его информативность и приводит к расширению области применения.

Предлагаемый способ определения места дефекта электропроводящих элементов кабеля можно проиллюстрировать схемой его реализации, приведенной на рис. 1. Здесь обозначено: 1 – контролируемый кабель; 2 – индукционный датчик в виде регистрирующей катушки для формирования измерительного сигнала в виде ЭДС индукции $e_{изм}$, пропорционального техническим параметрам кабеля; $\vec{E}_\omega$ – переменное электрическое поле; V – скорость взаимного перемещения контролируемого кабеля и индукционного датчика; x , y и z – оси декартовой системы координат.

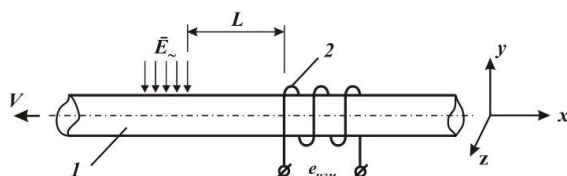


Рисунок 1 – Обобщенная схема структуры метода дефектоскопии

В качестве источника физического поля используется двухэлектродный цилиндрический конденсатор с сосредоточенной емкостью (спиновый конденсатор) 3, состоящий из двух симметрично ориентированных секционных изолированных полуцилиндрических металлических электродов, расположенных коаксиально контролируемому кабелю 1 (рис. 2).

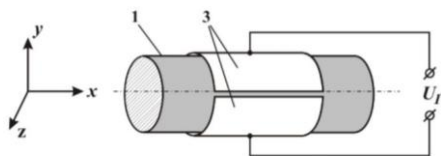


Рисунок 2 – Особенности конструктивного исполнения спинового конденсатора

Для исключения влияния полей рассеяния спинового конденсатора 3 на индукционный датчик 2 и, тем самым, на величину измерительного сигнала, индукционный датчик 2 располагают на расстоянии достаточной удаленности относительно спинового конденсатора 3. Указанное расстояние L (см. рис. 1) определяют экспериментально.

Для объяснения сути предлагаемого способа диагностики сначала рассмотрим физические процессы, возникающие при воздействии электрического поля на немагнитный металлический проводник.

Традиционно для решения различного рода электротехнических задач в основном используют только одно свойство электрона – его заряд e . В то же время электрон имеет еще одно свойство, сугубо квантово-механическую характеристику – собственный момент количества движения, или спин s . Этот собственный момент количества движения может иметь две ориентации относительно внешнего магнитного поля, направленного условно по оси $\vec{Z}$, такие, что две его возможные проекции по направлению этого поля будут принимать следующие значения [19]:

$$s_z = \pm \frac{h}{4\pi}, \quad (1)$$

где h – постоянная Планка.

Спину электрона (1) соответствует спиновый магнитный момент:

$$\vec{p}_s = g_s \vec{s} = -\frac{e}{m} \vec{s} \quad (2)$$

где $g_s = -\frac{e}{m}$ – гиромагнитное отношение для спинового момента; e – абсолютная величина заряда электрона; m – масса электрона.

Следует отметить, что наличие свободных электронов определяет все особенности металлов: способность хорошо проводить электрический ток, большую теплопроводность и т. д.

Покажем возможность использования спиновых эффектов свободных электронов в немагнитных металлических проводниках для контроля их физических свойств.

Известно, что электрическое поле оказывает силовое воздействие на электрический заряд, находящийся в покое или в движении. Фактически напряженность электрического поля E является силой, действующей на единичный электрический заряд.

$$\vec{F} = -e \times \vec{E}. \quad (3)$$

Под действием этой силы электрон, имеющий заряд e и массу m , получает ускорение, равное

$$\vec{a} = e \times \vec{E} / m, \quad (4)$$

а за время Δt между соударениями с поверхностями атомов приобретает дополнительную скорость Δv .

Если учесть, что λ есть расстояние, пробегаемое электроном между двумя столкновениями, а $v_{т.ср}$ при этом является скоростью электрона, то величина этого промежутка времени будет равна

$$\Delta t = \lambda / v_{т.ср}.$$

Проводимость проводника σ тем больше, чем выше концентрация зарядов в единице объема металла n_e , чем больше величина заряда e и чем выше подвижность заряда μ_e , т. е.

$$\sigma = n_e \cdot e \cdot \mu_e, \quad (5)$$

где $\mu_e = \Delta v_q / E$; $\Delta v_q = a \cdot \Delta t = E \cdot e \cdot \lambda / (m \cdot v_{т.ср})$ – скорость смещения электронов в направлении вектора напряженности электрического поля E .

С учетом последнего можем записать:

$$\sigma = n_e \cdot e^2 \cdot \lambda / (m \cdot v_{т.ср}), \quad (6)$$

где e – заряд электрона, равный $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл; $n_e = d \cdot N_A / m_A$ – число электронов в единице объема проводника (плотность электронов проводимости); d – плотность вещества; m_A – атомная масса вещества; N_A – число Авогадро.

Из анализа выражения (6) видно, что проводимость проводника σ является интегральным параметром, который выражает основные физические свойства материала проводника.

При отсутствии электрического поля свободные электроны в металле совершают хаотическое тепловое движение, т.е. имеют в пространстве равномерно распределенную ориентацию.

Под действием электрического поля (3) хаотическое движение электронов в проводнике несколько упорядочивается, что проявляется в виде двух основных факторов: во-первых, электроны во время свободного пробега начинают ориентироваться по полю, т.е. направления траекторий их движения приобретают общую составляющую вдоль электрического поля; во-вторых, электроны приобретают некоторое ускорение в общем направлении вдоль поля, увеличивая скорость и тем самым свою кинетическую энергию. Следует отметить, что этот процесс возникает независимо от того, передвигается кабель 1 или находится в состоянии покоя.

При рассмотрении второго свойства электрона (2), т.е. спинового магнитного момента, следует учитывать тот факт, что электрон ведет себя подобно вращающемуся вихревому кольцу, спин которого ориентирован по направлению движения электрона.

В обычных условиях спины свободных электронов с различной ориентацией компенсируют друг друга, но под воздействием электрического поля все электроны, в каком бы положении они ни находились, разворачивают свои оси так, что образуется некоторая общая составляющая проекций их спинов на направление вектора напряженности электрического поля $\vec{E} = (0, E_y, 0)$:

$$\bar{p}_{sy} = -\frac{e}{m} \times N \times \sum_{n=1}^N \bar{s}_n \times \bar{k}_y, \quad (7)$$

где $\bar{k}_y$ – единичный вектор, совпадающий с направлением вектора напряженности электрического поля; $N = n_e \times V_{pa\delta} \times \chi_s$ – эффективное число свободных электронов в рабочем пространстве $V_{pa\delta}$ спинового конденсатора, спины которых ориентированы в направлении единичного вектора $\bar{k}_y$; $\chi_s = \frac{|\vec{E}_y|}{|\vec{E}_{yэф}|}$ – коэффициент спиновой поляризации

для конкретного типа материала проводника; $|\vec{E}_y|$ – значение напряженности действующего электрического поля; $|\vec{E}_{yэф}|$ – значение напряженности электрического поля, при котором происходит максимальная спиновая поляризация всех свободных электронов в единице объема материала проводника в направлении единичного вектора $\bar{k}_y$.

При подаче на электроды спинового конденсатора 3 электрического напряжения вида $U_{\Gamma} = U_m \cdot \cos \omega t$ (см. рис. 2) создается источник возбуждающего монохроматического переменного электрического поля:

$$\vec{E} = E_m \cdot \cos(\omega t + \varphi_E). \quad (8)$$

Под воздействием переменного электрического поля (8) определенной циклической частоты $\omega = \omega_s$ (резонансная частота спинового взаимодействия) в объеме электропроводящего элемента кабеля, заключенного в рабочем пространстве $V_{pa\delta}$ спинового конденсатора 3, возбуждаются колебательные смещения свободных

электронов в направлении вектора напряженности электрического поля с определенной колебательной скоростью:

$$\Delta \bar{v}_q = -\int \frac{e}{m} E_m \cos(\omega_s t + \varphi_E) dt = \frac{e}{\omega_s m} E_m \sin(\omega_s t + \varphi_E) = \Delta v_{qm} \sin(\omega_s t + \varphi_E), \quad (9)$$

где $\Delta v_{qm} = \frac{e}{\omega_s m} E_m$ – модуль колебательной скорости электрона.

В этом случае спиновые магнитные моменты всех свободных электронов внутренней структуры электропроводящего элемента в рабочем пространстве $V_{раб}$ спинового конденсатора 3 синхронизируются частотой этого электрического поля, т.е. получают соответствующую периодически изменяющуюся одинаковую направленность. Фактически колебательная скорость электронов (9) приводит к периодической переориентации спинов электронов s_n ($n = 1-N$), которая в итоге приводит к возникновению в рабочем пространстве $V_{раб}$ спинового конденсатора 3 соответствующей упорядоченной циркуляции суммарного спинового магнитного момента свободных электронов проводника.

Существование подобной области спиновой циркуляции приводит к дальнейшей последовательно индуцированной спиновой поляризации свободных электронов в остальной структуре материала проводника.

Следует отметить, что в основе данного физического процесса лежит спин-спиновое взаимодействие, т.е. прямое взаимодействие спиновых магнитных моментов свободных электронов, пропорциональное произведению спиновых магнитных моментов и обратно пропорциональное кубу расстояния между ними [20]:

$$F_{si sj} = \frac{\bar{p}_{si} \bar{p}_{sj}}{r^3} \bar{r}, \quad (10)$$

где $\bar{r} = \bar{r}_i - \bar{r}_j$; $r \equiv |\bar{r}|$.

Например, для двух свободных электронов со спиновыми магнитными моментами $\mu = g \cdot \mu_B \cdot s$, находящихся на расстоянии r_{ij} друг от друга, энергию такого взаимодействия можно определить выражением [21]:

$$W_g = \frac{g^2 \mu_B^2}{r_{ij}^3} \left[(s_i s_j) - 3 \times \frac{(s_i r_{ij})(s_j r_{ij})}{r_{ij}^2} \right],$$

где s_i и s_j – операторы спинов электронов; g -фактор – множитель, связывающий гиромагнитное отношение частицы с классическим значением гиромагнитного отношения; μ_B – магнетон Бора.

Таким образом, под воздействием переменного электрического поля в рабочей зоне спинового конденсатора 3 в структуре проводника кабеля 1 формируется особая область спиновой циркуляции, функционирующая в режиме гармонического осциллятора с вынужденными колебаниями.

Для такого простейшего гармонического осциллятора можно записать уравнение вида

$$\frac{d^2 \bar{p}_s}{dt^2} - \omega_s^2 \times \bar{p}_s = Q(\bar{y}, t), \quad (11)$$

где $Q(\bar{y}, t) = -\frac{e E_m}{m} \sin(\omega_s t + \varphi_E)$ – некоторая функция, характеризующая распределенные внешние воздействия.

Решая это неоднородное дифференциальное уравнение второго порядка с учетом резонансного режима работы гармонического осциллятора, получим следующее выражение:

$$\bar{p}_s = p_{sm} \times \cos(\omega_s t + \varphi_s) = -\frac{e}{m} \times \bar{s} \times \cos(\omega_s t + \varphi_s). \quad (12)$$

В соответствии с уравнениями (7) и (12), для упорядоченной циркуляции суммарного спинного магнитного момента свободных электронов проводника в направлении оси $\bar{x}$ составим следующее уравнение:

$$\bar{p}_{s\Sigma} = \left[\frac{e}{m} \times N \times \sum_{n=1}^N \bar{s}_n \times \bar{k}_x \right] \times \cos(\omega_s t + \varphi_s) = p_{s\Sigma m} \times \cos(\omega_s t + \varphi_s), \quad (13)$$

где $p_{s\Sigma m} = \left[\frac{e}{m} \times N \times \sum_{n=1}^N \bar{s}_n \times \bar{k}_x \right]$ – максимальное (амплитудное) значение суммарного спинного магнитного момента свободных электронов в рабочем пространстве $V_{раб}$ спинного конденсатора 3.

Посредством данного гармонического осциллятора (13) возбуждается волновой процесс спиновой индукции с фазовой скоростью $\bar{v} = \lambda \times f$ вдоль оси $\bar{x}$ по всей длине электропроводящих элементов кабеля.

В этом случае процесс возбуждения и распространения плоской гармоничной волны вдоль координатной оси $\bar{x}$ описывается уравнением вида

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \times \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0. \quad (14)$$

С учетом выражения (14) в линейном приближении для распространения волнового процесса спиновой индукции можем записать:

$$\frac{\partial^2 \bar{B}_s}{\partial x^2} - k^2 \times \frac{\partial^2 \bar{B}_s}{\partial t^2} = 0. \quad (15)$$

Решением волнового уравнения (15) является следующее аналитическое выражение:

$$\bar{B}_s = B_{sm} \cos(\omega_s t - kx + \varphi_B), \quad (16)$$

где $k = i\omega \sqrt{\bar{\epsilon}_a \bar{\mu}_a} = \frac{1+i}{\sqrt{2}} \sqrt{\omega \mu_a \sigma}$ – коэффициент распространения волны при отсутствии магнитных потерь, т.е. $\bar{\mu}_a = \mu_a$ – комплексная магнитная проницаемость материала проводника; $\bar{\epsilon}_a = \epsilon_a - i\sigma/\omega \approx -i\sigma/\omega$ – комплексная диэлектрическая проницаемость материала проводника, т.е. при $\sigma \gg \omega \epsilon_a$; $B_{sm} = p_{s\Sigma m} \times \eta_s \times \left[1 - \frac{(\omega_s - \omega_0)}{\omega_0} \right]$ – амплитудное значение вектора спиновой индукции; $\eta_s = f(\sigma, \omega)$ – коэффициент эволюции волнового процесса спиновой индукции, отражающий эффективность преобразования энергии гармонического осциллятора в волновой процесс спин-спиновой взаимодействия; ω_0 – граничная нижняя циклическая частота возбуждающего электрического поля, при которой $\eta_s = 0$; $\omega_s \geq \omega_0$.

В соответствии с (16) для потока спиновой индукции справедливо выражение

$$\bar{\Phi}_s = \bar{B}_s S = S \times B_{sm} \times \cos(\omega_s t - kx + \varphi_B), \quad (17)$$

где S – среднее сечение проводника.

В основе рассматриваемого физического явления лежит тот факт, что электроны, взаимодействуя своими спиновыми магнитными моментами друг с другом по всей длине электропроводящего элемента кабеля, образуют своего рода пространственно распределенный вдоль этого элемента отрицательный заряд с волнообразно

изменяющейся во времени спиновой поляризации, образующей своего рода поток спиновой индукции (рис. 3).

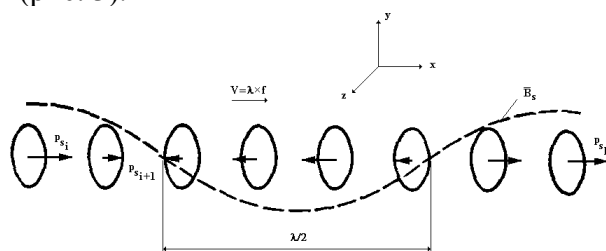


Рисунок 3 – Пространственное распределение потока спиновой индукции

Поток спиновой индукции (17), воздействуя на витки обмотки индукционного датчика, индуцирует в этой обмотке соответствующую ЭДС:

$$e_{изм} = -w_k \frac{d\Phi_s}{dt} = w_k \times \omega \times S \times B_{sm} \times \sin(\omega t - kx + \varphi_B). \quad (18)$$

Обобщая вышесказанное и в соответствии с (18), можно констатировать следующее:

1. Переменное электрическое поле создает область спиновой циркуляции в рабочей зоне спинового конденсатора 3.

2. Область циркуляции спиновых магнитных моментов свободных электронов, выступая гармоническим осциллятором, посредством спин-спиновой взаимодействия возбуждает в примыкающих к ней структурах электропроводящего элемента кабеля бегущую волну поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов (поток спиновой индукции) и управляет ее дальнейшей эволюцией в структуре этого элемента по всей его длине.

3. Бегущая волна поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов (поток спиновой индукции), взаимодействуя с катушкой индукционного датчика 2, приводит к возникновению соответствующей выходной переменной ЭДС на концах этой катушки.

4. Параметры (амплитуда и фаза) регистрируемой выходной ЭДС $e_{изм}$ обмотки индукционного датчика 2 фактически несут информацию не только о геометрических характеристиках электропроводящих элементов кабеля, но и о физико-химических свойствах их материала.

Для возникновения устойчивого процесса поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов переменное электрическое поле создают на резонансной частоте поляризации спиновых магнитных моментов свободных электронов структур электропроводящих элементов кабелей. Указанная частота переменного электрического поля определяется экспериментальным путем.

Особенности реализации нового метода определения места дефекта электропроводящих элементов кабеля можно представить в виде соответствующей блок-схемы (рис. 4), где обозначено: 1 – контролируемый кабель; 2 – индукционный датчик в виде регистрирующей катушки; 3 – спиновой конденсатор; e_{mk} и φ_k – текущие значения параметров (амплитуда и фаза) ЭДС индукции $e_{изм.контр}$ при использовании контролируемого кабеля; e_{mo} и φ_o – фиксированные значения параметров (амплитуда и

фаза) ЭДС индукции $e_{\text{изм.оп}}$ при использовании эталонного кабеля без дефектов; Δe_m и $\Delta \varphi_m$ – разностные текущие значения параметров, полученные в результате процедуры сравнения соответствующих параметров ЭДС индукции $e_{\text{изм.контр}}$ и $e_{\text{изм.оп}}$.

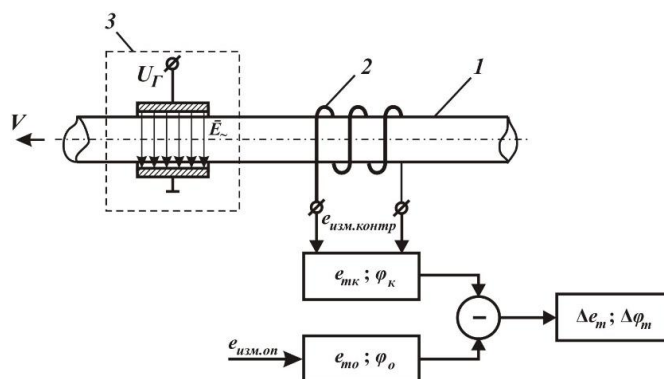


Рисунок 4 – Блок-схема варианта реализации нового метода дефектоскопии

Предварительно, с использованием эталонного образца каната без дефектов посредством воздействия на него переменным электрическим полем от спинового конденсатора 3 формируют индукционным датчиком опорный сигнал в виде ЭДС индукции $e_{\text{изм.оп}}$, пропорционального техническим параметрам этого эталонного кабеля. Затем между электродами спинового конденсатора 3 размещают контролируемый электрический кабель 1, перемещают его относительно спинового конденсатора 3 и индукционного датчика 2, формируя тем самым контрольный сигнал в виде ЭДС индукции $e_{\text{изм.контр}}$.

При наличии дефекта электропроводящих элементов на контролируемом участке кабеля 1 в месте расположения индукционного датчика 2, например, обрыва или существенного уменьшения живого сечения этих элементов, на этом участке происходит срыв процесса спиновой магнитной поляризации свободных электронов, что в итоге приводит к исчезновению потока спиновой индукции, а соответственно – и к значительному уменьшению ЭДС $e_{\text{изм.контр}}$. В свою очередь, дефекты, вызывающие аномальные изменения в структуре электропроводящих элементов контролируемого кабеля и связанные, прежде всего, с изменением состава материала этого элемента, проявятся в виде значительных девиаций фазы регистрируемой ЭДС $e_{\text{изм.контр}}$.

Поэтому для обнаружения дефектов типа обрыва или потери сечения в качестве результата сравнения используют разность амплитуд контрольного и опорного сигналов, а для обнаружения дефектов типа нарушения сплошности или отклонения от заданного химического состава в качестве результата сравнения используют разность фаз контрольного и опорного сигналов.

При отключении спинового конденсатора 3 от возбуждающего переменного напряжения свободные электроны в электропроводящих элементах кабеля 1 возвращаются к своему первоначальному хаотическому состоянию, при котором их спиновые магнитные моменты утрачивают свою периодически изменяющуюся одинаковую направленность, т.е. электроны теряют индуцированную поляризацию своих спиновых магнитных моментов, в результате чего исчезает поток спиновой индукции.

Описанные процедуры контроля и их последовательность выполняются в том случае, если необходимо оперативно зафиксировать наличие и вид дефекта электропроводящих элементов контролируемого кабеля. Такой контроль целесообразно проводить непосредственно в процессе производства, что позволит в режиме реального времени отслеживать дефекты кабельных изделий и вносить необходимые корректировки в технологический процесс их изготовления. Кроме того, его эффективно использовать в том случае, когда требуется в полевых условиях провести процесс отбраковки неисправного кабеля, например, непосредственно в процессе монтажа кабеля при его размотке с бобины.

