

EISSN 1694-5050
ISSN 1694-5050

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ И АВТОМАТИКИ

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

№2 (41)



БИШКЕК

2021

ИМА НАН КР

ISSN 1694-5050 (печатная версия)
ISSN 1694-836X (электронная версия)

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ МАШИНОВЕДЕНИЯ И АВТОМАТИКИ

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ № 2 (41)

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 24 марта 2020 г.



БИШКЕК

2021

ИМА НАН КР

П 78

Проблемы автоматки и управления: Научно-технический журнал
/ Национальная академия наук Кыргызской Республики.–Бишкек: ИМА, 2021.– №2 (41). – 109 с.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР:

д.т.н., профессор Брякин Иван Васильевич ✉
Институт машиноведения и автоматки НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ:

к.т.н. Верзунов Сергей Николаевич ✉
Институт машиноведения и автоматки НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

д.т.н., академик РАН Евтушенко Юрий Гаврилович ✉
Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" РАН (Москва)

д.т.н, член-кор. АЭН РФ Карандаев Александр Сергеевич ✉
Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет) (Челябинск)

д.ф.-м.н. академик НАН РК Калимолдаев Максат Нурадилович
Казахский национальный университет им. Аль-Фараби (Алматы)

д.т.н, член-кор. АЭН РФ Макаричев Юрий Александрович ✉
Самарский государственный технический университет (Самара)

д.т.н., профессор Храмшин Вадим Рифхатович ✉
Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова (Магнитогорск)

д.т.н., профессор Еремин Евгений Леонидович ✉
Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск)

д.т.н., профессор Лыченко Наталья Михайловна ✉
Кыргызско-Российский славянский университет (Бишкек)

д.т.н., профессор Исмаилов Бактыбек Искакович ✉
Агентство по аккредитации образовательных программ и организаций (Бишкек)

д.т.н., профессор Бочкарев Игорь Викторович ✉
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова (Бишкек)

д.т.н., профессор Галбаев Жалалидин Токтобаевич ✉
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова (Бишкек)

д.ф.-м.н., профессор Сатыбаев Абдуганы Джунусович ✉
Ошский технологический университет им. акад. М.М. Адышева (Ош)

д.т.н., профессор Бакасова Айна Бакасовна ✉
Институт машиноведения и автоматки НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

д.т.н. Янко Дмитрий Владимирович ✉
ОАО «Кыргызтелеком» (Бишкек)

к.ф.-м.н., с.н.с. Керимкулова Гулсаат Кубатбековна ✉
Институт машиноведения и автоматки НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

к.т.н. Аскалиева Гулзада Орозобаевна ✉
Институт машиноведения и автоматки НАН Кыргызской Республики (Бишкек)

В журнале публикуются статьи по информационным технологиям и обработке информации, математическому и компьютерному моделированию динамических систем и процессов, автоматическому управлению динамическими системами и процессами

Контакты редакции:

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265.

Институт машиноведения и автоматки Национальной академии наук КР.

Телефон: +996 553 72-20-30.

E-mail: verzunov@hotmail.com

Полная электронная версия журнала: <https://ima.naskr.kg/jrn/index.php/pau>

ISSN 1694-5050, 1694-836X © Институт машиноведения и автоматки НАН КР, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИНТОВОЙ ФОРМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ СЕТОЧНОГО ШАГА <i>Урусова Т.Э., Урусова И.Р., Бакирова Э.М., Сапаралиева А.Н.</i>	4-10
ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРЕГРЕВА ЖИЛ ТОКОПРОВОДОВ ОТНОСИТЕЛЬНО ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕГО МИРА В СРЕДЕ LABVIEW <i>Бузурманкулова Ч.М.</i>	11-17
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ СМЕСИ ГАЗА И ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ <i>Картанова А.Дж., Сулайманова С.М., Абдрасакова А.Б.</i>	18-25
ПУЛЬСАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ОТКРЫТОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ <i>Керимкулова Г.К., Пресняков К.А., Аскалиева Г.О.</i>	26-31
МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ОПИСАНИЯ УПРУГОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ РЕЗИНОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ <i>Аскарбеков Р.Н., Дуйшеналиев Т.Б.</i>	32-39

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ СРЕДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ЗАЩИЩЕННОГО ИСПОЛНЕНИЯ <i>Корякин С.В.</i>	40-55
АЛГОРИТМ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СЫРЬЯ В МЕТАТЕНКЕ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ <i>Обозов А. Дж., Лаврентьев А.В.</i>	56-60
РАЗРАБОТКА ЗАЩИЩЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА НА ОСНОВЕ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГИИ <i>Исроилов С.Г., Верзунов С.Н.</i>	61-76
АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЛАЧНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С УЧЕТОМ БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ <i>Гайдамако В.В.</i>	77-88
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КЛАССОВ ИНДЕКСА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА Г. БИШКЕКА С УЧЕТОМ НОВЫХ ДАННЫХ 2020 – 2021 ГГ. НА БАЗЕ LSTM-НЕЙРОСЕТЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА <i>Лыченко Н.М., Сорокова А.В.</i>	89-99

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕОДНОРОДНЫХ ЦЕПНЫХ СХЕМАХ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ <i>Эралиева Г.Ш., Абдыбаева Ж.К., Асан уулу А., Суюнтбекова Н.А.</i>	100-108
---	---------

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

УДК 537.527

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВИНТОВОЙ ФОРМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ СЕТОЧНОГО ШАГА

И.Р. Урусова¹, к.ф.-м.н., moon4ik_29@mail.ru

Т.Э. Урусова², д.ф.-м.н., urusova_tolkun@mail.ru

Э.М. Бакирова¹, к.ф.-м.н., elizabetha_83@mail.ru

А.Н. Сапаралиева¹, к.ф.-м.н., saparaliev1980@mail.ru

¹*Институт фундаментальных наук при КНУ им. Ж.Баласагына,
Бишкек, Кыргызстан*

²*Высшая аттестационная комиссия Кыргызской Республики
Бишкек, Кыргызстан*

Выполнены расчёты открытой электрической дуги в однородном внешнем аксиальном магнитном поле при различных значениях сеточного шага $\Delta = 0,1$ и $0,2$ мм. Установлено, что численная реализация винтовой формы дуги не зависит от величины сеточного шага и формируется в результате воздействия схемного аналога флуктуаций.

Ключевые слова: винтовая форма электрической дуги; численное моделирование, влияние сеточного шага.

Введение. Электрическая дуга во внешнем магнитном поле широко используется в научных исследованиях и технологических процессах [1–3]. Из опыта известно, что в однородном внешнем аксиальном магнитном поле (ВАМП) протяженная электрическая дуга может терять цилиндрическую устойчивость и принимать винтовую пространственную форму [4–6]. Такие режимы горения дуги во внешнем аксиальном магнитном поле имеют прикладное значение и вызывают научный интерес [7–10]. В частности, в теоретических работах [11–14] в рамках нестационарной трехмерной математической модели в приближении частичного локального термодинамического равновесия плазмы предложен алгоритм численной реализации винтовой формы электрической дуги. Указанный алгоритм основан на применении в итерационном процессе схемного аналога флуктуаций температуры электронов.

Вместе с тем известно, что численные методы обладают рядом особенностей по сравнению с аналитическими методами решения дифференциальных уравнений. Так, например, результаты расчета могут зависеть от величины сеточного шага [15–18].

В этой связи необходимо провести тестирование алгоритма и исследовать влияние сеточного шага на формирование винтовой формы электрической дуги.

В настоящей работе приведены результаты тестирования алгоритма [11–14] при значениях сеточного шага $\Delta = 0,2$ и $0,1$ мм. Следует показать, что винтовая форма дуги может быть получена не только при значении $\Delta=0,5$ мм [11–14], но и при меньших

значениях $\Delta=0,1$ и $0,2$ мм. При этом не обязательно решать одну и ту же краевую задачу с одинаковыми внешними параметрами. Важен сам факт численной реализации винтовой формы дуги при значениях $\Delta=0,2$ мм и $\Delta=0,1$ мм.

Математическая модель и метод численного решения уравнений. Граничные условия. Рассматривается открытая электрическая дуга постоянной силы тока I , межэлектродным расстоянием L , горящая в аргоне при давлении 1 атм. На дугу накладывается внешнее однородное аксиальное магнитное поле H^{Ext} .

Нестационарная трехмерная система МГД-уравнений электрической дуги в приближении модели частичного локального термодинамического равновесия плазмы может быть записана следующими уравнениями [2, 11]:

уравнение непрерывности газа тяжелых частиц

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V}) = 0, \quad (1)$$

уравнение непрерывности газа электронов

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + \text{div}(N_e \mathbf{V}_e) = R_e, \quad (2)$$

уравнение баланса энергии газа электронов

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{3}{2} k T_e N_e \right) + \text{div} \left(\frac{5}{2} k T_e N_e \mathbf{V}_e \right) = \text{div}(\lambda_e \text{grad} T_e) + \mathbf{j}^2 / \sigma - \psi - B(T_e - T) - U_i R_e, \quad (3)$$

уравнение баланса энергии газа тяжелых частиц

$$\frac{\partial}{\partial t} \frac{3}{2} k T (N_i + N_a) + \text{div} \left(\frac{5}{2} k T (N_i + N_a) \mathbf{V} \right) = [\text{div}(\lambda \text{grad} T) + B(T_e - T)], \quad (4)$$

уравнение баланса импульса газа вдоль осей координат x, y, z

$$\frac{\partial \rho u}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V} u) = \text{div}(\mu \text{grad} u) - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{H})_x + s_x + (\rho - \rho_\infty) \mathbf{g}, \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho v}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V} v) = \text{div}(\mu \text{grad} v) - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{H})_y + s_y, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \rho w}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{V} w) = \text{div}(\mu \text{grad} w) - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{H})_z + s_z, \quad (7)$$

уравнения Максвелла

$$\text{rot } \mathbf{E} = 0, \quad \text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}, \quad \text{div } \mathbf{H} = 0, \quad (8)$$

закон Ома в обобщенной форме

$$\mu_0 (\mathbf{V}_e \times \mathbf{H}) + \mathbf{E} = \mathbf{j} / \sigma + (\mu_0 (\mathbf{j} \times \mathbf{H}) - \text{grad } P_e) / q_e N_e, \quad (9)$$

закон Дальтона

$$P / k T = N_i + N_a + N_e T_e / T. \quad (10)$$

Принято, что дуговая плазма аргона атмосферного давления является однократно ионизованной, квазинейтральной, течение ламинарное, дозвуковое, излучение объемное; вязкой диссипацией энергии пренебрегается, приэлектродные процессы не рассматриваются. В уравнениях (1–10) использованы общепринятые обозначения.

Электромагнитная часть задачи решается в переменных φ, \mathbf{A} , где φ – скалярный потенциал электрического поля $\mathbf{E} = -\text{grad}\varphi$, \mathbf{A} – векторный потенциал магнитного поля, связанный с \mathbf{H} соотношением $\text{rot}\mathbf{A}=\mathbf{H}$.

Коэффициенты переноса и теплофизические свойства неравновесной аргоновой плазмы рассчитываются в соответствии с методикой [2].

Систему уравнений (1–10) путём преобразований можно представить в виде обобщенного дифференциального уравнения [17]. Численное решение обобщенного уравнения проводим методом контрольного объема на основе конечных разностей. Используется неявная разностная схема, динамические переменные (скорость и давление) рассчитываются по алгоритму SIMPLE'R [17]. Полученная система алгебраических уравнений решена итерационным методом Зейделя–Гаусса.

Для рассчитываемых переменных граничные условия являются аналогичными [13, 14] и задаются по периметру прямоугольной расчетной области, показанной на рисунке 1. Начальные условия задаются в некоторый условный момент времени $t = 0$.

На внешних границах $ABCD, EFGH, DHGC, AEFB, AEHD$ и $BFGC$ расчетной области значения температуры и концентрации электронов равны значениям температуры T_e^{\min} и концентрации N_e^{\min} «холодного» не ионизованного газа: $T_e = T_e^{\min} = 3$ кК, $N_e = N_e^{\min} = 10^{17} \text{ м}^{-3}$. Температура тяжелых частиц принята равной температуре холодного газа $T = 300$ К. При отсутствии электрического тока потенциал электрического поля φ рассчитывается из условия $\partial\varphi/\partial\mathbf{n} = 0$, где \mathbf{n} – нормаль к поверхности границы. Отметим, что в математической модели направлением электрического тока является направление движения электронов от катода к аноду.

На внешней токоведущей торцевой поверхности катода S_c и анода S_a потенциал электрического поля φ рассчитывается из условия протекания электрического тока I по нормали к поверхности. Такое же условие используется для φ на границе «катод–плазма». Вне катода и анода электрический ток отсутствует.