Экспериментальные исследования устройства, реализующего описанный способ, показали высокую достоверность определения места дефекта электропроводящих элементов кабеля, и также высокую эффективность контроля физических параметров самого дефекта.

Отдельные результаты этих исследований представлены в виде соответствующей графической интерпретации на рис. 5, где обозначено: U_{Γ} – напряжение возбуждения спинного конденсатора; U'_{Al} и U''_{Al} – электрические напряжения с регистрирующей катушки индукционного датчика при контроле алюминиевых электропроводящих элементов кабеля с различными сечениями; U'_{Cu} и U''_{Cu} – электрические напряжения с регистрирующей катушки индукционного датчика при контроле медных электропроводящих элементов кабеля с различными сечениями.

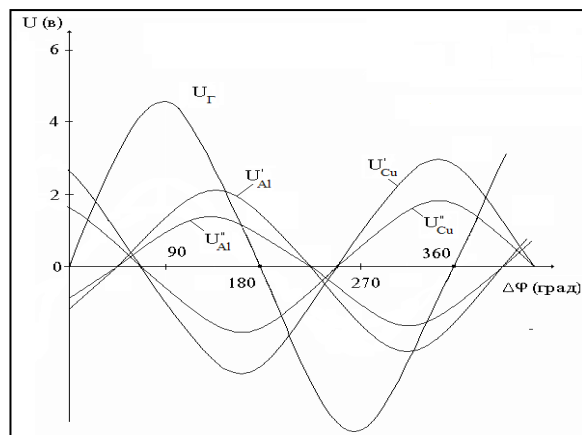


Рисунок 5 – Графическая интерпретация результатов экспериментальных исследований

Для наглядности, в качестве примера приводятся результаты экспериментальных исследований, полученные для соответствующих наборов разного сечения одножильных алюминиевых и медных проводов, где разница между сечениями проводов из однотипных материалов составляла 8÷10 %. На графиках четко прослеживаются зависимость амплитуды регистрируемых сигналов от поперечного сечения однородных проводников и существенные фазовые изменения регистрируемых сигналов относительно фазы напряжения возбуждения спинного конденсатора при изменении самого материала электропроводящих элементов.

Заключение

Спин-поляризационные явления, возникающие при воздействии переменного электрического поля на свободные электроны электропроводящих элементов кабеля и обусловленные наличием у электронов поляризуемого спина, открывают широкие возможности для детального исследования как самой структуры электропроводящих элементов кабеля, так и их физических свойств. Предложенный способ позволяет с высокой точностью определить место повреждения электропроводящих элементов кабелей и оценить способность кабеля выполнять свои функции. К основным преимуществам этого способа следует отнести следующие качества:

- возможность проведения контроля электропроводящих элементов кабеля из любых материалов;
- точность и надежность контроля не зависит от величины и равномерности скорости перемещения кабеля, а также от вибрации и его поперечных колебаний относительно источника физического поля и индукционного датчика;
- позволяет осуществлять контроль при неподвижном кабеле;
- обеспечивает неразрушающую диагностику кабеля без ухудшения его эксплуатационных характеристик;
- является простым в использовании при контроле параметров как в процессе изготовления кабеля, так и при его размотке с бобины в процессе укладки.

Таким образом, по сравнению с известными методами дефектоскопии предлагаемый способ отличается расширенной областью применения и обеспечивает повышение как точности, так и чувствительности контроля.

Важной особенностью предлагаемого нового метода дефектоскопии является то, что данный метод может быть эффективно использован не только для диагностики электрических кабелей и проводов, но и для других длинномерных изделий из металлических немагнитных материалов, выполненных в виде стержней, труб и т.п.

Литература

1. Гуревич Ю.Е., Кабиков К.В. Особенности электроснабжения, ориентированного на бесперебойную работу промышленного потребителя. – М.: Торус Пресс, 2015. – 408 с.
2. Хорольский В. Я., Таранов М.А. Надежность электроснабжения. – М.: Форум, Инфра-М, 2013. – 128 с.
3. Холодный С. Д., Серебрянников С. В., Боев М. А. Методы испытаний и диагностики в электроизоляционной и кабельной технике. – М.: Изд-во МЭИ, 2009. – 232 с.
4. Свендровский А. Р. Контроль технологических параметров процесса изготовления кабельных изделий // Труды Российской научно – технической конференции "Новейшие технологии в приборостроении". Ч. 2. Томск, Изд-во ТПУ, 1997. – С. 68 –71.
5. Глушук П.С. Система контроля качества производства кабельных изделий // Известие ТПУ. 2004. – №3. – С. 118–121.
6. Benjamin T.L. Power Cable Diagnostics: Field Application and Case Studi // Neta World, USA. – 2004. – P. 1–6.

7. ГОСТ Р 56542-2015. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. – М.: Стандартиформ, 2016. – 12 с.
8. Фёдоров Е.М., Гольдштейн А.Е., Редько В.В. Методы и приборы оптического контроля диаметра и овальности электрических кабелей в процессе их производства // Ползуновский вестник, 2010, № 2. – С. 141–148.
9. Приборы технологического контроля для кабельного производства. Каталог продукции «ЭРМИС-2003». Томск, 2003. – 16 с.
10. Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И. Тепловой неразрушающий контроль изделий. – М.: Наука. 2002. – 472 с.
11. А.С. 1770870. Способ тепловой дефектоскопии. G01N 25/18. Оpubл. 23.10.92. Бюл. № 39.
12. Бочкарев И.В., Брякин И.В. Способ дефектоскопии / Патент РФ № 2424507. G01N 27/20. Оpubл. 20.07.2011. Бюл. № 20.
13. Герасимов В.Г., Покровский А.Д., Сухоруков В.В. Неразрушающий контроль. Кн. 3. Электромагнитный контроль. – М.: Высшая школа, 1992. – 320 с.
14. Яковлев С.Г. Методы и аппаратура магнитного и вихревого контроля. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2003. – 88 с.
15. Шубочкин А.Е. Развитие и современное состояние вихретокового метода неразрушающего контроля. – М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – 288 с.
16. Неразрушающий контроль. Кн. 2. Акустические методы контроля / Под ред. В. В. Сухорукова. – М.: Высшая шк., 1992. – 283 с.
17. Бочкарев И.В., Брякин И.В., Гунина М.Г. Система оперативного контроля технического состояния электрических кабелей // Проблемы автоматизации и управления. 2018. № 1 (34). – С.55 – 63.
18. Редько В.В. Электроискровой контроль качества изоляции кабельных изделий. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – 176 с.
19. Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. – М.: Наука, 1977. – 940 с.
20. Агранович В.М., Галанин М.Д. Перенос энергии электронного возбуждения в конденсированных средах. – М.: Наука, 1978. – 383 с.
21. Смоленский Г.А., Леманов В.В. Ферриты и их техническое применение. М.: Наука, 1975. – 219 с.

Х. Г. Багиев, И. В. Брякин, И. В. Бочкарев

Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР

Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ СИЛОВЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Рассматриваются особенности применения современных методов контроля силовых кабельных линий таких, как импульсная рефлектометрия, методы частичных разрядов и кратковременной дуги, волновой метод. Анализируются физические эффекты, лежащие в основе реализации данных методов контроля. Системно излагается регламент необходимых операционных процедур соответствующих методов контроля. Предлагается для улучшения качественных показателей методов контроля использование новых физических эффектов.

Ключевые слова: кабель; кабельная линия; классификация методов определения места повреждения кабеля; дистанционные и топографические методы; метод импульсной рефлектометрии; метод частичных разрядов; метод кратковременной дуги; волновой метод.

Для надежного и бесперебойного снабжения электроэнергией потребителей в городах и поселках важнейшее значение имеет поддержание кабельного хозяйства в исправном состоянии, поскольку неисправности и повреждения силовых кабелей наносят большой ущерб экономической и социальной сфере любого общества [1]. В связи с этим быстрое и точное нахождение и устранение повреждений кабельной сети является важным экономическим фактором [2].

Известно, что кабельные линии, питающие промышленные или коммунальные объекты, должны удовлетворять определенным требованиям в отношении электрической прочности изоляции и целостности электропроводящих элементов этой линии [3]. Основными причинами возникновения подобных повреждений кабельных линий являются заводские дефекты; дефекты монтажа и прокладки; пробой и вмятины, нанесенные при раскопках на кабельных трассах; коррозия свинцовой оболочки; старение изоляции или ее перегрев; обрывы токоведущих жил при осадках или смещениях грунта на трассе линии; перегорание жил во время короткого замыкания.

Не удовлетворяющая существующим требованиям кабельная линия относится к категории «поврежденных» и должна быть отключена со стороны как потребителя, так и поставщика электроэнергии, что, в свою очередь, предопределяет необходимость быстрого нахождения места повреждения и его оперативного устранения. Разнообразие структуры и условий работы электрических сетей, а также причин возникновения дефектов и характера повреждений не позволяет создать универсальный метод определения места повреждения кабеля (ОМПК).

В реальных условиях место повреждения кабельной линии обычно определяют в два приема: сначала находят зону повреждения кабеля, после чего локализируют место повреждения в пределах этой зоны. Соответственно, существующие методы ОМПК условно можно разделить на две основные группы: 1 – дистанционные методы, позволяющие определять расстояние от места измерения до места повреждения, а также тип повреждения; 2 – топографические методы, указывающие место повреждения непосредственно на трассе (географически). На рис. 1 представлена классификация методов ОМПК [4–6].

Следует отметить, что даже при высокой точности дистанционных методов невозможно гарантировать точность места дефекта для проведения раскопок на трассе

без дополнительной проверки топографическим методом. Это связано с тем, что наличие точных планов не всегда отражает изменения глубины траншеи, незначительных уклонов поверхности и т. п.

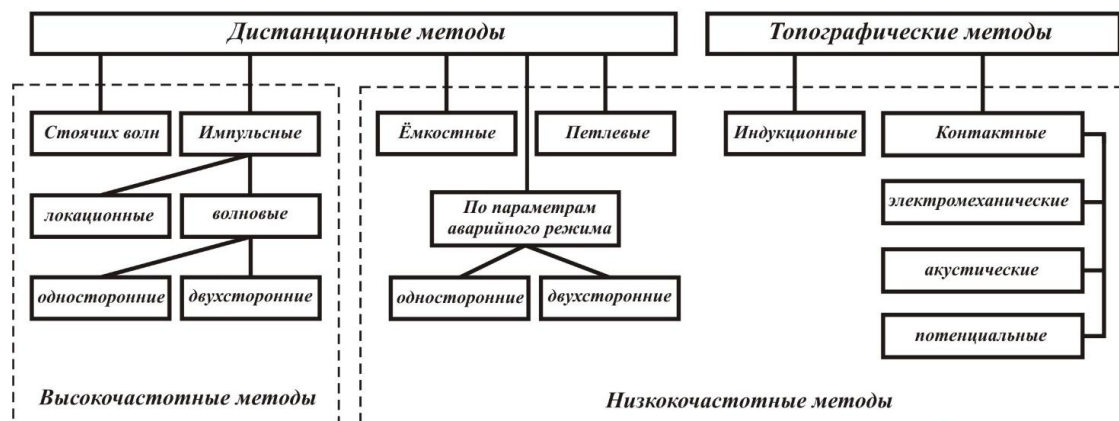


Рисунок 1 – Классификация методов ОМП

Поэтому для ОМПК необходимо совместное применение как относительного, т.е. дистанционного, так и абсолютного, т.е. топографического, методов ОМПК. В этом случае относительный метод обеспечит оперативность ориентировочного определения места повреждения, куда должен отправиться измеритель, а абсолютный метод позволит уточнить место раскопок.

Большинство из перечисленных методов применяются после осуществления прожигания поврежденного места кабельной линии в целях снижении величины переходного сопротивления. Структурная схема системы ОМПК приведена на рис. 2



Рисунок 2 – Структурная схема системы ОМП в электрических сетях

К методам определения места повреждения в силовых кабельных линиях предъявляются следующие требования: 1 – высокая точность: погрешность не должна превышать ± 3 м, что обусловлено трудностью раскопок при расположении кабельных линий под усовершенствованными покрытиями; 2 – быстрота определения: время определения места повреждения не должно превышать нескольких часов, что обусловлено необходимостью скорейшего ввода в эксплуатацию кабельной линии; 3 – высокая надежность применяемых аппаратов; 4 – безопасность производства работ [7].

С точки зрения наибольшего соответствия указанным выше требованиям, в настоящее время широкое распространение получили следующие методы контроля силовых кабельных линий: импульсной рефлектометрии, частичных разрядов, кратковременной дуги и волнового метода (рис. 3) [8].

Метод импульсной рефлектометрии успешно используется в практике определения мест повреждения в силовых кабельных линиях на протяжении многих лет [9]. Данный метод осуществляется посредством следующих операционных действий:

- 1 - зондирование кабеля (двухпроводной линии) импульсами напряжения;
- 2 - прием импульсов, отраженных от места повреждения и неоднородностей волнового сопротивления;
- 3 - выделение отражений от места повреждений на фоне помех (случайных и отражений от неоднородностей линий);
- 4 - определение расстояния до повреждения по временной задержке отраженного импульса относительно зондирующего.

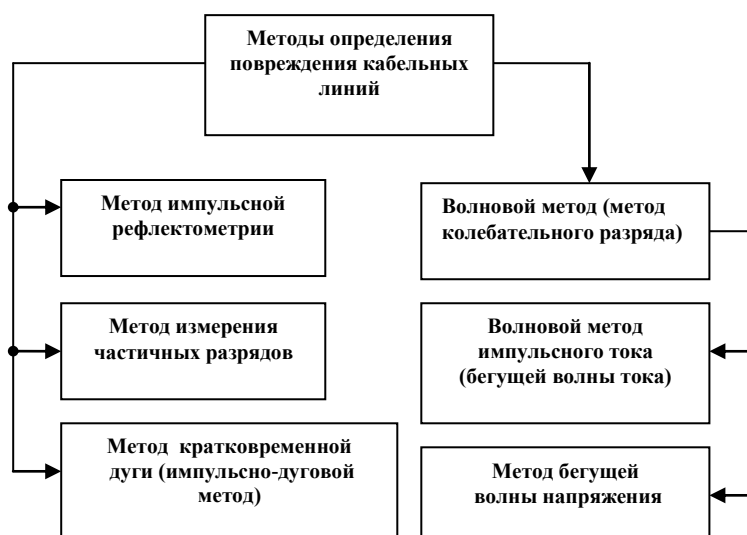


Рисунок 3 – Наиболее распространенные методы ОМПК

Упрощенная структурная схема импульсного рефлектометра приведена на рис. 4.

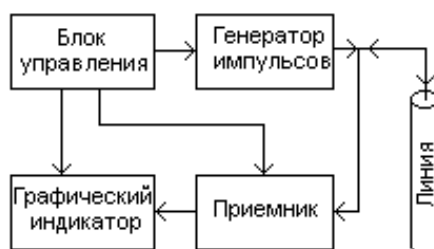


Рисунок 4 – Упрощенная структурная схема импульсного рефлектометра

С генератора импульсов зондирующие импульсы подаются в линию. Отраженные импульсы поступают с линии в приемник, в котором производятся необходимые преобразования над ними. С выхода приемника преобразованные сигналы поступают на графический индикатор. Все блоки импульсного рефлектометра функционируют по сигналам блока управления. На графическом индикаторе рефлектометра воспроизводится рефлектограмма кабельной линии - распределение отраженных сигналов как реакция линии на зондирующий импульс. Если кабельная линия не имеет повреждений, то импульс распространяется от начала до конца линии беспрепятственно. При наличии повреждения часть энергии этого импульса отражается от этого повреждения и возвращается к началу линии, причем если линия оборвана, то вся энергия импульса возвращается к началу линии. По времени задержки между посланным и принятым импульсами можно определить расстояние до места повреждения. Вид отраженного сигнала при различных повреждениях представлен на рис. 5.

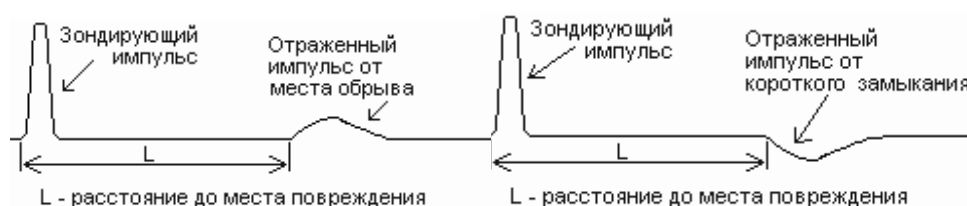


Рисунок 5 – Рефлектограммы кабельной линии в зависимости от характера повреждения

Из рис. 5 следует, что при обрыве отраженный импульс имеет ту же полярность,

что и зондирующий, а при коротком замыкании отраженный импульс меняет полярность. В идеальном случае, когда отражение от повреждения полное и затухание отсутствует, амплитуда отраженного сигнала равна амплитуде зондирующего импульса.

Популярность метода импульсной рефлектометрии обусловлена его достоинствами [10]:

1. Наглядностью. По рефлектограмме кабельной линии можно обнаружить все естественные элементы (неоднородности) кабельной линии (начало кабельной линии, муфты, кабельные вставки, ответвления, конец линии, а также место дефекта); определить взаимное расположение элементов кабельной линии и дефекта; определить расстояние до места повреждения и любой неоднородности кабеля.

2. Высокой точностью определения расстояния до места повреждения с цифровым отображением измеренного значения. Инструментальная погрешность измерения расстояния у современных рефлектометров составляет 0,2...2 %.

3. Относительной простотой и удобством применения. Для проведения измерений необходим только один прибор – импульсный рефлектометр, дополнительное оборудование не требуется. Подключение к кабельной линии производится только с одной стороны.

4. Возможностью определения повреждений разного типа: короткое замыкание, обрыв, понижение сопротивления изоляции.

5. В современных цифровых рефлектометрах обеспечивается возможность подробного анализа конкретного выбранного участка кабеля за счет введения растяжки изображения этого участка на рефлектограмме.

Возможности метода импульсной рефлектометрии по ОПМК ограничены в случаях, когда сопротивление в месте повреждения значительно (в 10–20 раз и более) выше, чем волновое сопротивление линии. В этом случае отражение от места повреждения имеет малую амплитуду и его сложно обнаружить по рефлектограмме на фоне помех. Аналогичная ситуация возникает при повреждениях, которые проявляются только при подаче на кабель высокого напряжения. Сопротивление такого повреждения при отсутствии напряжения имеет очень большую величину. По рефлектограмме такое повреждение обнаружить невозможно. Если же на кабель подать напряжение, то в этом месте возникает пробой.

Для преобразования высоких сопротивлений в месте повреждения кабеля в низкие, необходимые для эффективного использования метода импульсной рефлектометрии, используют операцию прожига. От воздействия на кабельную линию прожигающей установки в месте повреждения сначала наступает пробой, а затем протекает соответствующий ток, от которого выделяется энергия и происходит науглероживание канала пробоя. Сопротивление в месте повреждения снижается.

Однако использование прожига имеет свои негативные моменты: 1 – требуются дополнительные аппаратные и энергетические затраты; 2 – снижение сопротивления в месте повреждения, достигнутое в результате прожига, позволяет эффективно применить метод импульсной рефлектометрии, но не позволяет использовать такой эффективный трассовый метод, как акустический; 3 – в процессе прожига кабель подвергается большой дополнительной нагрузке, что может отрицательно сказаться при его дальнейшей эксплуатации; 4 – при прожиге в месте повреждения выделяется большое количество энергии, что может повредить соседние кабели.

Волновой метод (метод колебательного разряда) основывается на возникновении пробоя в месте повреждения, вызывающего появление в кабельной линии волновых процессов [11]. Данный метод ориентирован на определение расстояния до места повреждения и имеет два варианта реализации: метод бегущей волны напряжения и метод импульсного тока.

Метод бегущей волны напряжения реализуется путем подачи в кабельную линию медленно повышающегося напряжения от соответствующего источника высокого испытательного напряжения через сопротивление, величина которого значительно больше волнового сопротивления линии [12]. Структурная схема реализации волнового метода бегущей волны напряжения приведена на рис. 6.



Рисунок 6 – Структурная схема реализации волнового метода бегущей волны напряжения

Под влиянием отрицательного испытательного напряжения в момент времени t_0 на расстоянии L происходит пробой (короткое замыкание) и разряд. В месте повреждения формируются электромагнитные волны положительной полярности, так как испытательное напряжение имело отрицательную полярность, а коэффициент отражения в месте пробоя (короткого замыкания) также отрицателен $K = -1$.

Волновой процесс при методе бегущей волны напряжения показан на рис. 7.