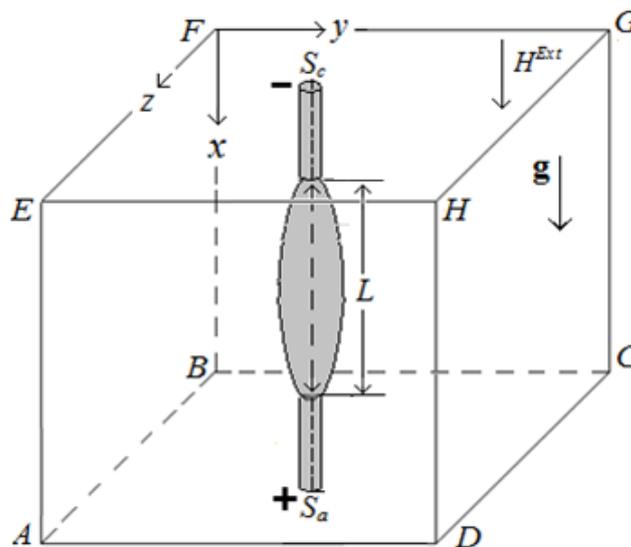


Рис. 1. Схема расчетной области в декартовых координатах (x, y, z) .
Пунктирная линия - - - центральная ось дуги.

Компоненты векторного потенциала A_x, A_y, A_z магнитного поля определяются из условия равенства нулю первой производной $\partial \mathbf{A} / \partial \mathbf{n} = 0$ по нормали к границе.

Давление P полагается равным относительному значению $P = 1$ Па. Компоненты скорости u, v, w определяются из условия равенства нулю $\partial^2 \mathbf{V} / \partial \mathbf{n}^2 = 0$.

В начальный момент между электродами задаётся высокотемпературная ($T = 9$ кК) зона с неподвижным газом в форме цилиндра.

Как отмечалось выше, для численного моделирования винтовой формы дуги во внешнем аксиальном магнитном поле в вычислительный алгоритм дополнительно вводится схемный аналог флуктуаций температуры электронов. Схемный аналог флуктуаций является искусственным приемом, который генерирует случайным образом асимметрию распределения температуры электронов. Как следствие, возникает асимметрия распределения других характеристик дуги.

Сущность схемного аналога флуктуаций состоит в следующем. Рассмотрим фрагмент разностной сетки, который показан на рисунке 2. Пусть в процессе вычислений в какой-либо узловой точке с индексами (i, j, k) температура электронов T_e оказывается меньше температуры электропроводности плазмы T_σ , т.е. выполняется условие $T_e < T_\sigma$. Тогда в этом случае температура электронов в данной узловой точке (i, j, k) и прилегающих к ней четырех соседних узловых точках с индексами $(i, j-1, k); (i, j+1, k); (i, j, k-1); (i, j, k+1)$ приравнивается минимальному значению $T_e = T_e^{\min}$. В противном случае при выполнении условия $T_e \geq T_\sigma$ вновь рассчитанное значение T_e в узловой точке с индексами (i, j, k) сохраняется неизменным. Проверка проводится только для узловых точек в плоскости $y - z$. В аксиальном направлении по оси $x(i)$ проверка указанного выше условия не проводится.

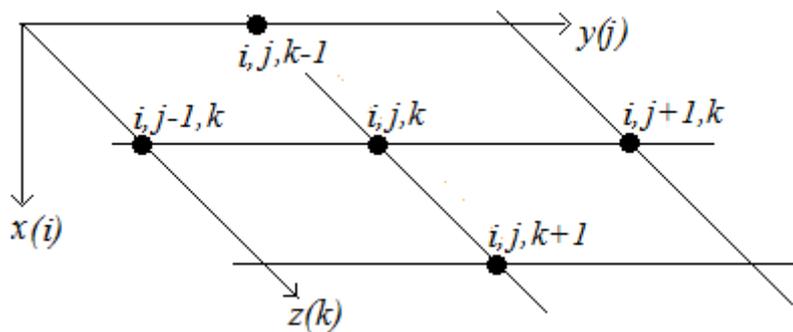


Рис. 2. Фрагмент разностной сетки в направлениях осей координат $y(j)$ и $z(k)$

Численное значение T_σ задается близким к реальному значению для плазмы аргона атмосферного давления и принято равным $T_\sigma = 3,5$ кК (см. [2]).

Таким образом, для каждой узловой точки схемный аналог флуктуаций температуры электронов дуговой плазмы определяется следующими условиями:

$$\begin{cases} \text{если } T_e < T_\sigma & \text{тогда } T_e = T_e^{\min} \\ \text{если } T_e \geq T_\sigma & \text{тогда } T_e = T_e \end{cases} \quad (11)$$

Условия (11) проверяются на каждой итерации на протяжении всего численного расчета. Физический смысл схемного аналога флуктуаций является достаточно ясным: вблизи токопроводящей границы дуги в отдельных узловых точках расчетной области случайным

образом температура электронов уменьшается на величину $\Delta T = T_{\sigma} - T_e^{\min} = 0,5$ кК. Детальное описание схемного аналога флуктуаций приведено в [11–14].

Анализ результатов расчета. Сеточный шаг $\Delta = 0,2$ мм. Выполнен расчет открытой электрической дуги силой тока $I = 20$ А и межэлектродным расстоянием $L = 20$ мм, горящей в однородном внешнем аксиальном магнитном поле с $H^{Ext} = 15$ кА/м (рис.1). Дуга горит между электродами из графита с торцевой токоведущей поверхностью диаметром $d = 0,4$ мм. Сеточный шаг по координатам (x, y, z) одинаковый и равен $\Delta = \Delta x = \Delta y = \Delta z = 0,2$ мм, временной шаг равен $\tau = 10^{-4}$ с.

С начала процесса вычислений до выхода расчетных характеристик дуги на стационарное распределение к моменту времени $t = 25$ мс численный расчет выполняется без внешнего магнитного поля, т.е. принято $H^{Ext} = 0$. Затем, начиная с момента времени $t = 25$ мс задается внешнее аксиальное магнитное поле величиной $H^{Ext} = 15$ кА/м. На рисунке 3 показана эволюция пространственной формы столба дуги на начальном интервале времени $\Delta t = 27 \div 30$ мс при наложении ВАМП. Видно, что уже через несколько секунд столб дуги теряет устойчивость и принимает винтовую форму.