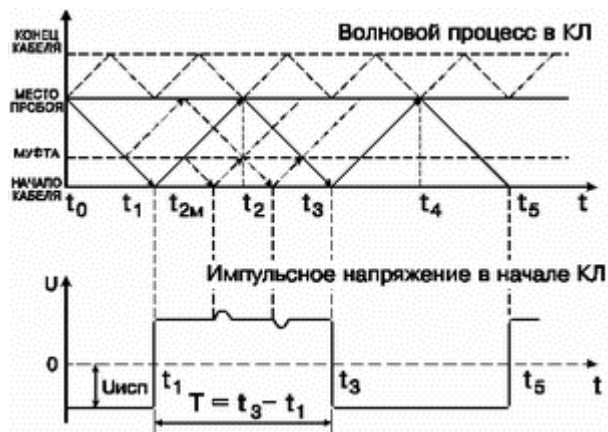


Рисунок 7 – Волновой процесс при методе бегущей волны напряжения

Одна из волн распространяется от места пробоя к началу кабеля, а другая – к концу кабеля. Достигнув начала кабеля, первая волна отражается от большого сопротивления источника и, не изменяя полярности, распространяется к месту повреждения. В месте повреждения вновь возникает пробой и отражение с обратным знаком, и так далее. Затухая, волновой процесс продолжается до тех пор, пока энергии волны достаточно для пробоя в месте повреждения.

Волновой метод импульсного тока (бегущей волны тока) используют в том случае, если высокоомные повреждения (снижение сопротивления изоляции или высокоомное замыкание жилы на землю, или малое расстояние между проводниками в муфтах) не удастся преобразовать с помощью прожига в низкоомное повреждение [13]. Причинами могут быть просачивание в кабель воды или заплывающие повреждения.

В отличие от метода бегущей волны напряжения выходное сопротивление высоковольтного импульсного генератора должно быть значительно меньше волнового сопротивления кабельной линии и коэффициент отражения напряжения от начала линии и места повреждения в момент пробоя равен $K_u = -1$, а коэффициент отражения тока $K_i = 1$. В связи с этим в качестве высоковольтного импульсного генератора следует использовать источник высокого напряжения, у которого на выходе включен высоковольтный конденсатор и специальный разрядник, с которого высоковольтные импульсы поступают в кабель.

Структурная схема включения устройств для осуществления волнового метода импульсного тока показана на рис. 8.



Рисунок 8 – Структурная схема устройств для осуществления волнового метода импульсного тока

Ударная волна посылается в поврежденный кабель в момент t_0 и в момент t_1 достигает места повреждения (рис. 9). Под воздействием ударной волны происходит пробой поврежденного участка кабельной линии в момент t_{13} , вызывающий отражение. Этот отраженный сигнал возвращается к началу кабеля в момент t_2 и отражается от начала кабеля (входное сопротивление генератора импульсов эквивалентно короткому замыканию) в сторону повреждения и в момент t_4 снова достигает начала кабеля и т.д.

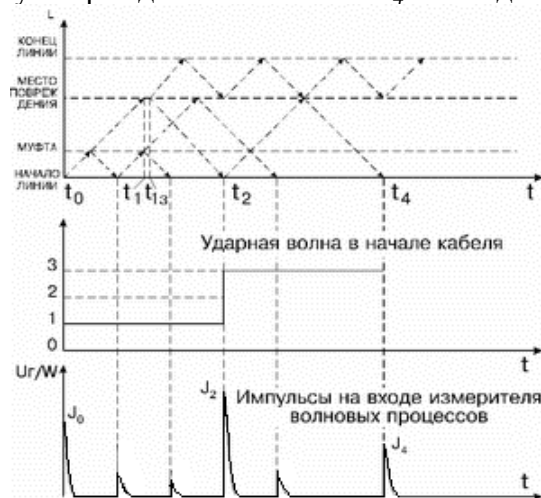


Рисунок 9 – Волновой процесс при методе бегущей волны тока

Состояние пробоя (длительность электрической дуги) сохраняется до тех пор, пока достаточно энергии для горения дуги. Для того чтобы вызвать пробой в месте повреждения, необходимо в течение определенного времени ($t_{13} - t_1$) воздействовать на поврежденный участок (время ионизации). Это время зависит от амплитуды высоковольтного импульса и переходного сопротивления в месте повреждения. Чтобы исключить влияние задержки ионизации на результат измерения расстояния до места повреждения, замеряют время между первой и второй отраженными волнами $T_l = t_4 - t_2$.

Связь измерителя волновых процессов с кабельной линией производится с помощью специального присоединительного устройства по току (импульсного токопреобразователя). Импульсный токопреобразователь дифференцирует импульсный ток на входе линии и преобразует его в однополярные импульсы, поступающие на вход измерителя волновых процессов.

При волновом методе измерений выходное сопротивление высоковольтного источника не равно волновому сопротивлению линии, поэтому кроме отраженных волн от участка повреждения появляются отраженные от неоднородностей кабеля (муфт, ответвлений) и переотраженные от начала кабеля импульсные сигналы — синхронные помехи, значительно затрудняющие оценку импульсной характеристики кабеля.

При волновом методе расстояние до места повреждения определяется по временной задержке между приходом к началу кабеля импульсов напряжения или импульсов

тока, отраженных от места повреждения. Импульсы напряжения по длительности занимают половину расстояния до места повреждения, а ударные импульсы тока также имеют достаточно большие длительности.

Это приводит к следующим недостаткам по сравнению с методом импульсной рефлектометрии: 1 – сложность анализа полученных импульсных характеристик при измерениях волновым методом (вид этих характеристик зависит не только от характера повреждения и длины линии, но и от величины поданных импульсов, наличия или отсутствия пробоя в месте повреждения и т.д.); 2 – низкая разрешающая способность, то есть невозможность обнаруживать близко расположенные неоднородности (отражения от неоднородностей трудно различимы на импульсной характеристике кабельной линии, а отражения от соседних неоднородностей практически сливаются друг с другом); 3 – по импульсной характеристике невозможно получить ориентировки, расстояние до которых известно (в виде отражений от муфт, кабельных вставок и т.д.); 4 – большая погрешность измерения (обуславливается относительно большими длительностями фронтов и срезов волновых процессов, которые формируются самой линией и процессом пробоя); 5 – невозможность стабильного повторения волновых процессов, что может привести к появлению ошибок (процесс пробоя является очень нестабильным, он в любой момент может прерваться и не повториться в том же виде, что накладывает жесткие требования к быстрой реакции измерителя волновых процессов).

Таким образом, волновой метод по сравнению с методом импульсной рефлектометрии, с одной стороны, позволяет определять сложные (с большим сопротивлением) и неустойчивые (заплывающие) места повреждений кабельных линий, а с другой стороны, имеет существенные недостатки. В значительной степени совместить достоинства метода импульсной рефлектометрии и волнового метода позволяет метод кратковременной дуги.

Метод кратковременной дуги (импульсно-дуговой метод) может быть использован для определения расстояния до места сложного (высокоомного) или неустойчивого повреждения. Сущность метода кратковременной дуги заключается в одновременном воздействии на кабельную линию высоковольтным импульсом и выполнении измерений методом импульсной рефлектометрии [14].

Структурная схема подключения к кабельной линии устройств показана на рис. 10. Высоковольтный импульсный генератор, представляющий собой источник высокого напряжения, у которого на выходе включен высоковольтный конденсатор и специальный разрядник, подключается к кабельной линии через устройство поддержания дуги (его основной компонент – индуктивность).

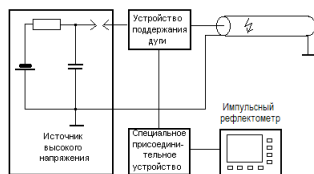


Рисунок 10 – Структурная схема реализации импульсно-дуговой метода

При подаче импульса от источника высокого напряжения в месте высокоомного дефекта возникает пробой, через устройство поддержания дуги начинает протекать ток и пробой "затягивается" – образуется дуговой разряд. За счет индуктивности, имеющейся в устройстве поддержания дуги, ток дуги поддерживается в течение определенного времени (менее секунды). Электрическое сопротивление дуги близко к нулю, что эквивалентно короткому замыканию.

Импульсный рефлектометр подключается через специальное соединительное устройство (фильтр). Зондирующие импульсы от рефлектометра через присоеди-

тельное устройство поступают в кабельную линию, а отраженные импульсы возвращаются в рефлектометр.

Измерения при методе кратковременной дуги реализуются в следующей последовательности:

1. Через присоединительное устройство считывают рефлектограмму кабельной линии и сохраняют ее в памяти импульсного рефлектометра. Так как импульсы с генератора высоковольтных импульсов отсутствуют или имеют недостаточную для пробоя установленную амплитуду, то пробой и дуга в месте сложного или неустойчивого повреждения отсутствуют. На рефлектограмме отраженный сигнал от высокоомного повреждения практически неразличим на фоне помех. Наблюдаются отражения от неоднородностей линии (муфт, кабельных вставок и т.д.) и от разомкнутого конца кабельной линии.

2. Выходное напряжение высоковольтного источника в генераторе высоковольтных импульсов постепенно увеличивают до тех пор, пока в кабельной линии не появятся пробой. В такт с высоковольтными импульсами в месте дефекта будет зажигаться кратковременная электрическая дуга (рис. 11).



Рисунок 11 – Измерения при методе кратковременной дуги

Период повторения кратковременной дуги нестабильный. Зондирующие импульсы подаются в кабельную линию с частотой, которая во много раз больше частоты зажигания дуги. При совпадении зондирующего импульса с моментом зажигания дуги он отражается от дуги как от короткого замыкания, и возвращаются к началу кабеля, где записывается в память рефлектометра. Для более надежного определения места повреждения необходимо добиться неоднократного совпадения зондирующего импульса с моментом зажигания дуги. Импульс, отраженный от дуги, отчетливо виден на рефлектограмме. Дальше дуги импульс не проходит, поэтому на рефлектограмме не видно конца линии.

3. На экране рефлектометра накладывают друг на друга две записанные в рефлектограммы: рефлектограмму до возникновения дуги и рефлектограмму после возникновения дуги. Это позволяет отчетливо наблюдать место начала расхождения рефлектограмм, которое и соответствует месту сложного или неустойчивого повреждения. Наложение рефлектограмм при методе кратковременной дуги показано на рис. 12.

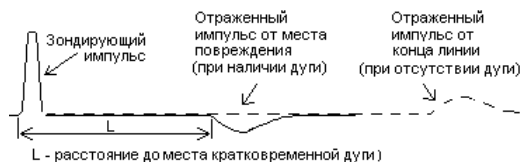


Рисунок 12 – Наложение рефлектограмм при методе кратковременной дуги

Обобщая, можно констатировать, что при методе кратковременной дуги высокоомное повреждение временно переводится в низкоомное.

Достоинствами метода кратковременной дуги являются:

1. Высокая точность измерений. Точность измерения такая же как у метода импульсной рефлектометрии. Есть возможность воспользоваться растяжкой рефлектограммы выбранного участка линии.

2. Простота представления результатов измерения. По рефлектограмме кабельной линии до возникновения кратковременной дуги легко определить длину всей кабельной

линии и ее неоднородности. На рефлектограмме в момент кратковременной дуги присутствует легкое отражение от места повреждения, как отражение короткого замыкания при методе импульсной рефлектометрии. Для устранения влияния неоднородностей достаточно воспользоваться сравнением двух рефлектограмм.

3. В месте повреждения выделяется небольшое, по сравнению с прожигом, количество энергии, поэтому вредное влияние на кабель минимальное. Нет вредного воздействия и на соседние кабели.

4. Возможность реализации этого метода на различных типах кабеля.

5. Возможность применения стандартных высоковольтных источников и измерительных средств. Небольшое количество дополнительных устройств.

В последние годы все более широкое распространение находит мнение о необходимости замены испытаний кабельных линий повышенным напряжением постоянного тока, превышающем рабочее напряжение $U_{\text{раб}}$ в 3–6 раз на диагностику изоляции с помощью измерения частичных разрядов (ЧР), токов утечки, абсорбционных токов и других методов с приложением напряжения $(1-1,5)U_{\text{раб}}$. Это связано с тем, что проведение испытаний кабеля, находящегося в эксплуатации продолжительное время, повышенным напряжением отрицательно влияет на изоляцию и снижает срок эксплуатации.

В отличие от испытаний диагностика изоляции кабельной линии относится к неразрушающим методам контроля [15]. Одним из прогрессивных методов диагностики является метод измерения частичных разрядов (ЧР), позволяющий не только определить уровень частичных разрядов в кабельной линии, но и определить их местонахождение по длине. Фактически ЧР представляет собой электрический разряд длительностью единицы-десятки наносекунд, который частично шунтирует изоляцию кабельной линии. ЧР появляются в слабом месте кабельной линии под воздействием переменного напряжения и приводят к постепенному развитию дефекта и разрушению изоляции.

Метод измерения ЧР заключается в том, что в момент появления частичного разряда в кабельной линии возникает два коротких импульсных сигнала длительностью десятки-сотни наносекунд, которые распространяются к разным концам кабельной линии. Измеряя импульсы, достигшие начала кабеля, можно определить расстояние до места их возникновения и уровень [16].

Структурная схема измерений частичных разрядов в кабельных линиях показана на рис. 13, где PD – выход частичных разрядов; TDR – вход/выход рефлектометра; R_c – резистор согласования; T_p – трансформатор связи; C_p – разделительная емкость; D_p – дроссель; K_n – кнопка проверки разряженности линии.

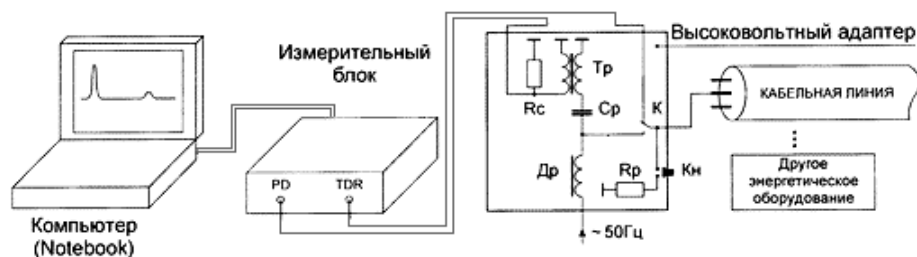


Рисунок 13 – Компьютерный анализатор дефектов и частичных разрядов в кабельных линиях

Основными узлами измерительной схемы являются компьютерный анализатор дефектов и частичных разрядов в кабельных линиях и высоковольтный адаптер. Анализатор может быть выполнен в виде совокупности измерительного блока и портативного компьютера (как показано на рисунке) или в виде специализированного измерительного прибора. Высоковольтный адаптер служит для развязки компьютерного анализатора и источника воздействующего напряжения. Так, короткие импульсы напряжения, распространяющиеся в кабельной линии, беспрепятственно проходят на TDR или

на PD, но не попадают в низкочастотный (50 герц или меньше) источник напряжения. В то же время напряжение $(1 \dots 1,2) \cdot U_{\text{раб}}$ от источника беспрепятственно поступает на кабельную линию. В качестве действующего напряжения может использоваться напряжение промышленной сети или напряжение от источника сверхнизкой частоты.

Последовательность анализа дефектов кабельной линии с ЧР включает в себя следующие процедуры [17]:

1. *Регистрация рефлектограммы кабельной линии.* Кабельная линия отключается от источника действующего напряжения, вызывающего появление частичных разрядов. При помощи кнопки «К_н» на высоковольтном адаптере проверяют разряженность кабельной линии. Компьютерный анализатор включают в режим импульсного рефлектометра и снимают рефлектограмму кабельной линии. По рефлектограмме определяют длину кабельной линии и коэффициент затухания импульсов в линии.

2. *Измерение распределения частичных разрядов по частотам повторения и амплитудам.* Переключают компьютерный анализатор в режим измерения частичных разрядов и снимают гистограмму – распределение частоты следования n импульсов частичных разрядов от амплитуд импульсов от частичных разрядов $U_{\text{чр}}$, пришедших к началу кабельной линии. По гистограмме $n=f(U_{\text{чр}})$ можно сделать вывод о наличии и количестве потенциальных дефектов в кабельной линии. Например, на рис. 14 показана гистограмма кабельной линии с тремя потенциальными дефектами, где дефект № 1 имеет самую высокую частоту следования n_1 и самую маленькую амплитуду импульсов U_1 . Соответствующие параметры имеют дефект № 2 и дефект № 3.

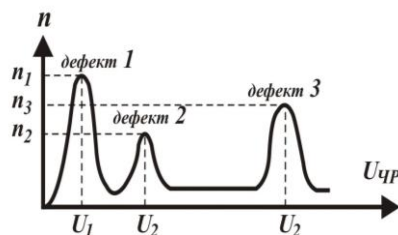


Рисунок 14 – Гистограмма $n = f(U_{\text{чр}})$ кабельной линии с тремя потенциальными дефектами

По амплитуде импульсов частичных разрядов, представленных на гистограмме, еще нельзя делать вывод о мощности частичного разряда в месте дефекта, так как пока неизвестно расстояние до него. В то же время известно, что эти импульсы, имея малые длительности, сильно затухают при распространении по кабельной линии.

3. *Определение расстояния до места каждого частичного разряда, т.е. дефекта.* Посредством компьютерного анализатора дефектов измеряют расстояния L_1 , L_2 и L_3 до каждого из дефектов (рис. 15) и сохраняют их в памяти.

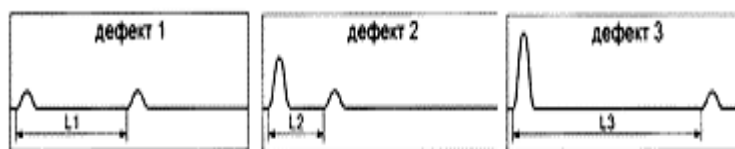


Рисунок 15. Гистограмма дефектов кабельной линии

4. *Расчет мощности и опасности дефектов. Построение таблицы дефектов.* На основе гистограммы и данных о расстоянии до каждого дефекта, компьютерный анализатор вычисляет мощность частичных разрядов в каждом дефекте и строит сводную таблицу дефектов, на основании которой производится оценка опасности каждого дефекта.

Выводы. Исходя из результатов проведенного анализа ситуации в сфере контроля силовых кабельных линий, можно констатировать, что такие повреждения кабеля, как, например, короткое замыкание, повреждение муфты кабеля или изоляции, неизбежно приводят к изменению сопротивления в этом участке кабеля, от которого отражаются сигналы высокой частоты. Поэтому подобные повреждения могут быть эффективно локализованы с помощью рефлектометра, реализующего основной метод локализации повреждений кабеля – метод рефлектометрии [18]. Кроме того, следует отметить, что широкое применение импульсно-дугового метода позволит использовать преимущества и высокую точность импульсной рефлектометрии для локализации высокоомных повреждений силовых кабелей, а решение проблемы старения изоляции следует искать в сфере развития диагностики состояния кабельных линий за счет разработки методов и средств измерения частичных разрядов [19]. Проведение диагностики с помощью так называемого метода возвратного напряжения позволяет проверить состояние кабеля без разрушения отдельных его участков [20].

В целом, операционные возможности рассмотренных методов контроля и их относительно несложная техническая реализация позволяют довольно эффективно выполнять измерения в полевых условиях, что обеспечивает возможность проведения локализации повреждений. Тем не менее, несмотря на эффективность существующих методов ОМПК, они имеют определенные недостатки и зачастую не могут быть использованы в сетях со сложной топологией. При этом точность контроля с использованием известных методов ОМПК часто определяется опытом и интуицией оператора. Усложнение электрических сетей, а также рост числа потребителей, не допускающих длительного отключения, приводят к ужесточению требований к средствам ОМПК с точки зрения точности и оперативности контроля.

Следует отметить, что в рассматриваемых методах ОМПК применяются физические эффекты на основе индуцированных электромагнитных волновых процессов, параметры которых зависят от физических свойств исследуемых электропроводящих материалов. Практика применения данных физических эффектов показала, что качественные показатели методов ОМПК, основанные на данных физических эффектах практически достигли своего предельно возможного уровня. Поэтому разработка новых способов диагностики кабельных линий и современных технических средств диагностирования с более совершенным алгоритмом поиска повреждения и с возможностью одновременной оценки множества диагностических параметров по-прежнему является актуальной проблемой и должна быть направлена, прежде всего, на освоение и применение новых физических эффектов.

В качестве одного из возможных примеров развития такого направления можно привести спин-поляризационные (СП) эффекты, возникающие при воздействии переменным электрическим полем на свободные электроны электропроводящего материала на резонансной частоте их поляризации [21]. По параметрам волнового процесса спиновой индукции определяются электротехнические параметры контролируемого материала.

Другим примером может послужить использование волновых электромагнитно-акустических (ВЭМА) эффектов в электропроводящих твердых телах (неферромагнитные и ферромагнитные материалы и сплавы, волноводы, электромагнитные экраны т.п.). Подобный ВЭМА эффект связан с весьма тонким балансом большого комплекса различных макро- и микроскопических механизмов. Фактически исследования в данной области сводятся к решению задачи об акустических колебаниях в материальной среде под действием пондеромоторной силы, произвольно изменяющейся со временем

и приложенной в некоторой области границы при любых начальных и граничных условиях. В этом случае общая задача состоит в определении полного электромагнитного поля во всех точках распределения плотности вихревых токов, нахождения поперечного взаимодействия первичного и наведённого полей, поля деформаций, порождающего акустическое поле с учётом произвольных неоднородностей среды. При этом пространственно-временное распределение первичного поля считается заданным, поскольку известны свойства возбуждающего источника.