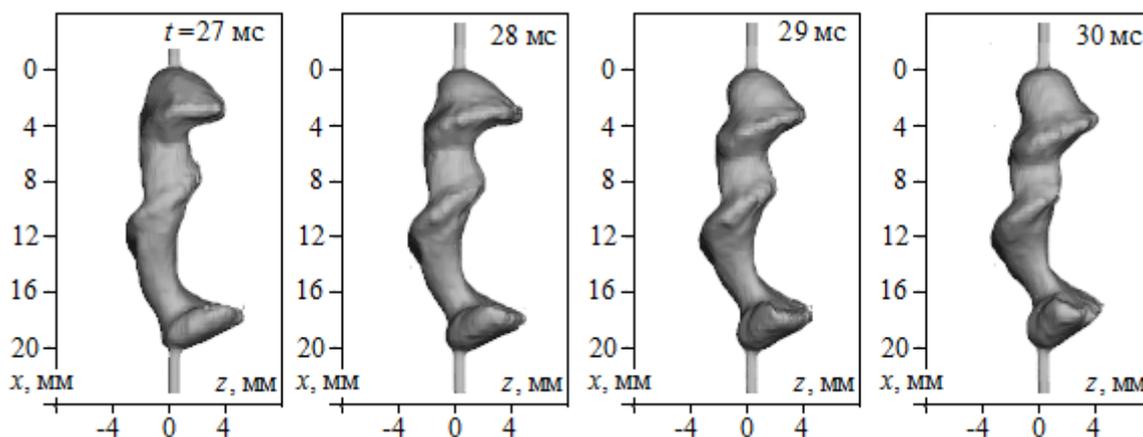


Рис. 3. Эволюция формы столба дуги на интервале времени $\Delta t = 27 \div 30$ мс.

$$\Delta = 0.2 \text{ мм}, L = 20 \text{ мм}, I = 20 \text{ А}, H^{Ext} = 15 \text{ кА/м}$$

Сеточный шаг $\Delta = 0,1$ мм. Выполнен расчет открытой электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле при значении сеточного шага $\Delta = 0.1$ мм и внешних параметрах разряда $I = 15$ А, $L = 10$ мм, $H^{Ext} = 15$ кА/м. Дуга горит между графитовыми электродами диаметром $d = 0,4$ мм с торцевой токоведущей поверхностью. На рисунке 4 приведена расчётная эволюция пространственной формы столба дуги на интервале времени $\Delta t = 50 \div 53$ мс. Численное решение показывает, что при значении сеточного шага $\Delta = 0.1$ мм столб дуги также теряет устойчивость и принимает винтовую форму.

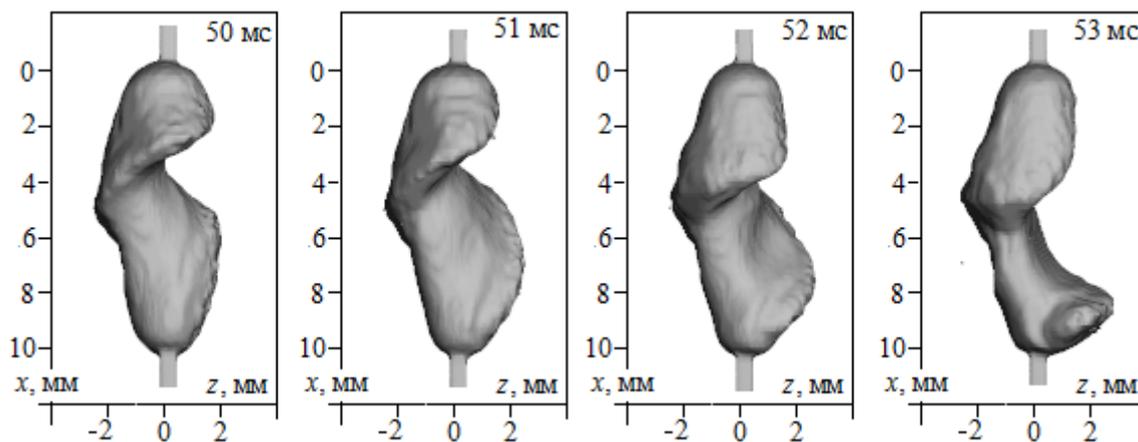


Рис. 4. Эволюция формы столба дуги на интервале времени $\Delta t = 50 \div 53$ мс.

$$\Delta = 0.1 \text{ мм}, L = 10 \text{ мм}, I = 15 \text{ А}, H^{Ext} = 15 \text{ кА/м}$$

Заключение. Выполнен расчёт открытой электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле при различных значениях сеточного шага $\Delta = 0,1$ и $0,2$ мм. Для обоих значений сеточного шага $\Delta = 0,1$ и $0,2$ мм численно реализована винтовая форма электрической дуги. Установлено, что численная реализация винтовой формы дуги не зависит от величины сеточного шага. Винтовая форма дуги формируется в результате воздействия именно схемного аналога флуктуаций температуры электронов дуговой плазмы.

Список литературы

1. Финкельбург В., Меккер Г. Электрические дуги и термическая плазма. – М.: Иностран. лит., 1961. – 370 с.
2. Энгельшт В.С., Гурович В.Ц., Десятков Г.А. и др. Низкотемпературная плазма. –Т.1.– Теория столба электрической дуги. – Новосибирск: Наука, 1990. – 374 с.
3. Лебедев А.Д., Урюков Б.А., Энгельшт В.С. и др. Низкотемпературная плазма. Т. 7. Сильноточный дуговой разряд в магнитном поле. – Новосибирск: Наука, 1992. – 267 с.
4. Новиков О.Я. Устойчивость электрической дуги. – Л.: Энергия, 1978. – 160 с.
5. Недоспасов А.В. Токово-конвективная неустойчивость газоразрядной плазмы // УФН. This game requires at least Shader Model 3.0 . – 1975. – N.16. – №4. – С.643– 661.
6. Ментель Ю. Магнитная неустойчивость электрической дуги // Теория электрической дуги в условиях вынужденного теплообмена. – Новосибирск: Наука, 1977. – 182 с.
7. Асиновский Э.И., Кузьмин А.К., Пахомов Е.П. Измерение геометрических параметров винтовой дуги // ТВТ. – 1980. – Т. 18. № 1. – С. 9–18.
8. Синкевич О.А. Нелинейная теория винтовой неустойчивости электрической дуги во внешнем магнитном поле // ДАН. 1985. – Т. 280. – № 1. – С. 99–101.
9. Sinkevich O.A. Instabilities, waves, and nonequilibrium structures in a dense low-frequency plasma, High Temperature, 2013. – V. 51. № 3. – P. 306.
10. Глинов А. П., Головин А. П., Шалеев К. В. Влияние внешнего магнитного поля на устойчивость протяженного дугового разряда и формирование многоканальных токовых структур // Прикладная физика. – 2018. – № 2.– С. 21– 28.

11. Урусов Р.М., Урусова И.Р. Численное моделирование винтовой формы электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле // Теплофизика высоких температур. – 2017. – Т. 55. – № 5. – С. 661– 668.
12. I.R. Urusova, T.E Urusova «Evolution of space open electric arc burning in the external axial magnetic field», *Physics of Plasmas* 25, 063511 (2018).
13. Урусов Р.М., Урусова И.Р. О механизмах формирования винтовой формы электрической дуги во внешнем аксиальном магнитном поле // Теплофизика высоких температур. – 2019. – Т. 57.– № 3. – С. 328– 337.
14. R. M. Urusov and I. R. Urusova Shunting the electric arc helical spiral turns (numerical simulation) // *Phys. Plasmas* 27, 103510 (2020).
15. Роуч П. Вычислительная гидродинамика. – М.: Мир,1980. – 616 с.
16. Самарский А.А. Теория разностных схем. – М.: 1983. – 616 с.
17. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 146 с.
18. Пасконов В.М., Полежаев В.И., Чудов Л.А. Численное моделирование процессов тепломассообмена. – М.: Наука, 1984. – 288 с.
19. Урусова И.Р. Численный эксперимент шунтирования витков спирали электрической дуги винтовой формы // Проблемы автоматки и управления. – 2019. – № 1 (36). – С. 72– 76.

УДК 517.518.12:621.315.146:504.6

Ч.М. Бузурманкулова, chbuzurmankulova@mail.ru

*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
Бишкек, Кыргызстан*

ЧИСЛЕННОЕ ИНТЕГРИРОВАНИЕ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО УРАВНЕНИЯ ПЕРЕГРЕВА ЖИЛ ТОКОПРОВОДОВ ОТНОСИТЕЛЬНО ТЕМПЕРАТУРЫ ОКРУЖАЮЩЕГО МИРА В СРЕДЕ LABVIEW

Рассмотрен виртуальный прибор (ВП), разработанный в среде LabVIEW. ВП позволяет численно интегрировать нелинейное неоднородное дифференциальное уравнение перегрева жил токопроводов относительно температуры окружающей среды. Результатом интегрирования является график, характеризующий изменение во времени температуры перегрева токопровода относительно окружающей среды, который может быть использован в расчетах нагрузки для оценки эффекта нагрева токопровода. Отмечено, что LabVIEW-программа в комплексе с соответствующими аппаратными средствами позволяет разрабатывать системы измерения, контроля, диагностики и управления экспериментом практически любой сложности. С учетом вышесказанного показаны возможности дальнейшего расширения функциональной возможности разработанного ВП.

Ключевые слова: LabVIEW; виртуальный прибор; численное интегрирование; уравнение перегрева токопровода; компьютерное моделирование.

Введение

Теплота, выделяющаяся в токопроводе при протекании по нему тока I , пропорциональна потерям активной мощности. График $\vartheta(t)$, характеризующий изменение во времени температуры перегрева токопровода относительно окружающих условий, используется в расчетах нагрузки для оценки эффекта его нагрева. Этот график является результатом интегрирования в общем случае довольно сложного нелинейного дифференциального уравнения [1].

Постановка задачи

Приближенное уравнение для определения $\vartheta(t)$ представляется выражением [2]:

$$\tau \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta = \vartheta_{ж.н} \left(\frac{I}{I_n} \right)^2, \quad (1)$$

где τ – реальная постоянная нагрева токопровода; ϑ – температура перегрева токопровода; $\vartheta_{ж.н}$ – максимально допустимая температура жил; I – ток нагрузки; I_n – длительно допустимый ток токопровода.

В этом уравнении не учтена зависимость от температуры сопротивления и постоянного нагрева токопровода.

Более точное уравнение, учитывающее выше отмеченную зависимость, имеет вид [3]:

$$\tau(\vartheta) \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta = K_R(\vartheta) \vartheta_{ж.н} \left(\frac{I}{I_H} \right)^2, \quad (2)$$

где

$$\tau(\vartheta) = \frac{\tau_0}{1 + 0,3 \left(1 - \frac{\vartheta}{\vartheta_{ж.н}} \right)}; \quad (3)$$

τ_0 – значение постоянной нагрева при длительно допустимой температуре жил $\vartheta_{ж.н}$:

$$K_R(\vartheta) = 1 + \alpha \cdot \vartheta; \quad (4)$$

α – температурный коэффициент сопротивления токопровода.

Уравнение (2), являющееся нелинейным дифференциальным уравнением нагрева, не имеет аналитического решения.

В [4, 5] разработан специальный автомат для выбора токоведущего элемента системы электроснабжения по нагреву, который интегрирует уравнение (2) методом конечных приращений. Автомат представляет собой физическое устройство, состоящее из множества различных функциональных подсистем, имеющих тенденцию со временем физически и морально устаревать.

В настоящее время компьютерное моделирование стало основным инструментом различного рода исследований [6] [8], который позволяет просчитать разные режимы работы электротехнического устройства и дает возможность учитывать сколь угодно большое количество факторов, обеспечивая тем самым полный контроль влияния всех входных параметров на результат, что не всегда возможно реализовать с помощью автомата. Учитывая вышесказанное, в данной работе поставлена задача: на основе *технологии виртуальных приборов* разработать в среде LabVIEW виртуальный инструмент для численного интегрирования дифференциального уравнения перегрева (2) жил токопроводов относительно температуры окружающего мира, позволяющий произвести выбор токоведущих элементов по нагреву. При этом LabVIEW-программа в комплексе с соответствующими аппаратными средствами позволяет разрабатывать системы измерения, контроля, диагностики и управления практически любой сложности.

Разработка виртуального прибора

Для удобства построения структурной схемы модели, описывающей перегрев проводника относительно окружающего мира, выполним некоторые математические преобразования уравнения (2).

Решив (2) относительно производной, получим:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = \frac{K_R(\vartheta)}{\tau(\vartheta)} \cdot \vartheta_{ж.н} \cdot \left(\frac{I}{I_H} \right)^2 - \frac{1}{\tau(\vartheta)} \cdot \vartheta. \quad (5)$$

Используя выражения (3) и (4), преобразуем коэффициенты в правой части уравнения (5).

$$\begin{aligned} \frac{K_R(\vartheta)}{\tau(\vartheta)} &= \frac{(1 + \alpha \cdot \vartheta)}{\tau_0} = \frac{(1 + \alpha \cdot \vartheta) \left[1 + 0,3 \left(1 - \frac{\vartheta}{\vartheta_{ж.н}} \right) \right]}{\tau_0} = \\ &= \frac{1,3 + 1,3 \cdot \alpha \cdot \vartheta - 0,3 \cdot \frac{\vartheta}{\vartheta_{ж.н}} - 0,3 \cdot \alpha \cdot \frac{\vartheta^2}{\vartheta_{ж.н}}}{\tau_0} = \\ &= \frac{1,3}{\tau_0} + \frac{1,3 \cdot \alpha \cdot \vartheta}{\tau_0} - \frac{0,3}{\tau_0} \cdot \frac{\vartheta}{\vartheta_{ж.н}} - \frac{0,3 \cdot \alpha}{\tau_0} \cdot \frac{\vartheta^2}{\vartheta_{ж.н}}. \end{aligned} \quad (6)$$

$$\frac{1}{\tau(\vartheta)} = \frac{1 + 0,3 \left(1 - \frac{\vartheta}{\vartheta_{ж.н}} \right)}{\tau_0} = \frac{1,3 \cdot \vartheta - 0,3 \cdot \frac{\vartheta^2}{\vartheta_{ж.н}}}{\tau_0}. \quad (7)$$