На ВЭМА эффекте можно создать метод ОМПК, реализующий измерения упругих постоянных электропроводящих тел, основанный на генерации и приеме продольных и поперечных ультразвуковых колебаний электромагнитными методами [22]. Кроме того, существует возможность создания адаптивных электромагнитно-акустических систем технической диагностики, основанных на перераспределении энергии электромагнитного поля из-за разности электрофизических свойств эталонной и исследуемой среды, а также регулировки амплитудных значений токов возбуждения и величины фазового сдвига между ними.

Практическое использование СП и ВЭМА эффектов в сфере ОМПК обеспечит получение новой информации о свойствах и структуре электропроводящего материала элементов кабеля, а также позволит создать на новых принципах функционирования необходимые технические системы ОМПК с улучшенными качественными показателями.

Литература

1. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г., Нетребко С.А. Теоретический и практический аспекты повышения надежности кабельных линий электропередачи / Актуальные вопросы технических наук. Уфа. 2014. – С. 127–154.
2. Кудряков А.Г., Сазыкин В.Г. и др. Техническое состояние агропромышленных кабельных линий напряжением 6–10 кВ / Актуальные проблемы энергетики АПК; под ред. В.А. Трушкина. 2014. – С. 174–178.
3. Грунтович, Н. В. Монтаж, наладка и эксплуатация электрооборудования. – Минск: Новое знание; М. : ИНФРА-М, 2013. – 271 с.
4. Шабанов В.А. Методы диагностики силовых кабелей // Электротехника. 2002. № 7. – С. 51–53.
5. Холодный С. Д., Серебрянников С. В., Боев М. А. Методы испытаний и диагностики в электроизоляционной и кабельной технике. – М.: Изд-во МЭИ, 2009. – 232 с.
6. Методы диагностики кабельных линий / Э.А.Гильманов, А.З.Тлявлин, А.Х. Султанов // Электромеханика, электротехнические комплексы и системы. Межвузовский научный сборник. – Уфа: УГАТУ, 2008. – С. 248–252.
7. Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г., Николаев А.М. Организация технического диагностирования силовых кабелей неразрушающими методами / Материалы V межд. научно-практ. конф. 2014. – С. 118–120.
8. Юртин И.И. Неразрушающая диагностика силовых кабельных линий//Электрик. – 2009. – № 11–12. – С. 22–26.
9. Лебедев Г.М. Диагностика изоляции кабельных линий 6–10 кВ методом высокочастотной рефлектометрии // Электрика. 2005. № 5. – С. 39–41.
10. Аксенов Ю.П., Ляпин А.Г., Певчев Б.Г. Применение рефлектометрии для диагностики кабелей // Электрические станции. 1997. № 4. – С. 62–68.

11. Кадомская К.П., Сахно В.В. Метод импульсной диагностики соединительных муфт и оболочек кабелей // Электротехника. 2000. № 12. – С. 12–17.
12. Султанов Г.А., Сазыкин В.Г., Кудряков А.Г., Кучеренко Д.Е. Устройства и методы для определения мест повреждения кабельных линий / Наука XXI века – по итогам межд. научно-практ. конф. 2016. – С. 86–88.
13. Привалов И.Н., Пугачев А.А., Таджибаев А.И. Диагностика электрических кабелей // Научно-технические ведомости СПбГПУ. – 2007. – №3. – С. 176–182.
14. Кадомская К.П., Качесов В.Е., Лавров Ю.А., Овсянников А.Г., Сахно В.В. Диагностика и мониторинг кабельных сетей среднего напряжения // Электротехника. – 2000. – № 11. – С. 48–51.
15. Александрова Н.П. Мани А.К. Развитие и обнаружение местных дефектов в кабельной изоляции / Изв. НИИПТ. Л.: Госэнергоиздат. – 1961. – №7. – С. 215–230.
16. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, Ленингр. отд., 1979. – 224 с.
17. Голенко О.В., Живодерников С.В., Овсянников А.Г. Регистрация частичных разрядов в действующем оборудовании цифровым осциллографом // Энергетик. – 2001. – №2. – С.48.
18. Шкляр А.С. Будущее кабельных линий – комплексная диагностика // Кабель-News. 2009. – №5. – С. 21–23.
19. Гатауллин А.М., Матухин В.Л., Шмидт С.В., Крупнов Б.А. Комплексный метод регистрации параметров частичных разрядов изоляции электрооборудования // Известия вузов. Проблемы энергетики. – №9 –10. – С. 98–104.
20. Шабанов В.А., Баширов М.Г., Хлюпин П.А. и др. Диагностика технического состояния электрооборудования систем электроснабжения. – Уфа: Нефтегазовое дело, 2013. – 372 с.
21. Брякин И.В., Денисов Г.С. Феррозондовый датчик с упругим возбуждением сердечника // Проблемы автоматизации и управления. 2017. № 1 (32). – С. 50–59.
22. Брякин И.В., Турдумаматов С. Метод нелинейно-параметрической радиолокации для малоглубинной геофизики // Проблемы автоматизации и управления. 2017. – № 2 (33). – С. 103–114.

С. Т. Турдумаматов, samat.turdumamatov@iaau.edu.kg

Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР

МЕТАМАТЕРИАЛЫ И ЧАСТОТНО-ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ

В последние годы растет интерес к применению искусственных материалов, известных как метаматериалы. Особый интерес вызывают метаматериалы, используемые в антенных системах радиолокаций. В статье приведен обзор уникальных свойств частотно-избирательных поверхностей из таких материалов. Рассмотрены примеры их использования при конструировании радиолокационных антенн.

Ключевые слова: метаматериал; отрицательная диэлектрическая проницаемость; отрицательная магнитная проницаемость; поверхность с высоким импедансом; частотно-избирательная поверхность; электромагнитная структура запрещенной зоны.

Введение

В последнее время в области исследований электромагнетизма появилось множество композитных материалов, предназначенных для конструирования антенных радиолокационных систем [1–5]. Эти материалы, называемые метаматериалами, позволяют создавать радиолокационные антенны с более совершенными характеристиками. В этом контексте метаматериалы являются настоящим прорывом, поскольку, в отличие от естественных материалов, имеют особые электромагнитные свойства, которые позволяют создавать микрополосковые радиолокационные антенны, отличающиеся меньшим весом, более высокой эффективностью, лучшей диаграммой направленности [6].

Особенности свойств метаматериалов

Первыми метаматериалами были электромагнитные структуры, обычно состоящие из искусственно расположенных молекул, диэлектрических или металлических включений определенной формы. Эти молекулы могут быть распределены и ориентированы в пространстве либо в регулярной периодической решетке. Размер одного включения обычно намного меньше размера реальной молекулы в решетке природных кристаллов. Это соображение позволяет описать включения в терминах параметров материала, а полученный метаматериал можно охарактеризовать с помощью уравнений Максвелла [1].

Уравнение Максвелла, приведенное к волновому уравнению [7]:

$$\nabla^2 - \eta^2/c^2 \partial^2/\partial t^2 \Psi = 0, \quad (1)$$

где η – показатель преломления, c – скорость света в вакууме и

$$\eta^2/c^2 = \mu\epsilon \quad (2)$$

Поскольку знак показателя преломления η^2 не изменяется с одновременным изменением знаков μ и ϵ , то можно заключить, что левовинтовая среда с малыми потерями должна быть прозрачной. Решения уравнения (1) остаются неизменными после одновременного изменения μ и ϵ .

Общее уравнение плоской волны:

$$\bar{E} = \bar{E}_0 e^{-j\bar{k}\bar{r}} \quad (3)$$

$$\bar{H} = \bar{H}_0 e^{-j\bar{k}\bar{r}} \quad (4)$$

где $\bar{E}_0$ и $\bar{H}_0$ – векторы произвольных направлений; $\bar{k}$ – постоянная распространения вектора, величина которого k , а направление соответствует направлению распространения волны; $\bar{r}$ – вектор положения наблюдения

$$\bar{k} = k_x \hat{x} + k_y \hat{y} + k_z \hat{z}, \quad (5)$$

$$k = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2}, \quad (6)$$

$$\bar{r} = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}. \quad (7)$$

Для получения решений уравнения Максвелла преобразуем систему дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка в дифференциальные уравнения в частных производных второго порядка. Уравнения Максвелла в гармонической форме

$$\nabla \times \bar{E} = -j\omega \bar{B}, \quad (8)$$

$$\nabla \times \bar{H} = j\omega \bar{D} + \bar{J}. \quad (9)$$

Отсюда

$$\nabla \cdot \bar{B} = \nabla \cdot \mu \bar{H} = 0, \quad (10)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \nabla \cdot \varepsilon \bar{E} = \rho_v. \quad (11)$$

Уравнения (8) и (9) можно представить в виде

$$\nabla \times \bar{E} = -j\omega \mu \bar{H}, \quad (12)$$

$$\nabla \times \bar{H} = j\omega \varepsilon \bar{E} + \bar{J}. \quad (13)$$

Рассмотрим материалы с потерями. Если есть среда, которая имеет свободный заряд, то $\bar{J} = \sigma \bar{E}$ и

$$\nabla \times \bar{H} = j\omega \varepsilon \bar{E} + \sigma \bar{E} = j\omega \varepsilon + \sigma / j\omega \bar{E}, \quad (14)$$

где

$$\varepsilon + \sigma / j\omega = \varepsilon_{ef}. \quad (15)$$

Это означает, что электрическую проницаемость можно рассматривать как комплексную:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon - j\sigma / \omega = \varepsilon_0 \varepsilon_r - j\sigma / \omega \varepsilon_0 = \varepsilon_0 \varepsilon_{ref}. \quad (16)$$

Для вещественной и мнимой частей комплексной диэлектрической проницаемости можно использовать другое обозначение:

$$\varepsilon_{ef} = \varepsilon' - j\varepsilon'. \quad (17)$$

Для материала с потерями имеем

$$\nabla \times \bar{H} = j\omega \varepsilon \bar{E}. \quad (18)$$

Для векторов поля и направления распространения существуют следующие соотношения:

$$\bar{E} \perp \bar{H} \perp \bar{k}, \quad (19)$$

$$\bar{H} = \frac{1}{\eta} \bar{k} \times \bar{E}, \quad (20)$$

$$\bar{E} = \eta \bar{H} \times \bar{k}. \quad (21)$$

Для плоских волн $\bar{E} = \bar{E}_0 \exp -jk \cdot \bar{r} + j\omega t$ и $\bar{H} = \bar{H}_0 \exp -jk \cdot \bar{r} + j\omega t$ уравнения (12) и (18) можно свести к

$$\bar{k} \times \bar{E} = \omega \mu \bar{H}, \quad (22)$$

$$\bar{k} \times \bar{H} = -\omega \varepsilon \bar{E} \quad (23)$$

Положительные μ и ε , $\bar{E}$, $\bar{H}$ и $\bar{k}$ образуют правую ортогональную систему векторов, рис. 1 (а). Если $\mu < 0$ и $\varepsilon < 0$, то уравнения (22) и (23) можно представить в виде

$$\bar{k} \times \bar{E} = -\omega |\mu| \bar{H}, \quad (24)$$

$$\bar{k} \times \bar{H} = \omega |\varepsilon| \bar{E}. \quad (25)$$

В этом случае можно показать, что $\bar{E}$, $\bar{H}$ и $\bar{k}$ образуют левосторонний триплет, как показано на рисунке 1б. Этот результат математически демонстрирует первоначальную причину наименования среды с отрицательными μ и ε как «левовинтовыми» [6].

Основным физическим следствием проведенного анализа является выявление распространения обратной волны. Направление усредненного по времени потока энергии определяется вещественной частью вектора Пойнтинга

$$\bar{S} = \frac{1}{2} \bar{E} \times \bar{H}^*, \quad (26)$$

на которую не влияет одновременное изменение знаков μ и ε . Таким образом, $\bar{E}$, $\bar{H}$ и $\bar{S}$ все-таки образуют правостороннюю триплету в левовинтовой среде. По этой причине в левовинтовой среде (метаматериале) энергия и волновые фронты распространяются в противоположных направлениях. В любом случае распространение обратной волны представляется уникальным свойством левосторонних сред. Следует предположить, что уникальные электромагнитные свойства метаматериалов возникают именно из свойства обратного распространения.

Следует отметить, что первые исследования электромагнитных свойств метаматериалов Ж.Б. Бозе [8], Г. Лэмба [9] и последующие [7] выявили особенности распространения в них электромагнитных волн, а именно – отрицательное преломление, заключающееся в том, что векторы Пойнтинга этих волн не подчиняются классическому закону, что показано на рис. 1.

В природных материалах диэлектрическая проницаемость ε и магнитная проницаемость μ являются положительными величинами, тогда как в метаматериалах они отрицательны. Несмотря на это в метаматериалах также возможно распространение электромагнитных волн. В этом случае показатель преломления в соответствии с законом Снелла отрицателен. Поэтому падающая волна испытывает отрицательную рефракцию на границе раздела, и образуется обратная волна, фаза которой движется в направлении, противоположном направлению потока энергии [3].

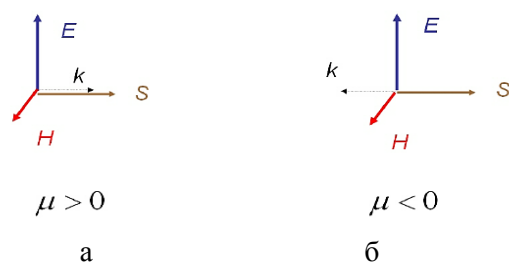


Рисунок 1 – Диаграмма, показывающая векторы Пойнтинга электромагнитной волны: а – обычные материалы; б – метаматериалы.

На рис. 2, с учетом того, что среда имеет одинаковые свойства во всех направлениях (изотропная), показана диаграмма лучей для границы раздела между средой с положительным показателем преломления и средой с отрицательным преломлением.

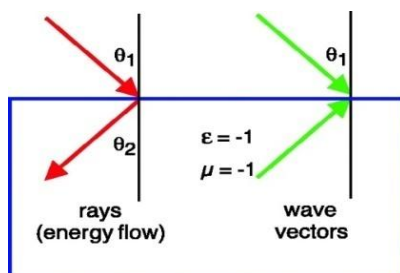


Рисунок 2 – Диаграмма лучей взаимодействия между $\eta_1 > 0$ и $\eta_2 < 0$

Диаграмма, представленная на рисунке 2, может быть объяснена с помощью закона Снелла. Для случая, когда показатель преломления положителен для обеих сред, луч может проходить через границу раздела. Для случая, когда показатели преломления $\eta_1 > 0$ и $\eta_2 < 0$, проходящий пучок будет проходить через вторую среду на той же стороне падающей волны в нормальном направлении [5], т.е. результирующая волна будет направлена назад. Это легко объясняется с помощью схемы на рис. 1, из которой следует, что если вектор Пойнтинга ориентирован в направлении потока энергии и продолжается в том же направлении, что и в нормальном материале, то волновой вектор распространяется в отрицательном направлении

$$\eta = \pm \sqrt{\mu \epsilon} . \quad (1).$$

В уравнении (1) предполагается знак $\pm$. Четыре возможные комбинации для знаков ϵ и μ таковы: $(+,+)$, $(+,-)$, $(-,+)$ и $(-,-)$. Большинство природных материалов имеет положительные диэлектрическую и магнитную проницаемости, вследствие чего они называются двойными положительными (ДП) средами.

Если диэлектрическая и магнитная проницаемости отрицательны, то среды представляют собой двойные отрицательные (ДО) или левовинтовые материалы, принадлежащие к левой системе координат, иначе — метаматериалы.

Материалы с одним отрицательным параметром являются одно-отрицательными (ОО) и далее классифицируются на две подкатегории: с отрицательной диэлектрической проницаемостью ϵ и отрицательной магнитной проницаемостью μ . Следует отметить, что некоторые природные материалы, такие как холодная плазма и серебро, проявляют соответственно отрицательную диэлектрическую проницаемость на СВ и оптических частотах, а ферромагнитные материалы проявляют отрицательную

проницаемость в режимах ОВЧ и УВЧ. Тем не менее, на сегодняшний день не обнаружено никаких естественных материалов, которые обладают одновременно отрицательной диэлектрической и отрицательной магнитной проницаемостью. Такие материалы могут быть получены только искусственно.

На рис. 3 приведена классификация метаматериалов по Н. Энгета [3], где стрелками показаны направления волновых векторов в каждой среде.

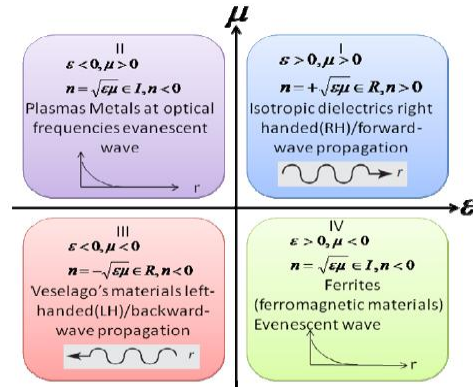


Рисунок 3 – Диаграмма проницаемостей μ , ε и показателя преломления n

Соответствующие направления распространения волны для нормальных (изотропных) материалов и метаматериалов представлены на рис. 4. Анализ диаграмм рис. 4 позволяет сделать вывод о том, что в натуральных материалах показатель преломления n повышается по сравнению с нормальным, а в искусственном материале – понижается.

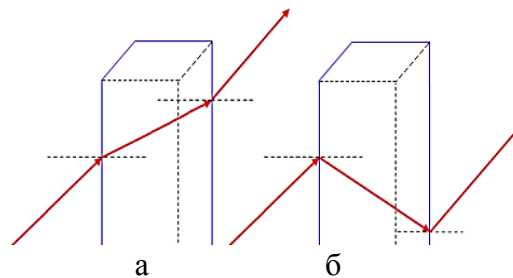
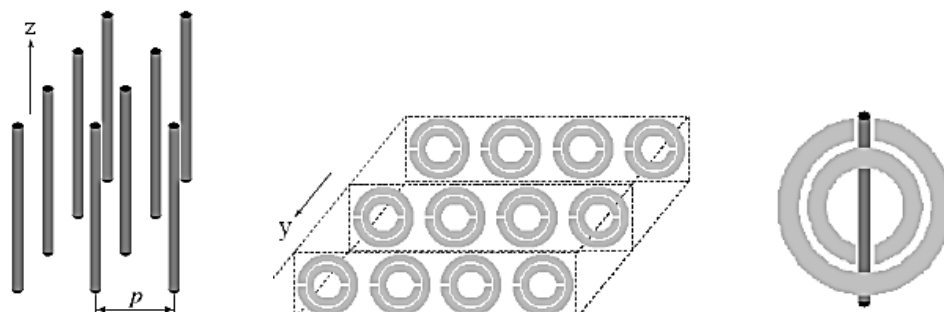


Рисунок 4 – Диаграмма лучей, показывающая направление распространения волны:
а – изотропный материал; б – метаматериал

Подобные среды можно считать двойными положительными (ДП) средами, если их относительная диэлектрическая $\varepsilon_r = \varepsilon/\varepsilon_0$ и магнитная $\mu_r = \mu/\mu_0$ проницаемости принимают положительные значения. Соответственно в двойной отрицательной (ДО) среде [6] относительная диэлектрическая и магнитная проницаемости будут отрицательны.

Одним из способов построения одноосной ДО среды является использование структуры, которая была предложена Пендри [10] (рис. 5).



а

б

в

Рисунок 5 – а – отрицательная диэлектрическая проницаемость и положительная магнитная проницаемость; б – отрицательная магнитная проницаемость и положительная диэлектрическая проницаемость; в – двойные отрицательные среды

Частотно-избирательные поверхности и их свойства

Особый интерес для разработчиков микрополосковых радиолокационных антенн представляют электромагнитные кристаллы, или фотонные кристаллы, которые при работе на оптических частотах называют электромагнитной полосой или фотонной полосовой щелью. Эти кристаллы представляют собой структуры, состоящие из электромагнитного периодического диэлектрика или среды металл-диэлектрик, работающих на сравнимых длинах волн, и которые имеют полосы пропускания и полосы подавления, влияющие на распространение электромагнитных волн [1]. Эти кристаллы содержат регулярно повторяющиеся внутренние области с высокой и низкой диэлектрической проницаемостью. В этом случае электроны или фотоны ведут себя как волны, а распространяются они через эту структуру или нет, зависит от их длин волн. Длины волн, которые разрешены для движения, известны как разрешенные режимы, а уже группы разрешенных режимов, в свою очередь, образуют полосы или зоны. Запрещенные зоны длин волн при этом являются так называемыми электромагнитными или фотонными щелями [11].