Подставив (6) и (7) в (5) и выполнив необходимые математические операции над полученными выражениями, имеем:

$$\begin{aligned} \frac{d\vartheta}{dt} &= \frac{1,3}{\tau_0} \cdot \vartheta_{ж.н} \cdot \left(\frac{I}{I_H} \right)^2 + \left[\left(\frac{1,3}{\tau_0} \cdot \vartheta_{ж.н} \cdot \alpha - \frac{0,3}{\tau_0} \right) \cdot \left(\frac{I}{I_H} \right)^2 - \frac{1,3}{\tau_0} \right] \cdot \vartheta - \\ &- \left[\frac{0,3}{\tau_0} \cdot \alpha \cdot \left(\frac{I}{I_H} \right)^2 + \frac{0,3}{\tau_0} \cdot \frac{1}{\vartheta_{ж.н}} \right] \cdot \vartheta^2. \end{aligned} \quad (8)$$

В выражении (8), введя обозначения

$$\frac{1,3}{\tau_0} \cdot \vartheta_{ж.н} = k_1, \quad \frac{0,3}{\tau_0} = k_2, \quad \frac{1,3}{\tau_0} = k_3,$$

получим нелинейное дифференциальное уравнение:

$$\begin{aligned} \frac{d\vartheta}{dt} &= k_1 \cdot \left(\frac{I}{I_H} \right)^2 + \left[(k_1 \cdot \alpha - k_2) \cdot \left(\frac{I}{I_H} \right)^2 - k_3 \right] \cdot \vartheta - \\ &- \left[k_2 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{I}{I_H} \right)^2 + k_2 \cdot \frac{1}{\vartheta_{ж.н}} \right] \cdot \vartheta^2. \end{aligned} \quad (9)$$

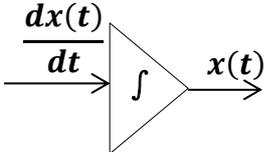
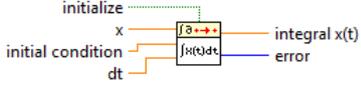
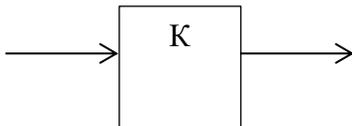
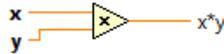
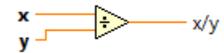
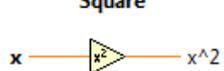
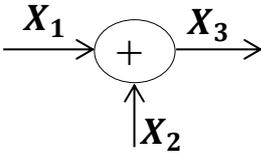
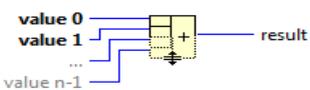
Раскрыв скобки, получим выражение, удобное для построения в среде LabVIEW виртуального прибора:

$$\frac{d\vartheta}{dt} = k_1 \cdot \left(\frac{I}{I_H} \right)^2 + k_1 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{I}{I_H} \right)^2 \cdot \vartheta - k_2 \cdot \left(\frac{I}{I_H} \right)^2 \cdot \vartheta - k_3 \cdot \vartheta - \left[k_2 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{I}{I_H} \right)^2 + k_2 \cdot \frac{1}{\vartheta_{ж.н}} \right] \cdot \vartheta^2 \quad (10)$$

$$-k_2 \cdot \alpha \cdot \left(\frac{I}{I_H}\right)^2 \cdot \vartheta^2 - k_2 \cdot \frac{1}{\vartheta_{ж.н}} \cdot \vartheta^2.$$

Динамические системы любой природы в LabVIEW моделируются аналогично моделированию систем на аналоговых вычислительных машинах (АВМ), выполненных на операционных усилителях. В таких машинах перед моделированием вначале разрабатывалась электрическая модель системы в виде структурной схемы. В LabVIEW аналогом такой структурной схемы по существу является блок-диаграмма виртуального прибора. Основными элементами структурных схем на АВМ являются интеграторы, блоки умножения и сумматоры, условные обозначения которых и соответствующие им реализации с помощью подпрограмм LabVIEW приведены в табл. 1.

Таблица 1. Обозначения элементов структурных схем

Вычислительная операция	Блок	Реализация в LabVIEW
Интегрирование		<p>NI_PtbyPt.lvlib:Integral x(t) PtByPt.vi</p>  <p>Performs the discrete integration on x. You must sample x at regular intervals of dt.</p>
Умножение		<p>Multiply</p>  <p>Divide</p>  <p>Square</p> 
Суммирование		<p>Compound Arithmetic</p> 

Блок-диаграмма прибора LabVIEW для решения уравнения (10) состоит из узлов суммирования, умножения, деления, возведения в квадрат и интегратора. Рассмотренный метод обеспечивает возможность исследования выходной величины $\vartheta(t)$ – температуры перегрева токопровода от времени. Передняя панель и блок-диаграмма виртуального прибора (рис.1,2) предназначены для численного интегрирования неоднородного нелинейного дифференциального уравнения.