В настоящее время подобные фотонные и электромагнитные кристаллы нашли широкое применение в частотно-избирательных поверхностях (ЧИП) в качестве компонентов для волноводов и резонаторов как в оптическом, так и в микроволновом диапазонах (рис. 6).



Рисунок 6 – Кристалл с заполненной фотонной щелью

Подобные частотно-избирательные поверхности обладают различными свойствами передачи для разных частот падающей волны, т.е. фактически являются фильтрами свободного пространства, которые можно использовать для передачи определенных частот. Иными словами, ЧИП либо блокирует, либо пропускает волны определенных частот в свободном пространстве.

Следует отметить, что теория, регулирующая использование ЧИП, развилась непосредственно из теории оптической дифракционной решетки, а сами фильтрующие свойства ЧИП были обнаружены в 1786 г. Дэвидом Риттенхаусом [12], который наблюдал подавления отдельных цветов светового спектра лампы через шелковую ткань. Подобная простота реализации процесса подобной фильтрации вызвала соответствующий интерес в среде исследователей распространения электромагнитных волн.

Фактически ЧИП представляют собой плоские периодические структуры, которые ведут себя как индуктивность и емкость по отношению к падающим волнам и, следовательно, ведут себя как пространственные фильтры электромагнитной энергии. Поверхность ЧИП собирается из одинаковых накладных апертурных проводящих

элементов, периодически повторяющихся в одномерном или двумерном массиве материала [13, 14]. ЧИП обычно изготавливается в виде плоских двумерных периодических массивов металлических элементов с особыми геометрическими формами или может быть представлен периодическими отверстиями в металлическом экране, который может быть либо автономным, либо гравированным на поддерживающих диэлектрических подложках.

Коэффициенты передачи и отражения для этих поверхностей зависят от частоты работы, а также от поляризации и угла падения волны. Особенность этих структур проявляется в том, что эти поверхности полностью подавляют одну полосу частот и допускают передачу других полос, выполняя функцию фильтра [13].

В оптике пространственный фильтр представляет собой устройство сближения лучей, связанное с фильтром, который использует принципы Фурье-оптики для изменения структуры пучка когерентного света или другого электромагнитного излучения. Фильтр используется для удаления интерференционных картин на выходе лазерного луча.

Для более полного представления концепции пространственной фильтрации рассмотрим волну, падающую на металлическую поверхность, и отдельный электрон в плоскости этой поверхности, как показано на рис. 7а.

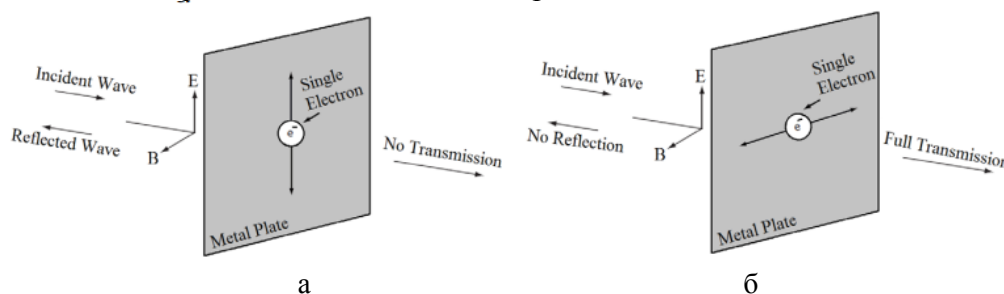


Рисунок 7 – а – Электрон в плоскости осциллирует из-за силы, создаваемой при падении волны и низком коэффициенте пропускания; б – Электрон ограничен высокой энергетической эффективностью при высоком коэффициенте пропускания

Е-вектор падающей волны параллелен металлической поверхности. Поэтому, когда падающая волна ударяет по поверхности металла, она оказывает воздействие на электрон в плоскости поверхности и заставляет его ускоряться в направлении вектора $\vec{E}$. Чтобы сохранить электрон в непрерывном колебательном состоянии, необходимо преобразовать некоторую часть энергии в кинетическую энергию электрона. Это приведет к поглощению большей части падающей энергии электроном и его отражением от пластины. Передача волны через этот фильтр будет равна нулю, так как вся энергия падающей волны преобразуется в кинетическую энергию электрона.

На рис. 7б вектор направления электрона перпендикулярен вектору $\vec{E}$ падающей волны. В этом случае, несмотря на силу, оказываемую вектором $\vec{E}$, электрон вынужден двигаться вдоль вектора направления. Следовательно, электрон не способен поглощать кинетическую энергию падающей волны, поэтому волна не поглощается, и возникает пропускание с высоким коэффициентом.

По геометрии элемента ЧИП можно разделить на те, где массив производит емкостной отклик, и те, где массив щелей является индуктивным, что показано на рис. 8 [13].



Рисунок 8 – Основные виды геометрии ЧИП

Основное различие между этими двумя случаями состоит в том, что электрические токи возбуждаются на квадратах, в то время как магнитные токи возбуждаются в квадратном корпусе излучающих элементов. Эти два случая становятся очень похожими и симметричными, если сравнивать электрическое поле в квадратном корпусе и магнитное поле в квадратном корпусе щели. Следуя этому принципу, ЧИП представляет собой периодический массив из излучающих и не излучающих элементов, или слотов, которые действуют как полосы пропускания или подавления электромагнитных волн.

Обобщая сказанное выше, можно констатировать, что ЧИП следует рассматривать как электромагнитные фильтры, реализованные с использованием периодических структур, образованных массивами проводящих элементов на диэлектрической подложке и периодическими апертурными элементами в проводящем листе. Существует множество различных элементов, которые могут использоваться для реализации массивов ЧИП.

Основными типами элементов ЧИП являются центральный узел, или N-полнос; тип петли (внутренний сплошной или пластинчатый тип) и комбинации других элементов.

Наиболее распространен тип элементов ЧИП в форме плоских, периодических металлических или диэлектрических массивов в двумерном пространстве. Частотные характеристики ЧИП определяются геометрией элементарной ячейки, при условии, что размер поверхности бесконечен. ЧИП из метаматериалов можно также использовать при проектировании реактивных импедансных поверхностей в виде искусственного магнитного проводника и электромагнитного полосового зазора. На рис. 9 показаны примеры элементов ЧИП [14].

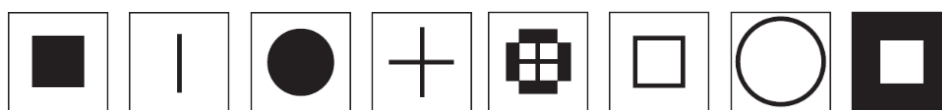


Рисунок 9 – Примеры элементов ЧИП

Классическим примером искусственного, метаматериального магнитного проводника является поверхность с высоким импедансом, описанная в [15], которая представляет собой периодическую матрицу, напечатанную на диэлектрической подложке, где каждый элемент массива соединен с землей. Подобный массив принято называть грибовидной ячейкой. В таком искусственном магнитном проводнике тока нет, что, в свою очередь, запрещает распространение поверхностных волн внутри подложки. В этом случае ЧИП может использоваться в качестве плоскости заземления антенн для эффективного подавления нежелательных волн, то есть поверхностных волн внутри подложки, что способствует созданию хорошей диаграммы направленности. Тип поверхности с высоким импедансом, используемой в этой работе, показан на рис. 10.

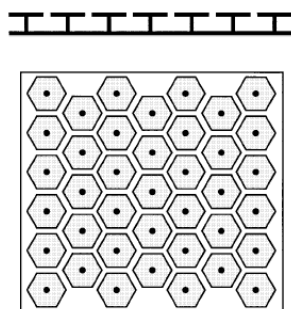


Рисунок 10 – Шестиугольные металлические накладки, находящиеся над поверхностью. Точки в центре – сквозные отверстия штыревого соединения волновода

Варианты антенн на основе метаматериалов

Известно, что свойства структур из метаматериалов используются для управления ближним полем антенны с целью уменьшения размера самой антенны при сохранении хорошей эффективности излучения. В работе [16] рассматривается вариант разделения таких антенн на две основные категории: мощные антенны и малые антенны резонансного типа. Последняя категория антенн, включающая многодиапазонную микрополосковую антенну из метаматериала и микрополосковую антенну из метаматериала малого размера и оптимизированными обратными потерями, представляет для рассматриваемого круга задач особый интерес.

Рассмотрим особенности многодиапазонной микрополосковой антенны из метаматериала [17], структура единичной грибовидной ячейки которого показана на рис.11а. Она состоит из металлической накладки на подложке, соединенной с землей через сквозное отверстие. Как накладка, так и сама плоскость заземления выполнены из меди, а подложка FR4 имеет диэлектрическую постоянную $\varepsilon_r = 4,4$. Единичная ячейка проводящей накладки имеет $4,8 \times 4,8$ мм, высота подложки – 1,26 мм, диаметр сквозного отверстия – 0,24 мм, а размеры заземляющей пластины – 5×5 мм. Полная структура представляет собой совокупность периодически расположенных отдельных ячеек 5×5 (рис. 11б).

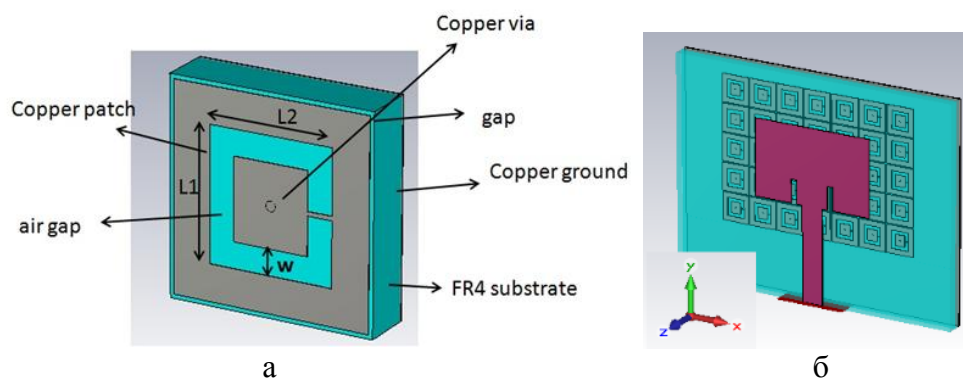


Рисунок 11 – а – Структура единичной грибовидной ячейки антенны из метаматериала; б – Полная структура грибовидного пакета

В этой периодической компоновке краевая связь между соседними участками вносит вклад в последовательную емкость, тогда как сквозное медное соединение и плоскость заземления образуют замкнутый контур. В свою очередь, протекающий в проводящей накладке ток создается последовательно связанными индуктивностями, а градиент напряжения между платой и плоскостью заземления – шунтирующей емкостью. В этом случае ячейка является составным (ДП-ДО) метаматериалом [18].

В качестве микрополосковой антенны малого размера и оптимизированными обратными потерями можно использовать миниатюрную U-образную микрополосковую антенну (рис. 12б [19], изготовленную из метаматериала. С целью использования свойств метаматериала, в рассматриваемой антенне встречно-штыревые конденсаторы вводятся в одно плечо U-образной микрополосковой антенны. Эта антенна имеет U-образную накладку из меди на подложке FR4, которая имеет диэлектрическую проницаемость $\varepsilon_r = 4,4$ и высоту $h = 1,6$ мм. Необходимое свойство метаматериала было достигнуто путем применения встречно-штыревого конденсатора, выполненного из меди. Плоскость заземления также выполнена из меди.

Внешний вид антенны приведен на рис. 12а. На одном плече U-образной антенны расположены 8 полос, создающих конденсатор. Введение дополнительных полос уменьшает размеры антенны и позволяет обеспечить согласование импеданса антенны. Путем настройки длины и ширины этих полос можно оптимизировать обратные потери всей антенны.



Рисунок 12 – а – U-образная микрополосковая антенна с метаматериалом;
б – U-образная микрополосковая антенна.

Уменьшение паразитной связи такой микрополосковой антенны достигается с помощью метаматериала. Геометрия рассматриваемой микрополосковой антенной решетки [20] со структурой метаматериала показана на рис. 13.

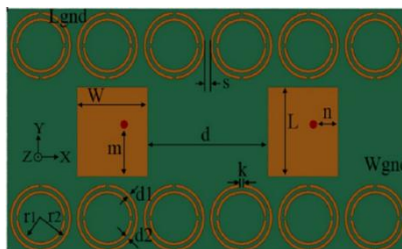


Рисунок 13 – Микрополосковая антенная решетка со структурой метаматериала

Антенный массив расположен на подложке FR-4 с относительной диэлектрической проницаемостью $\varepsilon_r = 4,4$ и тангенс потерь $\delta = 0,02$, а толщина $h = 1,2$ мм. Два элемента антенны – это одинаковые прямоугольные металлические накладки антенны с коаксиальной подачей питания. На обратной стороне расположена заземляющая плоскость антенной решетки. Антенные элементы работают на частоте 5,3 ГГц, расстояние между краями антенных элементов составляет 21,5 мм.

Уменьшение ширины диаграммы направленности микрополосковой антенны также достигается за счет использования метаматериала [21]. Геометрия элементарной ячейки, напечатанной на подложке, показана на рис. 14а. Традиционная микрополосковая антенна с рабочей частотой 4,3 ГГц напечатана на той же подложке из метаматериала и выбрана в качестве эталона. Вид этой антенны, покрытой метаматериалом, приведен на рисунке 14б.

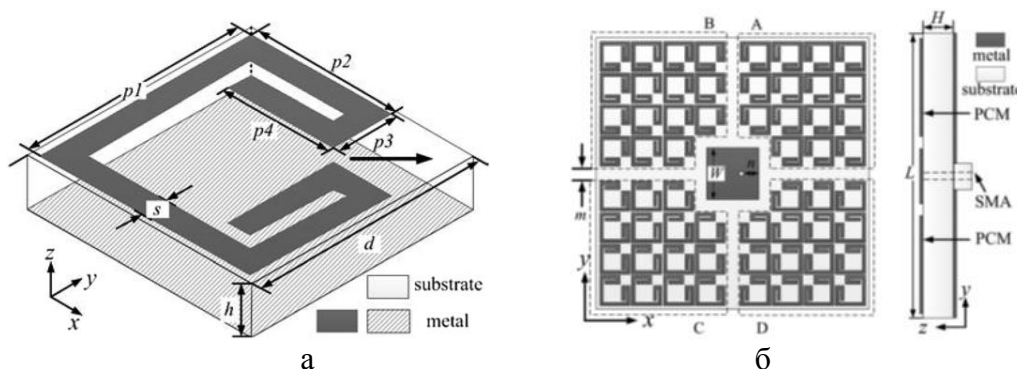


Рисунок 14 – а – Элементарная ячейка предлагаемого метаматериала;
б – антенна покрытая метаматериалом

Далее рассмотрим особенности микрополосковой антенны с расширенной полосой пропускания со структурой в виде элементарной ячейки из левовинтового метаматериала (рис. 15а) [22].

Ячейка представляет собой комбинацию прямоугольного резонатора с раздельным кольцом и тонкой проволоки. Раздельный кольцевой резонатор и тонкий провод печатаются на одной стороне подложки FR4. Диэлектрическая проницаемость подложки составляет 4,4 и высота $h = 1,6$ мм. Длина внешнего раздельного кольцевого резонатора составляет $L_1 = 7,3$ мм, а внутреннего резонатора с раздельным кольцом – $L_2 = 5,4$ мм. Ширина резонатора с раздельным кольцом и тонкого провода $W_1 = 0,5$ мм, зазор между внешним и внутренним кольцами равен $W_2 = 0,5$ мм; величина разрезана обоих кольцах $G_1 = 1,6$ мм; L_3 – это выступ тонкого подводящего провода, который соединяется с накладкой. Геометрия этой антенны показана на рис. 15б.

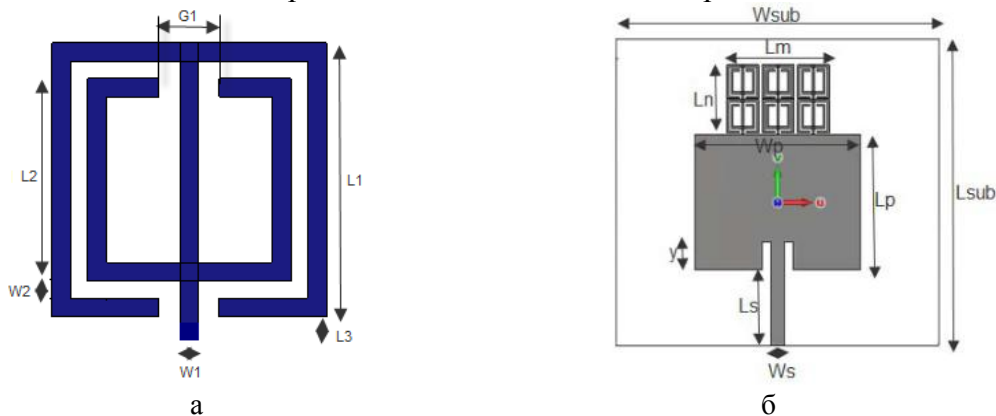


Рисунок 15 – Геометрия микрополосковой антенны. а – элементарная ячейка левовинтового метаматериала; б – геометрия антенны

Выводы

В данной работе изложены основные элементы физической теории метаматериалов. Представленный информационный материал поможет соответствующим разработчикам более глубоко понять особенность взаимосвязи уникальных электромагнитных характеристик метаматериалов.

Например, показано, что двойные отрицательные материалы всегда имеют отрицательный показатель преломления, а гофрированная металлическая поверхность может быть как слабопроницаемой поверхностью для распространения волны в продольном направлении, так и поверхностью для распространения волны в поперечном направлении. Кроме того, подтвержден факт того, что периодическая

композитная структура линии передачи может обладать левовинтовым ДО свойством в одной частотной области и свойством запрещенной зоны – в другой.

Приведенные примеры использования метаматериалов в качестве подложки микрополосковой антенны; антенн, имеющих малые размеры и работающих на четырех резонансных частотах; ячеек антенн, имеющих слабую взаимную связь, не влияющую на рабочую частоту и радиационные характеристики; возможного значительного уменьшения поперечного сечения радара путем правильной разработки периодического метаматериала, размещенного вокруг излучающей накладки; структур метаматериалов, позволяющих улучшить полосы пропускания антенны, наглядно демонстрируют реальные возможности эффективного применения уникальных свойств метаматериалов в различных областях исследования электромагнетизма и построения радиолокационных антенн.

Литература

1. Y. Hao and R. Mittra, "FDTD Modeling of Metamaterials: Theory and Applications", 1st ed. Artech House Publishers, 2008.
2. C. M. Krowne, and Y. Zhang, "Physics of Negative Refraction and Negative Index Materials: Optical and Electronic Aspects and Diversified Approaches" 1st ed., Springer 2007.
3. N. Engheta, and R. W. Ziolkowski, "Electromagnetic Metamaterials: Physics and Engineering Explorations" 1st ed., Wiley-IEEE Press, 2006.
4. G. V. Eleftheriades and K. G. Balmain, "Negative Refraction Metamaterials: Fundamental Principles and Applications" 1st ed., Wiley-IEEE Press, 2005.
5. C. Caloz, and T. Itoh, "Electromagnetic Metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications" 1st ed., Wiley-IEEE Press, 2005.
6. R. W. Ziolkowski, P. Jin and C. Lin, "Metamaterial-inspired engineering of antennae," Proc IEEE, vol. 99, pp. 1720–1731, 2011.
7. V. G. Veselago, "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ", Soviet Phys. Usp., Vol. 10, pp. 509–514, 1968.
8. J. C. Bose, "On the rotation of plane of polarization of electric waves by a twisted structure," Proc. Roy. Soc., vol. 63, pp. 146–152, 1898.
9. H. Lamp, "On Group-Velocity, " Proc. London Math. Soc. 1, pp. 473–479, 1904.
10. D. R. Smith, W. J. Padilla, D. C. Vier, S. C. Nemat-Nasser, and S. Schultz. "Composite medium with simultaneously negative permeability and permittivity," Phys. Rev. Lett., vol. 84, no. 18, pp. 4184–4187, May 2000.
11. E. Yablonovitch, T. Gmitter, and K. Leung, "Photonic Band Structure: the FacecenteredCubic Case Employing Nonspherical Atoms, " Phys. Rev. Lett., Vol. 67, Issue 17, pp. 2295–2298, 1991.
12. D. Rittenhouse, "An optical problem, proposed by Mr. Hopkinson, and solved by Mr. Rittenhouse" Trans. Amer. Phil. Soc. Vol. 2, pp. 201–206, 1786.
13. T.K.Wu, "Frequency Selective Surfaces and Grid Array", 1st ed., John Wiley&Sons1995.
14. T. Cwik, R. Mittra, K. Lang and T. Wu, T., "Frequency Selective Screens", IEEE Ant. and Prop. Soc. News., Vol. 29, Issue 2 pp. 5–10, 1987.
15. D. Sievenpiper, L. Zhang, R. F. J. Broas, N. G. Alexopolous, E. Yablonovitch, "High-Impedance Electromagnetic Surfaces with a Forbidden Frequency Band", IEEE Trans. On Micro. Theo. and Tech. Vol. 47, Issue 11, pp. 2059–2074. Nov. 1999.
16. Y. Dong and T. Itoh, "Metamaterial-based antennae,"IEEE, vol.100, pp. 2271–2285, 2012.
17. F. Yang, Y.R. Samii, "Electromagnetic Band Gap Structures in Antenna Engineering", Cambridge University Press, Cambridge, UK. 2009.

18. Anand K., Jitendra M., Hariom G. "Microstrip Patch Antenna Loaded with Metamaterial for Multiband Applications" 2016 IEEE, pp. 43–44.
19. Gayatri R. Vidhate, Anandrao B. Kakade. "Comparative Design and Analysis of both Conventional and Metamaterial Loaded Microstrip Patch Antenna" 2014 Annual IEEE India Conference, pp. 2–3.
20. Kai Y., Xiaoguang., and Yingsong Li "Mutual Coupling Reduction of Microstrip Patch Antenna Array Using Modified Split Ring Resonator Metamaterial Structures" 2017 IEEE, pp. 2287–2288.
21. Ying L., Yuwen H., Kun Li and Shuxi G. "Radar Cross Section Reduction of a Microstrip Antenna Based on Polarization Conversion Metamaterial" 2015 IEEE, pp. 81–82.
22. Bashir D. B., Mohamad K. A. Rahim, N. A. Murad "Bandwidth Enhanced Microstrip Patch Antenna Using Metamaterials" IEEE, APACE 2012, pp. 280–281.

УДК 621-771: 681.518.5

Евдокимов С.А., Храмшин В.Р., hvrnmg@gmail.com

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

Гасияров В.Р., Логинов Б.М., gasiyarovvr@gmail.com

Южно-Уральский государственный университет (НИУ)

КОНТРОЛЬ УПРУГОГО МОМЕНТА В ВАЛОПРОВОДАХ КЛЕТИ ТОЛСТОЛИСТОВОГО ПРОКАТНОГО СТАНА

Выявлены причины появления недопустимых динамических нагрузок в валопроводах горизонтальной клетки толстолистого прокатного стана. Для обеспечения непрерывного контроля упругого момента в валопроводах клетки, обоснована целесообразность разработки стационарной телеметрической системы. Определены основные функции этой системы и перечислены требования к оборудованию. Получена аппаратная структура системы измерения, передачи и визуализации сигналов, пропорциональных упругому моменту. Рассмотрены особенности размещения и подключения тензорезисторов. Дано описание оборудования, которое реализует беспроводное питание кодировщика сигналов и цифровую передачу данных между передатчиком и приемником. Представлены результаты исполнения системы на толстолистовом стане. Показана установка телеметрического кольца и принимающей головки для индуктивного питания и приема данных. Приведено окно интерфейса системы с характерными осциллограммами моментов на валу верхнего и нижнего шпинделей. Отмечена эффективность внедрения. По результатам длительного мониторинга определены направления разработки алгоритмов управления главными электроприводами, в целях ограничения динамических моментов в валопроводах горизонтальной клетки.

Ключевые слова: толстолистовой прокатный стан; горизонтальная клеть; электропривод; валопровод; динамический момент; система контроля; требования; структура; аппаратный состав; передача сигналов; техническое исполнение; внедрение; управление; рекомендации.

Введение

Динамические нагрузки, возникающие в валопроводах электроприводов верхнего и нижнего валков горизонтальной клетки толстолистого стана, негативно влияют на процесс прокатки. Аварийные простои по причине поломок шпиндельных соединений составляют 12–15 % общего числа простоев, возникающих вследствие выхода из строя механического оборудования [1]. Поломки элементов шарниров (вкладышей, пальцев, лопастей и вилок) составляют незначительную часть числа отказов, однако они, как правило, вызывают длительные простои стана и значительные материальные затраты на устранение последствий аварий и приобретение оборудования.

Опасность колебательных нагрузок заключается в том, что в первый момент после захвата листа они принимают нулевые или отрицательные значения. При повторных размыканиях и ударных замыканиях зазоров в соединениях возникают значительные перегрузки. Из-за износа вкладышей универсальных шпинделей зазоры в главной линии быстро прогрессируют и вызывают опасные для прочности циклические напряжения в деталях. Вследствие этого срок службы шпинделей до разрушения колеблется от 5 месяцев до 2,5 лет [2].

Исследования динамических нагрузок позволяют оптимизировать технологические режимы, осуществлять конструктивные мероприятия, повышающие надежность и долговечность оборудования. При этом вполне естественно использовать параметры переходных процессов в диагностических целях. Прямое измерение момента по электрическим параметрам приводных двигателей не позволяет получить пиковые динамические нагрузки и составляющие момента на частотах собственных колебаний механи-

ческой системы линии привода (10–25 Гц). К тому же данный метод не обеспечивает приемлемой точности в синхронных электроприводах и частотно-регулируемых приводах переменного тока [3]. В связи с этим применяются системы прямых измерений крутильных колебаний. При этом наряду с моментом для диагностических целей регистрируют другие параметры, в частности, частоту вращения, ток электродвигателя, усилие прокатки.

Постановка задачи

Анализ литературных источников и экспериментальные исследования, проведенные на толстолистовом прокатном стане 5000, указывают следующие причины возникновения неблагоприятных динамических процессов:

1. Ударные механические нагрузки, связанные с выбором зазоров в шпиндельных соединениях, которые не могут контролироваться, но могут быть устранены средствами электропривода.

2. Неудовлетворительные условия захвата, связанные с тем, что зазор валков изначально устанавливается исходя из заданной толщины полосы после прохода. При этом условия захвата не принимаются во внимание.

3. Колебательные процессы, вызванные настройкой пропорционально-интегрального регулятора скорости в двухконтурной астатической системе. Известно, что переходные процессы тока, скорости, а следовательно, момента электропривода при такой настройке имеют периодический затухающий характер. Колебания момента приводят к возникновению крутильных колебаний на валу, что приводит к росту динамического момента.

4. Несогласованность скорости входа листа в клеть и линейной скорости вращения валков.

Очевидно, что проведения периодических замеров в стационарных режимах недостаточно для полноценного анализа состояния электрического и механического оборудования. В мировой практике для этих целей широко используются стационарные диагностические комплексы, которые либо входят в структуру АСУ ТП, либо изготавливаются в качестве самостоятельных технических изделий.

В связи со сложившейся ситуацией возникла задача разработки и внедрения телеметрической системы, обеспечивающей непрерывное (в реальном времени) отображение, контроль и анализ упругого момента в валопроводах главных электроприводов горизонтальной клетки толстолистостанов. С этой целью выполнен комплекс научных и практических задач, включающий:

- разработку функциональной структуры и схемы построения системы;
- выбор процессорного оборудования и аппаратных средств, реализующих функции измерения и отображения упругого момента;
- разработку технических решений по монтажу и установке датчиков на деталях конструкции валопроводов;
- наладку и внедрение системы.

Основная часть

Достоверность получаемой информации в значительной степени зависит от правильного выбора измерительной аппаратуры и датчиков. Исходя из этого определены основные требования к стационарной системе:

1. Непрерывное отображение и контроль крутящего момента, включая его упругую (динамическую) составляющую: пики момента при захвате металла в линиях проводов верхнего и нижнего прокатных валков.

2. Распознавание и исключение факторов “помехи” из сигнала крутящего момента, обусловленных:

- температурным расширением материала вала в точке измерения;
- вибрационным фоном, возникающим при работе прокатной клетки;
- изгибающими моментами в линиях главных приводов при прокатке.

3. Для повышения надежности работы системы должна быть предусмотрена возможность установки двух и более тензометрических мостов на одном валу, в том числе с целью усреднения результатов измерения.

4. Наличие программного обеспечения сервера, обеспечивающего хранение значений крутящего момента в базе данных с заданными условиями доступа, заданной глубиной хранения и возможностью конвертирования данных в традиционные форматы для последующего анализа с целью корректировки программ прокатки и настроек параметров систем автоматического регулирования.

5. Непрерывная эксплуатация стационарной системы в условиях стана горячей прокатки с заданными интервалами обслуживания.

Исходя из условий эксплуатации, разработаны основные требования к оборудованию:

– обеспечение надежной работы системы в условиях горячей прокатки металла в горизонтальной клетке с учетом существующего температурного диапазона; обеспечение необходимых уровней пыле- и влагозащищенности, а также вибрационной устойчивости при ударных нагрузках;

– передача питания на измерительные электронные компоненты, установленные на шпинделях, а также съем сигналов упругих моментов с вращающихся шпинделей должны быть реализованы бесконтактным способом;

– конструкция должна быть разборной и позволять перемонтировать систему на новый шпиндель;

– электронные и процессорные компоненты в составе системы должны иметь электромагнитную совместимость по питанию и по сигнальным линиям;

– измерительные преобразователи должны обеспечивать возможность регулирования коэффициента передачи сигнала упругого момента в измерительном канале.

С учетом предъявляемых требований разработана аппаратная структура системы передачи и визуализации данных по упругому моменту, представленная на рис. 1¹.

В состав системы входят: тензометрические датчики и блоки преобразования с бесконтактной передачей информации, которые крепятся на валопроводах главных приводов; принимающее устройство, обеспечивающее передачу информации; сервер визуализации, контроля, анализа и формирования базы данных.

Тензорезисторы устанавливаются на шпинделе таким образом, чтобы их взаимное расположение было диаметрально противоположным. Это сделано для того, чтобы сигнал с мостов тензодатчиков имел меньшую погрешность [4]. Распространенным методом измерения деформации вала является использование тензометрического моста с четырьмя резисторами. В этом случае на вал наклеиваются тензометры сопротивления под углом 45° к оси вращения, электрически соединенные по мостовой схеме. Применение этой схемы увеличивает чувствительность, улучшает линейность получаемой характеристики, значительно уменьшает влияние температуры на величину выходного сигнала. Кроме того, преимуществом моста является то, что с его помощью измеряется только отклонение, а не общее сопротивление.

¹ Разработка выполнена совместно со специалистами ЗАО «ПРОМТЕКС», г. Москва.

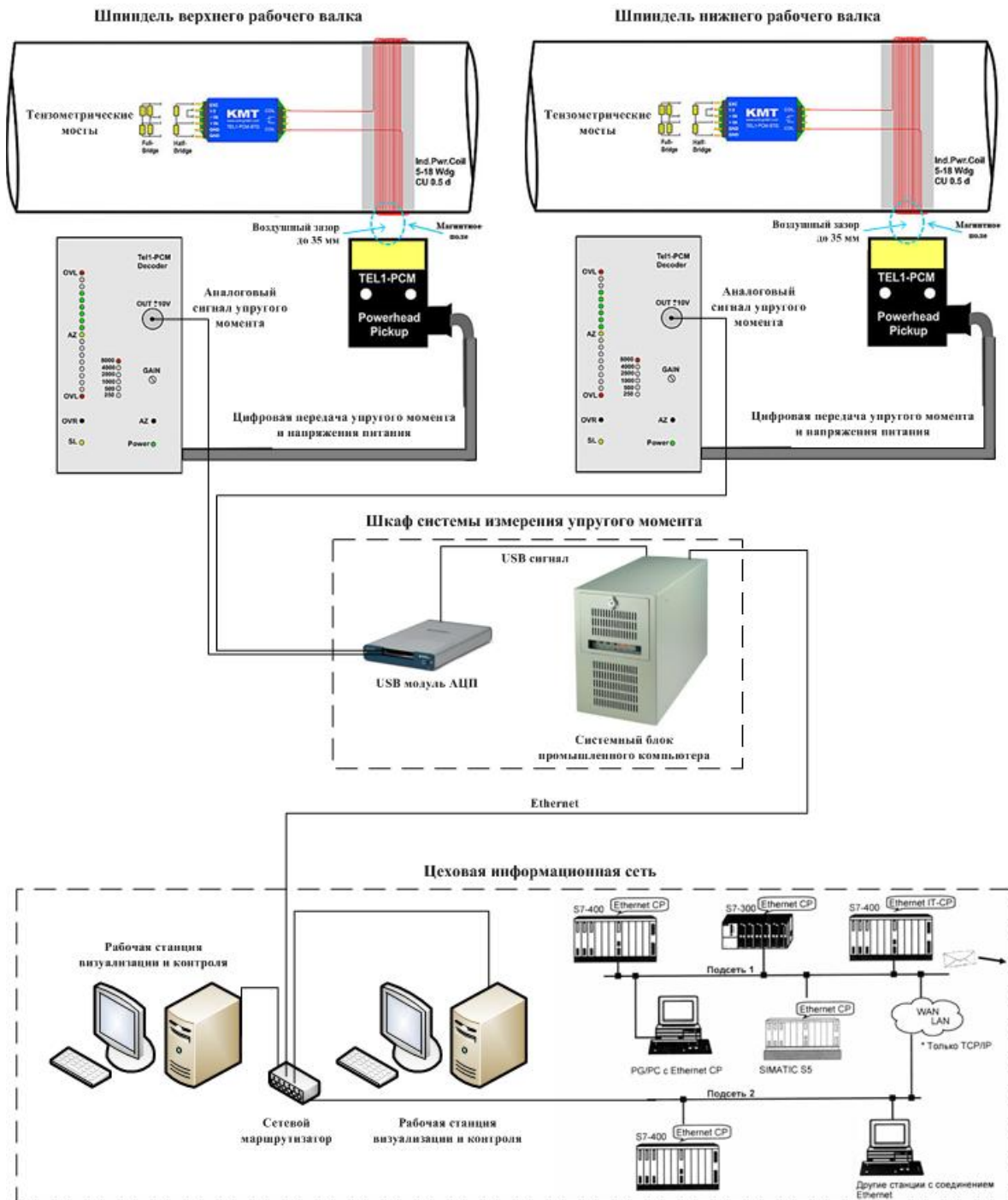


Рисунок 1 – Аппаратная структура системы передачи и визуализации данных по упругому моменту, интегрированная в цеховую информационную сеть

В разработанной системе используются тензорезисторы FCT-2-350-11. Каждый тензорезистор содержит два резистора, поэтому на каждый шпиндель вала было установлено два тензорезистора, соединенных в мостовую схему (рис. 2). Их входные и выходные сигналы подключаются к передатчику-кодеру KMT. Он представляет собой одноканальную телеметрическую систему TEL1-PCM-STG, которая реализует беспроводную передачу сигналов [5]. С его помощью осуществляются формирование сигнала упругого момента и питание электронных компонентов, установленных на валу.

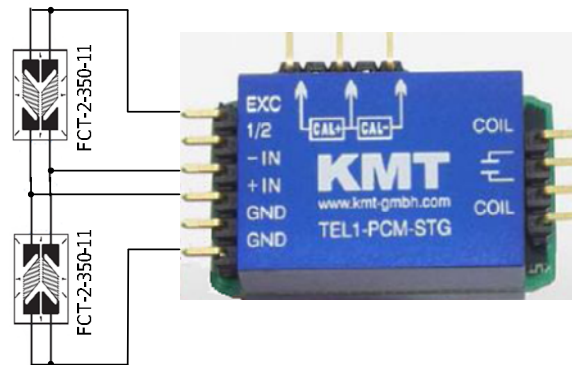


Рисунок 2 – Схема подключения тензорезисторов

Цифровая передача данных по упругому моменту от кодера на приемник (TEL1-PCM) осуществляется индуктивно посредством генерирования в индукционной обмотке сигнала с импульсно-кодовой модуляцией. Этот сигнал формирует магнитное поле, которое через воздушный зазор 20 мм передает цифровые данные в систему (рис. 1).

Для обеспечения надежного крепления и хорошей развесовки по длине круга шпинделя передатчик-кодер (рис. 3 а) встраивается вместе с индуктивной обмоткой в специальное кольцо (рис. 3 в). Внутренний диаметр кольца выполняется строго по диаметру вала шпинделя в месте установки. Витки индуктивной обмотки, предназначенной для приема напряжения питания кодера и съема полезного сигнала, показаны на рис. 3 б. Следует заметить, что изготовление и монтаж токосъемного кольца, наряду с наклейкой датчиков, являются наиболее сложной и ответственной частью изготовления системы.



Рисунок 3 – Конструкция кольца, устанавливаемого на шпиндели:

а – крепление кодера; б – расположение витков измерительной обмотки; в – кольцо

Конечным устройством измерительной части системы является декодер марки Tell-PCM Decoder (рис. 1), изготавливаемый фирмой КМТ [5]. Он формирует аналоговый сигнал упругого момента в диапазоне ± 10 В. Фактический уровень нагрузки отображается индикаторами, расположенными на лицевой панели. На перегрузку указывают последние индикаторы в положительном и отрицательном направлениях столбчатой диаграммы.

Преимуществом данного технического решения является то, что подача питания на электронные компоненты, установленные на вращающихся валах, и съём сигналов упругого момента осуществляются бесконтактным способом посредством формирования в воздушном зазоре между кольцом с обмоткой и измерительной головкой сигнала с импульсно-кодовой модуляцией [4, 5].

Основным элементом сбора и оцифровки сигналов упругих моментов в составе системы является многофункциональный USB-модуль NI USB-6351 производства National Instruments (рис. 1). Функцию сервера системы передачи и визуализации результатов измерения упругого момента выполняет системный блок компактного промышленного компьютера. Он же реализует функции аппаратного и программного интегрирования системы в цеховую информационную сеть (рис. 1).

Внедрение системы

На рис. 4 представлена фотография, демонстрирующая крепление тензометрических мостов и разъемных телеметрических колец на промежуточном шпинделе верхнего валка в районе сечения 715 мм.



Рисунок 4 – Расположение телеметрического кольца на шпинделе верхнего валка горизонтальной клетки

Измерительная головка закреплена через кулису на подвижной подшипниковой опоре. При этом между вращающимся телеметрическим кольцом с индукционной ка-

тушкой и неподвижной измерительной головкой обеспечивается постоянный воздушный зазор 20 мм. Приемники (декодеры), формирующие сигналы, пропорциональные упругим моментам, а также процессорное оборудование системы мониторинга располагаются в специальном шкафу, установленном на расстоянии 20 м от линий главных электроприводов.

В процессе прокатки шпиндель имеет ход и небольшой (до 5°) наклон продольной оси относительно линии прокатки. Поэтому установка кольца на шпинделе должна быть точно выверенной. Также требуется высокое качество монтажа датчика приемника, т.к. шпиндель имеет телескопическую составляющую.

Разработанная система имеет специальный интерфейс, главное окно которого представлено на рис. 5. Система обеспечивает частоту регистрации упругого момента до 1000 Гц, что значительно превышает диапазон расчетного спектра собственных колебаний линий главных приводов 10–100 Гц. На экране показаны осциллограммы моментов на валах верхнего и нижнего шпинделей за один пропуск листа, полученные с помощью системы.

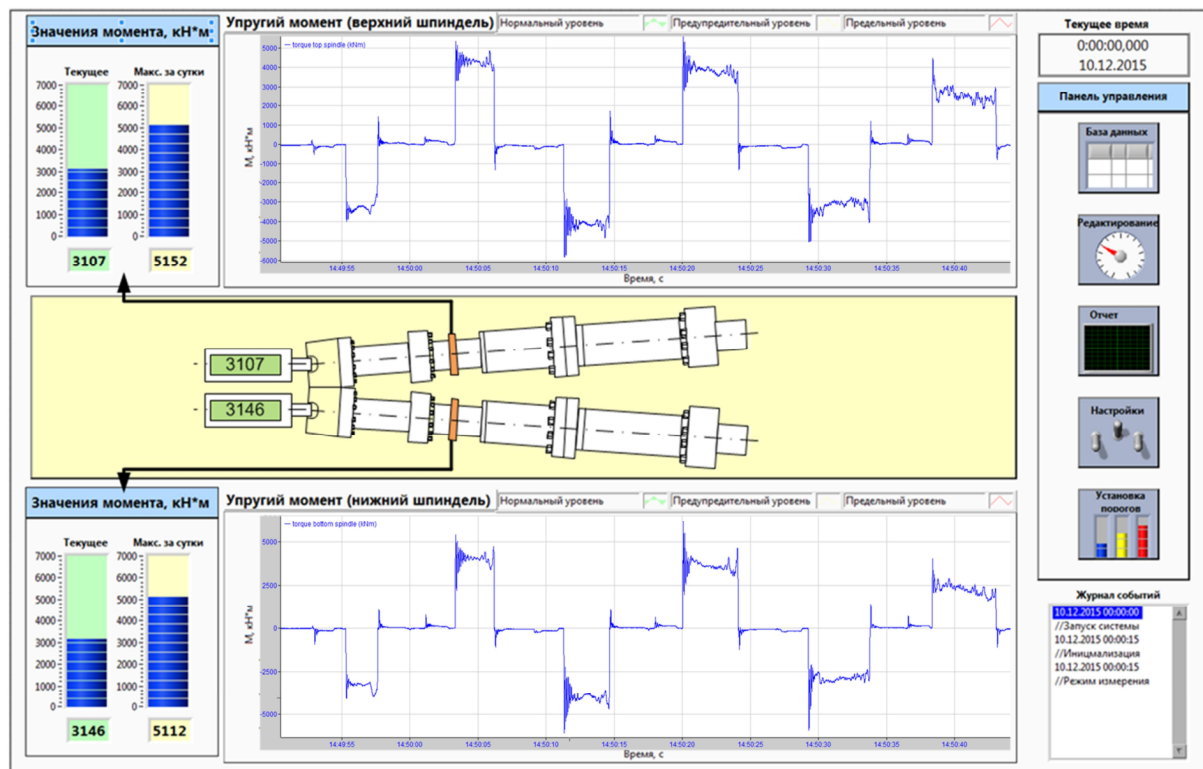


Рисунок 5 – Главное окно интерфейса

В результате анализа осциллограмм, полученных при прокатке листов различного профиля, сделан вывод, что средняя амплитуда ударного момента при захвате более чем в 2 раза превышает установившийся момент прокатки. Значительные динамические моменты также возникают при выбросе полосы.