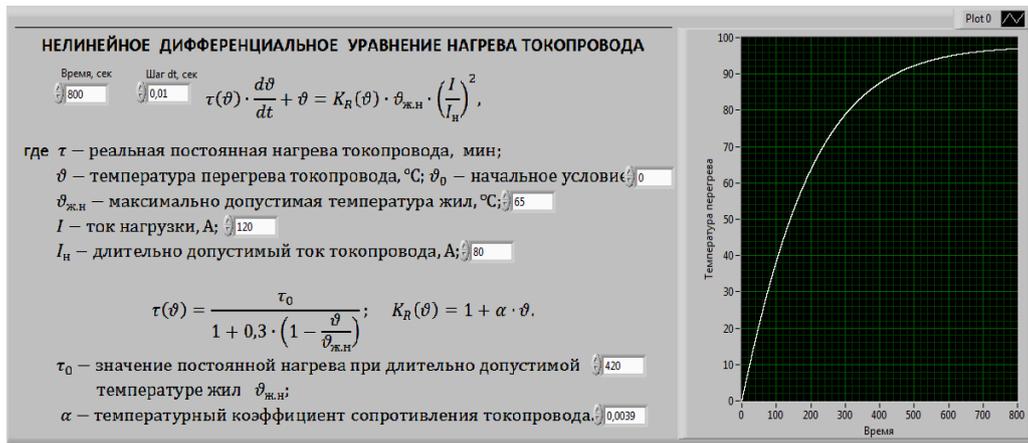


Рис.1. Передняя панель ВП

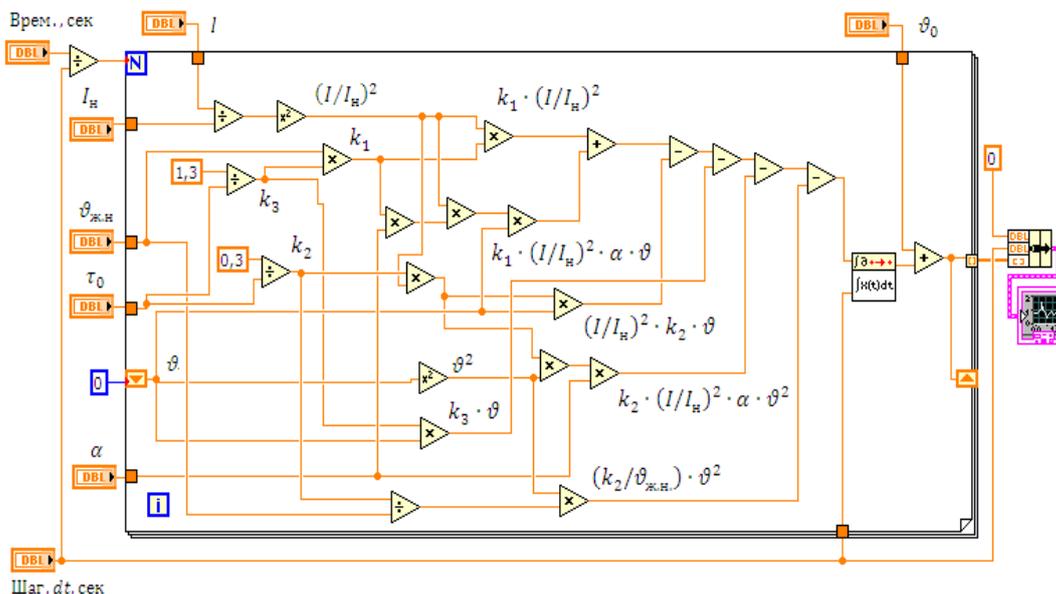


Рис. 2. Блок-диаграмма ВП

В блок-диаграмме для вычисления интеграла присутствует петля обратной связи, при этом для организации вычислительной процедуры используются сдвиговые регистры.

Сдвиговые регистры («Shift Registers») используются в циклах для передачи значения из предыдущей итерации цикла в следующую. Сдвиговый регистр можно включить в цикл, нажав правую кнопку мыши на его границе и в контекстном меню выбрать «Add Shift Register». При этом они появятся в виде пары терминалов и будут иметь такой вид



Расширение функциональной возможности виртуального прибора

Разработанный виртуальный прибор обеспечивает возможность исследования $\vartheta(t)$ – температуры перегрева токопровода от времени только при известных графиках нагрузки $I(t)$ электроприемников (ЭП). Для исследования температуры перегрева токопровода от протекающего по нему реального тока нагрузки $I(t)$ воспользуемся многофункциональным внешним модулем (DAQ модуль – сокращение от *Data Acquisition* = получение данных) для сбора данных типа USB 6009, подключаемым к компьютеру USB-кабелем (рис.3). Модуль имеет 8 аналоговых входов для измерения напряжения в диапазонах от ± 1 до ± 20 В, 2 аналоговых выхода, 12 комбинированных цифровых входов/выходов и вход счетчика.

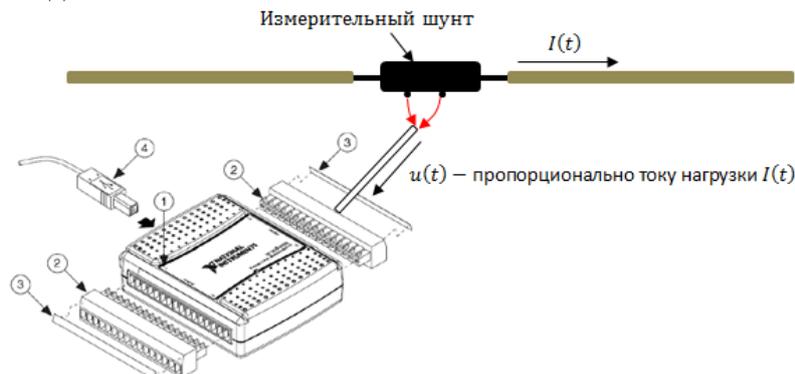


Рис.3. Измерительный модуль USB 6009: 1–DAQ модуль; 2 – клеммные колодки; 3 – этикетки с обозначением сигналов; 4 – USB- кабель

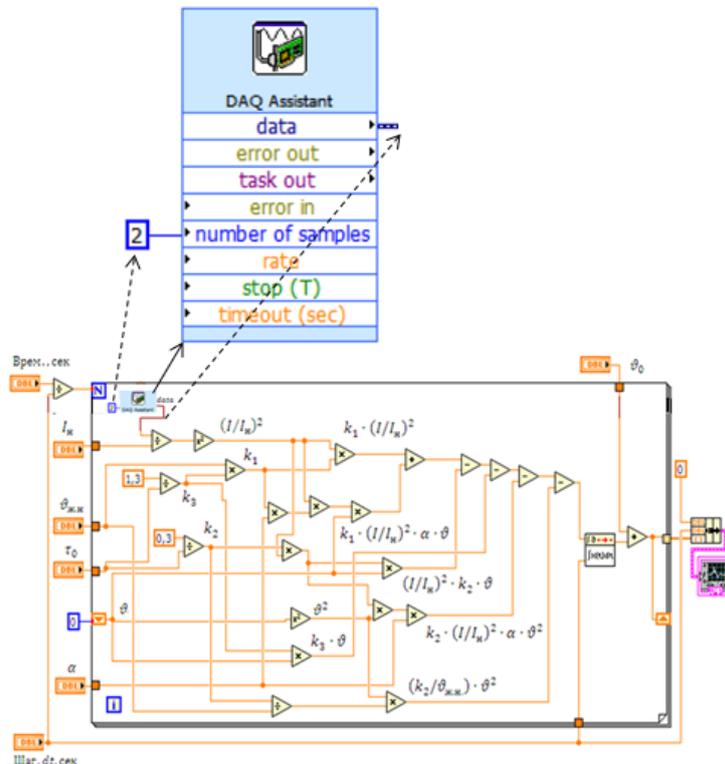


Рис. 4. Блок- диаграмма ВП с расширенными функциональными возможностями

Для программирования работы измерительных DAQ-модулей в системе LabVIEW имеется большой набор готовых ВП, выполняющих определенные группы операций по

обслуживанию DAQ-модулей [8, 9]. Однако стандартные задания, не требующие расширенных возможностей, можно чрезвычайно просто запрограммировать с помощью экспресс-ВП DAQ Assistant. Для его запуска нужно щелкнуть мышью по значку DAQ Assistant (находится в палитре Functions >> Express >> Input), а затем щелкнуть по свободному месту на блок-схеме, куда мы хотим поместить этот узел (рис.4).