Обсуждение результатов

По результатам длительного мониторинга, выполненного с помощью разработанной системы, дана оценка характерных динамических моментов в валопроводах верхнего и нижнего валков. Подтверждено возникновение недопустимых моментов при захвате листа валками. Это доказывает эффективность применения разработанной системы, однако не позволяет определить и устранить причины их возникновения.

В связи с этим ставится задача определения наиболее значимых факторов, негативно влияющих на динамические нагрузки валопроводов и электромеханических систем горизонтальной клетки. Это позволит разработать способы и алгоритмы управления, которые будут реализованы в системе ограничения динамического момента. В качестве основных направлений обоснованы:

1. Разработка и исследование алгоритма управления, обеспечивающего предварительный выбор зазора в шпиндельном соединении перед захватом полосы.
2. Разработка адаптивного регулятора электропривода с переменной структурой, обеспечивающего снижение колебаний динамического момента.
3. Разработка алгоритма управления системой “электропривод горизонтальной клетки – гидравлический привод нажимных устройств”, обеспечивающего увеличение межвалкового зазора перед прокаткой с последующим возвращением валков в заданное положение после захвата полосы. Оптимальная настройка регулятора положения нажимного устройства и регулятора толщины полосы в структуре системы автоматического регулирования толщины.
4. Разработка алгоритма управления, обеспечивающего опережающее воздействие на скорость главного электропривода до захвата металла, с целью исключения перерегулирования момента.

Следует отметить, что авторский коллектив имеет опыт разработки и внедрения систем ограничения динамических нагрузок в универсальных клетях прокатных станов. Выполнены и внедрены разработки, направленные на решение данной проблемы в электромеханических системах клеток непрерывной подгруппы широкополосного стана горячей прокатки. Основные результаты исследования данных систем опубликованы в [6–14].

Работа выполнялась при поддержке гранта Президента РФ МД-979.2017.8.

Заключение

Внедрение системы и перечисленных алгоритмов управления обеспечит:

- сокращение времени аварийных простоев стана, обусловленных поломками оборудования линий главных электроприводов;
- сокращение затрат на устранение последствий аварий, замену и восстановление поврежденного оборудования;
- повышение срока службы электрического и механического оборудования за счет снижения ударных нагрузок при захвате листа валками;
- снижение расходного коэффициента за счет сокращения брака, связанного с застреваниями при захвате, и за счет сокращения концевой обрезки.

Литература

1. Крисанов А.Ф. Анализ причин аварий оборудования листопркатных станов и меры по их предупреждению / А.Ф. Крисанов, В.Ф. Кузрман, Б.Н. Виноградов и др. // Обзор, информ. Ин-т «Черметинформация». – М. –1985. – С. 36.
2. Иванченко Ф.К., Красношпка В.А. Динамика металлургических машин. – М.: Металлургия, 1983. – 295 с.
3. Крот П.В. Телеметрические системы мониторинга динамических нагрузок в линиях привода прокатных станов // «Вибрация машин: измерение, снижение, защита». Научно-технический и производственный сборник статей. Вып. 1. – Донецк: ДонНТУ, 2008. – С. 46–53.
4. <http://www.prom-tex.org/> (дата обращения: 01.10.2018).
5. <http://www.kmt-telemetry.com/> (дата обращения: 01.10.2018).

6. Храмшин В.Р. Снижение динамических нагрузок механического и электрического оборудования черновой подгруппы клетей стана горячей прокатки / В.Р. Храмшин, А.С. Карандаев, А.А. Радионов, И.Ю. Андришин, А.Н. Гостев // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2013. – №2. – С. 69–77.
7. Khramshin V.R. Reduction of the dynamic loads in the universal stands of a rolling mill / Khramshin V.R.A.S. Karandaev, S.A. Evdokimov, I.Yu. Andryushin, A.G. Shubin, A.N. Gostev // Metallurgist. – 2015. – Vol. 59. No. 3-4. – Pp. 315–323. DOI 10.1007/s11015-015-0103-8.
8. Khramshin V.R. Algorithm of no-pull control in the continuous mill train / S.A. Evdokimov, A.S. Karandaev, I.Yu. Andryushin, A.G. Shubin // Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications. – 2015. – 6 p. DOI 10.1109/SIBCON.2015.7147263.
9. Radionov A.A. Speed and load modes of rolling hollow billet at the wide-strip rolling mill / A.S. Karandaev, V.R. Khramshin, I.Yu. Andryushin, A.N. Gostev // Proceedings of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems. – 2014. – 5 p. DOI 10.1109/MEACS.2014.6986841.
10. Khramshin V.R. System for speed mode control of the electric drives of the continuous train of the hot-rolling mill / A.S. Evdokimov, G.P. Kornilov, A.A. Radionov, A.S. Karandaev // Proceedings of the 2015 International Siberian Conference on Control and Communications. – 2015. – 6 p. DOI 10.1109/SIBCON.2015.7147264.
11. Karandaev A.S. Method for correction of gauge interference of the head-strip section in a system for automated controlling of the thickness of a broad-strip hot-rolling mill / V.R. Khramshin, I.Yu. Andryushin, S.A. Petryakov, R.R. Khramshin // Russian Electrical Engineering. – 2013. – 84 (8). – Pp. 441–445.
12. Karandaev A.S. Automatic gauge control system with combined control of the screw-down arrangement position / A.S. Karandaev, A.A. Radionov, V.R. Khramshin, I.Yu. Andryushin, A.G. Shubin // Proceedings of 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering. – 2014. – Vol. 1. – Pp. 88–94. DOI 10.1109/APEIE.2014.7040794.
13. Khramshin V.R. Constraining the dynamic torque of a rolling mill stand drive / V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, S.N. Baskov, B.M. Loginov. // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2018. – Т. 18. № 1. – С. 101–111. DOI 10.14529/power180113
14. Khramshin V.R. Method of reduction of an edging and horizontal rolls electromechanical systems interrelation in universal stand of a rolling mill / V.R. Gasiyarov, A.S. Karandaev, A.G. Shubin // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 206. – Pp. 1761–1767. DOI 10.1016/j.proeng.2017.10.710.

АННОТАЦИИ

ДИНАМИКАЛЫК СИСТЕМАЛАРДЫ ОПТИМАЛДАШТЫРУУ

ЖЫЛУУЛУК ПРОЦЕССТЕРИН ОПТИМАЛДУУ БАШКАРУУ МАСЕЛЕЛЕРИНДЕ БЕЛЛМАНДЫН ТЕҢДЕМЕСИН ЧЫГАРУУНУН ВАРИАНТТАРЫ
/ Т.П.Самохвалова

Кадимки жана жеке туундулары бар объектердин сызыктуу жана квазисызыктуу үлгүлөрү үчүн оптималдуу синтездөөчү башкаруунун алгоритмдери түзүлдү. Алгоритмдер мүнөздөмө ыкмасына, А.И.Егоровдун ыкмасына, Р.Беллмандын динамикалык программалоо ыкмасына негизделген.

Ачкыч сөздөр: оптималдуу башкаруу; тескери байланыш; динамикалык программалоо; мүнөздөмө ыкмасы

СИСТЕМАЛАРДЫ МОДЕЛДӨӨ ЖАНА ПРОГРАММАЛЫК КАМСЫЗДОО

ПРОГРАММАЛООНУН CUDA МОДЕЛДЕРИ ЖАНА ГРАФИКАЛЫК ПРОЦЕССОРЛОРДУН ВИРТУАЛИЗАЦИЯСЫ / *В.В.Гайдамако*

Макалада CUDA программалоонун модели (гетерогендик программалоо), видеокарталардын эс тутумунун типтери жана алардын колдонушунун өзгөчөлүктөрү, параллель эсептөөлөрдү өндүрүмдүүлүгүн жана графикалык процессорлор үчүн кодду жазуунун өзгөчөлүгүн көрсөтүүчү кыскача мисалы келтирилген. Ошондой эле кийин бөлүштүрүү тиркемелердин өз ара аракеттешүүсүн тестирилөө жана булуттагы ченегич тутумдардын моделдерин түзүү максатында графикалык процессорлордун виртуализациясынын усулдары каралган.

Түйүндүү сөздөр: графикалык процессорлор, GPU, жалпы дайындоонун эсептөөлөрү, GPGPU, CUDA, NVIDIA контейнерлери, поточные эсептөөлөр, параллель эсептөөлөр, видео эс тутум.

ИЗИЛДӨӨНҮН АР КАНДАЙ ОБЪЕКТТЕРИ ҮЧҮН КАЛИБРЛӨӨ КОЭФФИЦИЕНТИНИН МААНИСИН БААЛОО (СУУНУН ҮСТҮНКҮ БЕТИНИН ЫЛДАМДЫГЫН АНЫКТОО ЫКМАСЫНА КАРАТА) / *К.А. Пресняков, Г.К. Керимкулова, Г.О. Аскалиева*

Суу ылдамдыгынын пульсациясы жана суу деңгээли менен чыгашасынын пульсацияларынын ортосундагы түзүлгөн байланыш Араван-Сай дарыясына жүргүзүлгөн изилдөө материалдары менен сыналган, бул суунун үстүнкү бетинин ылдамдыгын аныктоо ыкмасын иштеп чыгууда алдыга коюлган иш гипотезаны бышыктайт. Калибрлөө коэффициентине кошумча жана негизги параметрлердин таасирине негизделген суу агымдарынын мүнөздүү топторуна классификация сунушталды. Алынган натыйжаларга физикалык негиздөө жүргүзүлдү.

Ачкыч сөздөр: ыкма, калибрлөө коэффициент, таасир берүүчү параметр.

КУЧ ТРАНСФОРМАТОРУН МУЗДАТУУ ПРОЦЕССИН АНАЛИТИКАЛЫК ЖАНА САНДЫК МЕТОДДОР МЕНЕН ТАЛДОО / *К.А. Сатаркулов, У.А. Калматов, Н.А. Суюнтбекова*

Трансформаторду (КТ) муздатуу процессинин болгон математикалык модели жана чыныгы КТ үчүн болгон маалыматтардын негизинде анын аналитикалык чыгарылышы

каралган. Муздатуунун баштапкы этабындагы чечимдердин жыйынтыктарынын графикалык берилишинен КТ элементтеринин температурасы жетишерлик тездик менен төмөндөп жаткандыгы байкалат. Чыныгы КТдагы жылуулук процесстеринин көлөмдүү иерархиялануусун эске алуу менен баштапкы этапта аналитикалык метод менен баяндалып жаткан муздатуу процессинин адекваттуулук даражасы тууралуу маселе жаралат. Ушуга байланыштуу Simulink чөйрөсүндөгү күч трансформаторун муздатуу процессин талдоонун альтернативдик методу сунушталат. Мындай модельдин жардамы менен моделин текшерүүнүн жыйынтыктары чындыкка жакын экендигин көрсөттү.

Негизги сөздөр: трансформатор, жылуулук процесси, муздатуу, математикалык жана компьютердик моделдер, Simulink.

НЕЙРОТАМАКТЫК МОДЕЛДЕРДИН БАЗАСЫНДА УБАКЫТ ТИЗМЕНИНДЕГИ АБА ЫРАЙЫНЫН БАСЫМЫНЫН ӨТҮШҮН КАЛЫБЫНА КЕЛТИРҮҮ / Л.И.Великанова, Н.М.Лыченко

Иште аба ырайынын басымынын өтүшүн калыбына келтирүүдөгү актуалдуу маселени чечүүдө нерондук тармактардын жасалма аппараттарын колдонуунун мүмкүнчүлүктөрү каралган жана бир суткадагы 6 сааттык аба ырайынын басымын өлчөөдө басымдын өтүшүнө дал келүүчү алгоритмдер сунушталат. Жалпылап окутуу үчүн өлчөөнүн мөөнөттөрү берилген типтери боюнча класстарга ажыратылат жана ар бир аныкталган класстар үчүн нейротармактык моделдер түзүлөт. Жыйынтыгында аба ырайынын басымынын өтүшүнө колдонулган булл моделдер калыбына келтирилген маанилер менен алмаштырылат, андан кийин өлчөө мөөнөтүнүн калгандары үчүн өткөрүүнү калыбына келтирүү процесси кайталанат. Кыргыз кырка тоолорунун түштүк батыш тарабындагы этегинен орун алган Байтик метеорологиялык станциясынын мисалында жалгыз өткөрүүлөрдү калыбына келтирүүнү моделдөө жыйынтыктары келтирилген. Өткөрүүнү калыбына келтирүүчү популярдуу методдор менен алынган жыйынтыктарды салыштыруу (жакынкы коңшу ыкмалар жана бир тилкелүү коңшу чекиттердин интерполяциясы) сунушталган алгоритмдин эффективдүүлүгүн көрсөттү.

Ачкыч сөздөр: убактылуу чектер, өткөрүлүп жиберилген маалыматтар, абаанын басымы (температура), нейротармактык модель, окутуучу жалпылык.

МАТЛАВ Р-КОДУНУН КОМПИЛЕШТИРГЕН ФАЙЛДАРЫДАН ТҮЗҮЛГӨН ПРОГРАММАЛЫК ПАКЕТТЕРДИН КОМПОНЕНТТЕРИНИН ИНТЕРФЕЙСИНИ ЖАНА ӨЗ АРА АРАКЕТТЕШҮҮСҮНҮ АНАЛИЗ ҮЧҮН МЕТОДУ / А.Н. Мансуров

Matlab Р-кодунун компилештирген файлдарыдан түзүлгөн программалык пакеттердин анализ үчүн методу текшерилет. Бул метод компоненттердин аралыгында байланыштерди анализ жасоого, чакыруулардын дарагини жасоого мүмкүндүк берет, балким, компоненттердин интерфейстери спецификациясыни билүүгө жана анча-мынча же толук маалыматтардын агымдары диаграммасы жасоого мүмкүндүк берет. Көрсөткөн метод *grid_strain* жана *grid_strain3* программалык пакеттерге колдонот.

Ачкычтуу сөздөр: Matlab, Р-код, программалык пакет, компоненттердин өз ара аракеттешүүсү, компоненттин интерфейси, анализ, чакыруулардын дарагы, маалыматтардын агымдары диаграммасы.

ЧОҢ КӨЛӨМДҮҮ ВИЗУАЛДЫК МААЛЫМАТТЫ ЧАГЫЛДЫРУУЧУ КАРАЖАТТАРДЫ ТҮЗҮҮНҮН ӨЗГӨЧӨЛҮКТӨРҮ / Н.Н. Цыбов

Аннотация: Макалада маалыматты чагылдыруу суроолору жана белгилүү көлөмдө чагылдырылуучу маалыматты кабыл алууда адам-оператордун психо-физиологиялык мүмкүнчүлүктөрүнүн аспекти каралган. Визуалдык маалыматты чагылдыруунун жаңы каражаттарын түзүү жана «мониторлордун ашыкча жүктөлгөн режимдер» көйгөйүн чечүү максатында макалада интеллектуалдык окутуу системалары үчүн визуалдык маалыматты чагылдыруу каражаттарын долбоорлоодо толукталган жана аралаш реалдуулукту чагылдыруунун технологияларын колдонуу мүмкүнчүлүгү «тыюу салынган энергетикалык зоналардын» өлчөмдөрү менен башкарылуучу фотондук кристаллдардын базасында оптикалык жарык-жол түзүлүштөрүн колдонуу менен аларды ишке ашыруу варианты каралган.

Негизги сөздөр: чагылдыруу каражаттары, окутуу системалары, аралаш реалдуулук, толукталган реалдуулук, фотондук кристаллдар.

ЭКИ ДЕНГЭЭЛДҮҮ БӨЛҮШТҮРҮЛГӨН СИСТЕМАНЫН ЛАБОРАТОРИЯЛЫК МОДЕЛИН ИШТЕП ЧЫГУУ / Р.А Акматбеков, А. К. Конокбаева, Ю.И. Каракай

Заманбап автоматташтыруу жана башкаруу системалары мейкиндиктик-бөлүштүрүлгөн болуп саналат. Мейкиндиктик-бөлүштүрүлгөн объекттер дээрлик бардык чарбалык-экономикалык тармактарында кездешет. Бөлүштүрүлгөн системаны автоматташтырууну долбоорлоодо келип чыккан ар кандай маселелерди чечүү үчүн анын лабораториялык моделин иштеп чыгуу жөндүү. Бул иште эки деңгээлдүү бөлүштүрүлгөн системаны автоматташтырууга түзүлгөн лабораториялык модел жөнүндө маалыматтар берилген

Негизги сөздөр: бөлүштүрүлгөн автоматташтыруу системасы, физикалык модел, эки баскычтуу системасы, борбордук башкаруу пункту, программалануучу логикалык контроллер, GSM/GPRS модем, программа, тепкичтүү логикалык-диаграмма, программалоо системасы.

СӨЗҮ ЖАНА БАШКАРУУ SMART АРАКЕТИ-ИЙКЕМДҮҮ СИСТЕМАСЫН ТАЛДОО / Б.Т. Укуев, Б.Б. Назаров

Макалада энергия жаңылануунун түпкү тамыры жана маңызы каралган, активдүү адаптивдик тармактар элементтерин камтыган интеллектуалдык энергетикага өтүү шартындагы энергетиканын инновациялык өнүгүшүндөгү негизге өзгөчөлүктөр көрсөтүлдү. Жыйынтыгында рынок шартында электроэнергиянын үзгүлтүксүз камсыздоо жана колдонуу менен бирге энерго-бизнес тармагында конкуренттүүлүктү жогорулатуу Smart grid базасында башкаруунун жаңы стратегиялык мүмкүнчүлүктөрү,

вектордук өлчөө технологиялары Кыргыз Республикасынын энергетикалык системасынын болгон ресурстарын башкаруунун жаңы дооруна өтүүгө түзүлүүчү шарттар жөнүндө баяндама берилет. Жасалма интеллекттин каражаттарын колдонуу башкаруу системасынын потенциалдык мүмкүнчүлүктөрүн кеңейтет, ошону менен бирге образдарды көрө билүү, иш- аракеттерди пландоо жана билим топтоо бирге белгисиз математикалык модели менен объектерди башкарууга мүмкүнчүлүктү ишке ашыруучу каралган.

Түйүндүү сөздөр: интеллектуалдык тармак, активдүү адаптивдик система, инновация, энергетика, интеллектуалдык энергетика, башкаруу модели, интеллектуалдык активдүү адаптивдик тармак, акылдуу шаар модели.

МААЛЫМАТТЫК-ӨЛЧӨӨ СИСТЕМАЛАРЫ

МАГНИТОМЕТРЛЕРДИН ИНДУКТИВДҮҮ ЧӨЛМӨКТӨРҮНҮН ПАРАМЕТРЛЕРИН ӨЛЧӨӨНҮН ЖОЛУ ЖАНА АНЫ Л КАРД Е 502 МААЛЫМАТ ЧОГУЛТУУ ПЛАТАСЫНЫН НЕГИЗИНДЕ ИШКЕ АШЫРУУ / С.Н.Верзунов

Бул иште толук комплекстүү каршылыкты чыңалууга айландырган белгилүү ыкманын негизинде индукциялык магнитометрлердин чөлмөктөрүнүн параметрлерин өлчөө жолу жана аны Л КАРД Е 502 маалымат чогултуу платасынын негизинде ишке ашыруу каралган. Индукциялык магнитометрлердин чөлмөктөрү иштиктүү элемент болгондугу менен айырмаланышат, анткени аларда өлчөө приборлоруна таасир берген кадыресе индукциянын ЭКК пайда болот. Бул өзгөчөлүктү эсепке алуу үчүн, ар түрдүү жыштыкта өлчөнгөн толук комплекстүү каршылыктын саны тандалып алмаштырылган схеманын негизинде эсептелип чыгарылган санга дал келгидей кылып, индуктивдүү чөлмөктөрдүн параметрлерин эсептөө сунуш кылынган.

Урунттуу сөздөр: магнитометр; индуктивдүүлүктү өлчөө; мителүү сыйымдуулук; маалымат чогултуу платасы.

МААЛЫМАТТЫ ЭЛЕСТЕТИП КӨРҮҮ ЖАНА ЧОГУЛТУУ СИСТЕМАСЫН ИШТЕП ЧЫГУУ / С.Н.Верзунов, Д.А.Токсаитов

Индукциялык магнитометрдин көрсөтмөлөрүн талдоо үчүн геомагниттик талаанын векторунун өзгөрүүлөрүн чогултуу жана элестетип көрүү системасы иштелип чыкты. Жөнөкөй жайылтууну камсыз кылуу үчүн контейнерлештирүү технологиясын колдонуу менен микросервистик архитектуранын базасында маалымат чогултуунун чакан системасы түзүлдү. Илимий эксперименттерди талаа шарттарында жүргүзүү мүмкүнчүлүгүн камсыз кылуу максатында мобилдик түзүлүштөр үчүн элестетип көрүү чакан системасы иштелип чыкты. Дискретизациялоо жыштыгы 2 МГц чейинки геомагниттик талаанын өзгөрүүлөрү жөнүндөгү чоң көлөмдөгү маалыматты чогултуу үчүн бардык чакан системалар убакыт катарынын маалымат базасын пайдаланышат.

Урунттуу сөздөр: санариптик магнитометр; магниттик билдирги; убакыт катарынын маалымат базасы; маалымат чогултуу; элестетип көрүү.

SENSOR-CLOUD ИНФРАСТРУКТУРАСЫ – БУЛУТТАГЫ МААЛЫМАТ-ЧЕНЕГИЧ ТУТУМДАР / В.В.Гайдамако

Макалада жалпылаштырылган Sensor-Cloud – маалыматты сактоочу, иштетүүчү жана маалыматка жетүү үчүн керектелүүчү, физикалык жана виртуалдык билгизгичтерди

башкаруучу, тейлөөгө маалыматты чогултууга керектелүүчү маалымат-ченегич тутумдар архитектурасы баяндалып жазылган.

Тутумдуу сөздөр: Sensor-Cloud, булуттагы МЧТ, зымсыз сенсордук тармактар, WSN, IaaS, SensIaaS.

АВТОМАТИКА СИСТЕМАЛАРЫ ЖАНА ДИАГНОСТИКА

КАБЕЛДИН ЭЛЕКТР ОТКОРГУЧ ЭЛЕМЕНТЕРИНИН КЕМТИКТЕРИН АНЫКТОО ЖОЛУ / И.В. Брякин, И.В. Бочкарев, В.Р. Храмишин

Электр откоргуч текзаттарынын бош электрондоруна озгормо электр талаасы таасир этуу учурунда пайда болуучу, спин-уюлдашуу кубулушун колдонуунун негизинде, кабелдин электр откоргуч элементеринин кемтиктеринин турун жана ордун аныктоонун жаны жолу сунушталат. Туурасынан орун которуучу текшерилуучу кабелге багытталган озгормо маонит талаасы менен таасир этишет, ал бош электрондордун спиндик магнит моментеринин уюлдашуу турундо кабелдин ЭЭде толкундуу физикалык жараяндарды дуулуктурот. Индукциондук бергич аркылуу бул жараянды каттайт жана индукциянын ЭККсы турундо текшерилуучу белгини туптойт. Текшерилегн белгинин муноздогучторун баштапкы белгинин муноздогучтору менен салыштырылат, кемтиги жок эталондук кабелдин кесиндисин колдонуп ушул эле жол менен алынган, жана алынган бул муноздогучтордун айырмачылыктарынын негизинде ЭЭ кемтигинин бар же жоктугу жана орду индукциондук бергичтин жайгашкан орду боюнча каралат.

Негизги создор: жыйналган коломдуу цилиндрлик эки электродтуу отмо конденсатор, индукциялык бергич, электрондун кыймылынын оздук момент саны, спиндик магниттик момент, бош электрондордун спиндик магниттик моментеринин уюлдашуусунун резонанстык жыштыгы

КУЧТУК КАБЕЛДИ ЗАМАНБАП ТЕКШЕРУУ ЫКМАЛАРЫНЫН ОЗГОЧОЛУКТОРУ / Г.Х.Багиев, И.В.Брякин, И.В.Бочкарев

Импульстук рефлектометрия, толкундук ыкма, кыска убакыттык жаа жана болуктук бошонуу ыкмаларндай болгон кучтук кабелдерди текшеруунун заманбап ыкмаларын колдонуу озгочолуктору каралат. Текшеруунун берилген ыкмаларын ишке ашыруунун негизинде жаткан физикалык таасирдуулуктор талданат. Дал келген текшеруу ыкмаларына керектуу болгон операциондук жол –жоболорунун регламенти системдик турдо каралат.

Негизги создор: кабель; кабельдик чубалгы; кабельдин жерин аныктоо ыкмаларын классификациялоо; аралыктан жана топографиялык ыкмалар; импульстук рефлектометрия ыкмасы; болуктук бошонуу ыкмасы; толкундук ыкма; кыска убакыттык жаа ыкмасы.

МЕТАМАТЕРИАЛДАР ЖАНА ЖЫШТЫК ТАНДООЧУ СТРУКТУРАЛАР / С. Т. Турдумаматов

Акыркы жылдары метаматериал деп аталган жасалма материалдарды колдонууга болгон кызыгуу өсүүдө. Айрыкча радиолокация системаларындагы антенналарда пайдаланыла турган метаматериалдарга болгон кызыгуу өзгөчө күч. Бул макалада жыштык-тандоочу метаматериалдардын уникалдуу касиеттерин үстүртөн изилдедик. Ошондой эле алардын радар антенналарында кандай колдонулаарын бир нече мисал менен түшүндүрдүк.

Ачкыч сөздөр: метаматериал, терс диэлектрикалык өткөрүмдүүлүк, терс магниттик өткөрүмдүүлүк, жогорку импеданстуу структура, жыштык-тандоочу структура, электромагниттик тыюу салынган структура.

КАЛЫН БАРАКТУУ ЖАЮУ ИРИТЕСТИН ОКТОЛГООЧ ОТКОРГУЧУНДОГУ КЛЕТТИН СЕРПИЛМЕ МОМЕНТИН ТЕКШЕРУУ / С.А.Евдокимов, В.Р. Храмшин., В.Р.Гасияров, Б.М.Логинов

Калын барактуу жаюу иритестин октолгооч откоргучундогу горизонталдык клетинде чектен ашкан динамикалык жуктун пайда болуу себептери аныкталды. Клеттин октолгооч откоргучундогу серпилме моменти тынымсыз текшерууну камсыздоо учун, турактуу телеметрикалык системди иштеп чыгуу керек болду. Бул жабдууга болгон талаптар каралды жана бул системанын негизги функциялары аныкталды. Серпилме моментке пропорционал болгон белгилерди олчоо, корунмо кылуу жана беруу системинин аппаратык солукоту алынды. Тензорезисторлорду жайгаштыруу жана туташтыруу озгочолуктору каралды. Кабыл алгыч менен бергичтин ортосундагы сандык чондуктарды беруу жана сигналдарды шарт белгилегичтерин откоргучсуз азыктандыруучу жабдуунун суротолушу берилди. Калын барактуу иритесте системдин аткарылышынын жыйынтыктары корсотулду. Индуктивдуу азыктандыруу жана чондуктарды кабылдоо учун кабылдоочу болуктун жана телеметрикалык шакекче тузулушу корсотулгон. Жогорку жана томонку ийиктердин октолгучундагы моменттердин муноздуу осциллограммалары менен терезе интерфейс системи келтирилген. Ондурешко киргизуу натыйжалуулугу белгиленген.

Узак убакыт бою байкоонун жыйынтыгы боюнча, горизонталдык клеттин октолоч откоргучундогу динамикалык моменттерди азайтууга багыталган, негизги кыймылга келтиргичтерди башкаруу алгоритмин иштеп чыгуу багыттары аныкталды.

Негизги создор: калын барактуу жаюу иритес; горизонталдык клет; электр кыймылга келтиргич; октолгооч откоргуч; динамикалык момент; текшеруу системи; талап; тузулуш; аппараттык болук; белгилерди беруу; техникалык аткарылышы; ондурушко киргизуу; башкаруу; сунуштоо.

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF DYNAMIC SYSTEMS

VARIANTS OF DECISIONS OF BELLMAN'S EQUATION IN OPTIMAL CONTROL PROBLEMS THERMAL PROCESSES / T.P. Samokhvalova

Algorithms of optimal synthesising control for linear and quasilinear models of objects with private and ordinary derivatives are constructed. Algorithms are based on a method of dynamic programming of R.Bellman, A.I.Egorov's technique, a method of characteristics.

Keywords: optimal control; feedback; dynamic programming; a method of characteristics.

MODELING AND SOFTWARE SYSTEMS

CUDA PROGRAMMING MODEL AND VIRTUALIZATION OF NVIDIA GRAPHICAL PROCESSORS / V.V.Gaidamako

The paper describes CUDA programming model (heterogeneous programming), the types of video card memory and their properties, the short example showing productivity of parallel computing and features of coding for graphical processors is given. Also, methods of graphical processors virtualization are reviewed for further use in testing the interaction of distributed applications

Key words: Graphical processors, GPU, general purpose computing, GPGPU, CUDA, NVIDIA containers, parallel computing, video memory

ESTIMATION OF VALUES OF THE CALIBRATION FACTOR FOR VARIOUS RESEARCH OBJECTS (TO THE METHOD FOR DETERMINING THE WATER SURFACE RATE) / K.A. Presnyakov, G.K. Kerimkulova, G.O. Askalieva

The established connection between the pulsations of water velocity and the pulsations of the level and flow of water has been tested on research materials of the r. Aravan-Sai, which confirms the correctness of the working hypothesis put forward when developing a method for determining the surface velocity of water. A classification of characteristic groups of watercourses based on the fundamental and additional parameters of influence on the calibration coefficient is proposed. Conducted a physical justification of the results.

Keywords: method, calibration factor, influence parameter.

ANALYSIS OF COOLING PROCESS OF A POWER TRANSFORMER USING ANALYTICAL AND NUMERICAL METHODS / K.A Satarkulov, U.A Kalmatov, N.A.Suyntbekova

The existing mathematical model of the power transformer (ST) cooling process and its analytical solution based on the initial data for the real ST are considered. It is noted that from the graphical representation of the solution results at the initial stage of cooling there is a fairly rapid decrease in the temperature of the ST elements, especially the winding temperature. Given the significant inertia of thermal processes in real ST, the question arises about the degree of adequacy of the cooling process, described by the analytical method at the initial stage of cooling. In this regard, an alternative method for analyzing the cooling process using a computer model of the power transformer cooling process in the Simulink environment is proposed. The simulation results using such a model showed the proximity to reality.

Keywords: transformer, thermal process, cooling, mathematical and computer models, Simulink.

DATA RECOVERY IN AIR TEMPERATURE TIME SERIES BASED ON THE NEURAL NETWORK MODEL / L.I. Velikanova, N.M. Lychenko

The paper considers the applicability of artificial neural networks for solving of the actual problem of missing data in air temperature measurements of and proposes an appropriate algorithm for data recovery in time series with daily 6-hour measurements. The training set for one of the measurement period is divided according to the type of data into classes and a neural network model is built for each identified class. As a result of the subsequent use of these models, the missing data in the original time series are replaced by the recovered values, then the process of data recovering is repeated for the remaining measurement periods. The results of the simulation of the recovery of single missing data are given on the example of the data of Baitik meteorological station located in the foothill zone of the western part of the northern slope of the Kyrgyz Range. Comparison of results with popular methods for recovery of missing data (linear interpolation of neighboring points and the method of nearest neighbors) showed the effectiveness of the proposed algorithm.

Keywords: time series, missing data, air temperature, neural network model, training set

METHOD FOR ANALYSING INTERFACE AND INTERACTION OF COMPONENTS OF SOFTWARE PACKAGES CONSISTING OF COMPILED MATLAB P-CODE FILES / A. Mansurov

Article discusses a method for analysis software packages consisting of compiled Matlab P-code files. The method allows investigating components' interaction, reconstruct call tree and component diagram, probably determine components' interface specifications and construct partial or full data flow diagrams. The method is applied to software packages *grid_strain* and *grid_strain3*.

Key words: Matlab, P-code, software package, component interaction, component interface, analysis, call tree, data flow diagram.

APPLICATION OF AUGMENTED AND MIXED REALITY DISPLAYING TECHNOLOGIES FOR DESIGNING VISUAL INFORMATION DISPLAY FOR INTELLIGENT TRAINING SYSTEMS / N.N. Tsybov

The article considers the issues of information display and aspects of psycho-physiological capabilities of the human operator when receiving certain volumes of displayed information. For the purpose of creating new means for displaying visual information and solving the problems of "overloaded monitor modes", the article considers the possibility of applying augmented and mixed reality displaying technologies in the design of visual information display facilities for intelligent training systems and variant of their implementation using optical lightguide devices based on photonic crystals with a controlled size of «forbidden zones».

Key words: display tools, training systems, mixed reality, augmented reality, photonic crystals.

TO DEVELOP A LABORATORY MODEL OF TWO-LEVEL DISTRIBUTED SYSTEM / R.A. Akmatbekov., A. K. Konokbaeva, Yu.I. Karakaj.

Modern automation and control systems are spatially distributed. Spatially distributed objects are found in almost all sectors of economic activity. For working out various issues of development and design of distributed automation systems, it is advisable to have its laboratory model. The paper presents information on the development of a laboratory model of a two-level distributed automation system.

Key words: distributed automation system, physical model, two-level system, central control point, programmable logic controller, GSM/GPRS modem, program, ladder logic diagram, programming system.

OVERVIEW AND ANALYSIS OF MODELS OF MANAGING INTELLECTUAL ACTIVE ADAPTIVE SYSTEMS / *Ukuev B.T., Nazarov B.B.*

Abstract: the article discusses the origins and essence of energy modernization, describes the main features of the innovative development of energy in the transition to intelligent energy with elements of active-adaptive networks. It is concluded that new strategic management capabilities based on smart grid, vector measurement technologies create conditions for transition to a new stage of management of all types of resources in the energy system of the Kyrgyz Republic for rapid adaptation to continuous changes in transmission and consumption of electricity in market conditions with a corresponding increase in energy competitiveness and energy businesses. The use of artificial intelligence expands the potential capabilities of control systems, allowing you to implement the management of objects with an unknown mathematical model, increase their efficiency by incorporating patterns of pattern recognition, action planning and knowledge accumulation.

Keywords: intelligent network; active adaptive systems; innovation; energy; intellectual energy; management model; intelligent active adaptive network; smart city model.

INFORMATION MEASUREMENT SYSTEMS

WAY OF MEASUREMENT PARAMETERS INDUCTANCE COILS OF MAGNETOMETERS AND ITS REALIZATION ON THE BASIS OF DATA ACQUISITION BOARD L KARD E 502 / *S.N. Verzunov*

In work the way measurement of parameters coils induction magnetometers on the basis of the known method transformation the complete complex resistance to voltage and its realization on the basis of a data acquisition board L KARD E 502 is considered. Coils of induction magnetometers differ in the fact that they are the active elements as they have significant EMF of an induction which affecting on measuring apparatuses. For accounting of this feature it is offered to calculate inductance coil parameters so that gaged values of the complete complex resistance at different frequencies in the best way corresponded calculated on the basis of the chosen equivalent circuit.

Keywords: magnetometer; measurement of inductance; spurious capacitance; data acquisition board.

DEVELOPMENT OF A DATA COLLECTION AND VISUALIZATION SYSTEM FOR A DIGITAL THREE-COMPONENT INDUCTION MAGNETOMETER / *S.N. Verzunov, D.A. Toksaitov*

To analyze measurements of an induction magnetometer, a system for collecting and visualizing the history of changes in the geomagnetic field vector has been developed. Its data collection subsystem utilizes a microservice architecture with containerization technologies to simplify the tasks of system deployment. The visualization subsystem is designed for mobile devices to allow conducting scientific experiments in the field. Both subsystems use a time series database to collect large amounts of geomagnetic data from ADC or filtering devices which can work at frequencies of up to 2 MHz.

Keywords: digital magnetometer; magnetic sensor; time series databases; data collection; visualization;

SENSOR-CLOUD INFRASTRUCTURE – CLOUD INFORMATION-MEASURING SYSTEMS / V.V.Gaidamako

The paper describes the general Sensor-Cloud architecture – information-measurement systems that use cloud technologies to organize the collection, storage, processing and access to information, manage physical and virtual sensors, and provide the sensor infrastructure as a service.

Key words: Sensor-Cloud, Cloud information-measuring systems, virtual sensors, wireless sensor networks, WSN, IaaS, SensIaaS

AUTOMATION SYSTEMS AND DIAGNOSTICS

DEVELOPMENT OF A NEW METHOD OF DETERMINING DEFECTS ELECTROCONDUCTING CABLE ELEMENTS / I.V. Bryakin, I.V. Bochkarev Khramshin V.R.

A new method for determining the location and type of defect in the electrical conductive elements of the cable is proposed, based on the use of spin-polarization phenomena arising when an alternating electric field is applied to free electrons of electrically conductive materials. The longitudinally moving controllable cable is acted upon by a directional alternating electric field, which in the electrically conductive elements of the cable is excited by a wave physical process in the form of a polarization of the spin magnetic moments of free electrons. The induction sensor registers this process and forms a control signal in the form of an EMF induction. The parameters of the control signal are compared with the parameters of the reference signal obtained in a similar manner in advance using a segment of the reference cable without defects, and the deviations obtained from these parameters judge the presence and appearance of a defect in the electrically conductive elements at the location of the induction sensor.

Keywords: a two-electrode pass-through cylindrical capacitor with a concentrated capacitance, an induction sensor, an electron momentum of the electron (spin), a spin magnetic moment, a resonance frequency of polarization of the spin magnetic moments of free electrons

FEATURES OF MODERN METHODS CONTROL OF POWERFUL CABLE LINES / H.G. Bagiev, I.V. Bryakin, I.V. Bochkarev

The features of the application of modern methods of monitoring power cable lines such as pulsed reflectometry, partial discharge and short arc methods, the wave method are considered. The physical effects underlying the implementation of these control methods are analyzed. The system outlines the necessary operational procedures for the relevant control methods. It is proposed to improve the quality indicators of control methods using new physical effects.

Keywords: cable; cable line; classification of methods for locating cable damage; remote and topographic methods; method of pulse reflectometry; partial discharge method; short arc method; wave method.

METAMATERIALS AND FREQUENCY SELECTIVE SURFACES / S.Turdamamatov

In recent years, there has been a growing interest in the application of artificial materials, known as Metamaterials, which are of particular interest in the radar antenna systems. In this paper, we provided an overview of the unique properties of the frequency-selective surfaces of such materials. Also, we presented several examples of their use in the design of antennas.

Keywords: Metamaterial, Negative Permittivity, Negative Permeability, High Impedance Surface, Frequency Selective Surface, Electromagnetic Band Gap.

MONITORING THE ELASTIC SECTION MODULUS IN THE SHAFT LINES OF A PLATE MILL / S.A. Evdokimov., V.R. Khramshin, V.R. Gasiyarov, B.M. Loginov.

The research team has identified the causes behind the unacceptable dynamic loads in the shaft lines of a horizontal plate-mill stand. In order to ensure the continuous monitoring of the elastic section modulus in the stand shaft lines, the researchers herein prove feasible the development of a stationary telemetry system. The paper defines the main functions of such a system and enumerates the hardware requirements. It further presents the hardware structure of the system for the measurement, transmission, and visualization of signals proportional to the elastic modulus. The paper dwells upon the peculiarities of tensoresistor placement and connection. It describes the hardware that provides wireless power supply to signal encoders as well as digital data transmission from the transmitter to the receiver. The results of implementing such a system for a plate mill are presented. The researchers show how to install the telemetry ring and the receiving head for inductive power supply and data reception. The paper contains a system interface window with characteristic modulus oscillograms for the lower-spindle and upper-spindle shafts. Implementation efficiency is noted. Monitoring in the long run has helped determine the focus areas of developing main-drive control algorithms intended to limit the dynamic moduli in the horizontal-stand shaft lines.

Keywords: plate mill; horizontal stand; electric drive; shaft line; dynamic modulus; monitoring system; requirements; structure; hardware; signal transmission; technical implementation; introduction; control; recommendations.

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Научно-технический журнал

Редактор Л.В.Тарасова
Компьютерная верстка В.П. Алексеева

Подписано к печати 29.11.2018 г. Формат 70/108 1/8
Печать офсетная. Объем 19,5 п.л. Тираж 200 экз.

Издательство «Илим»
720071, Бишкек, проспект Чуй, 265-а