В заключение отметим, что традиционно для исследователя разделены функции моделирования и экспериментирования. Моделирование осуществляется в среде математических программных пакетов, а эксперименты поддерживаются другими программными средствами, что отнюдь не повышает эффективность исследований. Эффективность использования среды LabVIEW в научных исследованиях состоит в том, что, оставаясь в ее рамках, можно разрабатывать как математическую модель объекта, так и снабжать эту модель экспериментальными данными с помощью аппаратных средств ввода-вывода, сопряженных с реальным объектом.

Учитывая вышесказанное, в данной работе решена задача разработки в среде LabVIEW виртуального прибора для численного интегрирования дифференциального уравнения перегрева жил токопроводов относительно температуры окружающей среды, позволяющего произвести выбор токоведущих элементов по нагреву. При этом LabVIEW-программа в комплексе с соответствующими аппаратными средствами позволяет разрабатывать системы измерения, контроля, диагностики и управления практически любой сложности.

Литература

1. Шидловский А.К. Расчеты электрических нагрузок систем электроснабжения промышленных предприятий / А.К. Шидловский, Г.Я. Вагин, Э.Г. Куренный. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 224 с.: ил.
2. Электрические нагрузки промышленных предприятий /С.Д. Волобринский, Г.М. Каяло, П.Н. Клейн и др. – Л.: Энергия, 1971. – 264 с.
3. Ермаков В.Ф. Исследование процессов в электрических сетях: методы, средства, детерминированные и вероятностные модели. – Ростов н/Д: Изд-во Рост. ун-та, 2003. – 288 с.
4. Ермаков В.Ф. Автомат для выбора токопроводов по нагреву // Промышленная энергетика, 1992. – № 7. – С. 30 – 32 .
5. Массов А.А., Козлов П.М., Кумаритов Б.Х., Кирилин И.В. Создание имитационной модели для выявления искажений форм кривых токов и напряжений в сетях рудников // Промышленная энергетика, 2011. – № 5. – С. 44– 49.
6. Бузурманкулова Ч.М., Кадиева А.К., Исакеева Э.Б., Дюшеева Ч.К., Абдыбаева Ж.К., Узагалиев З.А. Оценка влияния качества электроэнергии на потери мощности в элементах электрической сети на основе компьютерного моделирования // Проблемы автоматизации и управления, 2019. – № 2 (37). – С. 117–125.
7. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. – 288 с.: ил.
8. Моделирование в среде Labview: учебное пособие (лабораторный практикум) / Авт.-сост.: П.А. Звада, Д.С. Тучина. – Ставрополь: Изд-во СКФУ, 2019. – 130 с.
9. Магда Ю. С. LabVIEW: практический курс для инженеров и разработчиков. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 208 с.

УДК 519.6:533.7

*А.Дж. Картанова*¹, a.kartanova@mail.ru

*С.М. Сулайманова*², sulai@bk.ru

*А.Б. Абдрасакова*¹ aizada_abdrasakova@yahoo.com

¹Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н.Исанова, Бишкек, Кыргызстан

²Кыргызский национальный аграрный университет им. К.И.Скрябина, Бишкек, Кыргызстан

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕЧЕНИЯ СМЕСИ ГАЗА И ТВЕРДЫХ ЧАСТИЦ В КАНАЛЕ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ

Рассматривается задача двухфазного течения смеси газа и твердых частиц под давлением в сопловой насадке с целью определения физических закономерностей процесса течения, влияния входного давления и объемного содержания твердой фазы в смеси на износ сопла. Компьютерное моделирование процесса двухфазного течения смеси газа и твердых частиц в канале переменного сечения проводится в системе инженерных расчетов Ansys Fluent 15.0.

Ключевые слова: двухфазное течение, твердые частицы, гидроабразивная резка, износ сопла, компьютерная модель.

Введение. Для оптимального управления процессами в гидроустройствах и в гидроабразивных установках, в которых порождаются струи сверхвысокого давления, необходимо уметь моделировать эти процессы. Отметим, что из-за относительно высокого давления, используемого в количестве порядка $p \sim 400$ МПа, скорость струи соответственно становится довольно высокой. Твердые частицы, движущиеся с соответствующей высокой скоростью потока, производят касательное напряжение на стенки сопла. Это вызывает эрозию сопла, благодаря чему эффективный диаметр сопла может значительно изменяться, что приводит к уменьшению кинетической энергии выхода струи. Это не только отражается на долговечности сопла, но и на процессе обработки в виду уменьшения кинетической энергии струи.

С учетом этого аспекта необходимо исследовать не только влияние входного давления смеси газа и твердых частиц на износ стенки, но также влияние объемного содержания твердых частиц в смеси на физические закономерности параметров двухфазного течения в канале.

Методы и материалы. Численное моделирование проводится с использованием многофазной модели Эйлера. Для стационарного несжимаемого потока решаются дифференциальные уравнения в частных производных сохранения массы и количества движения. Связь скорости и давления осуществлялась через фазово-симметричный алгоритм SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure-Linked Equations), разработанный С.В. Патанкармом [1]. В качестве схемы решения или дискретизации модели были выбраны QUICK (Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics) схемы третьего порядка точности, которая применяется для ортогональных сеток и при высоком их

качестве позволяет получить дискретизации третьего порядка точности вдоль линии потока. Турбулентность моделируется с использованием Realizable k-ε – модели турбулентности для правильной сходимости решения [2].

Объемная доля каждой фазы рассчитывается из уравнения неразрывности (1) [3-5]:

$$\frac{1}{\rho_{rq}} \left(\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) \right) = \sum_{p=1}^N (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}), \quad (1)$$

ρ_{rq} – эталонная плотность фазы или усредненная объемная плотность q-й фазы в области решения кг/м³, ρ_q – плотность q-й фазы кг/м³, \vec{v}_q – скорость q-й фазы, α – объемная доля q-й фазы, \dot{m}_{pq} – массовый расход смеси м³/с характеризует перенос масс от p-й фазы к q-й фазе, и \dot{m}_{qp} характеризует перенос масс от фазы q к фазе p. Здесь нижние индексы обозначают p, q – фазы.

Уравнения движения (2) для твердой фазы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s \vec{v}_s) = & -\alpha_s \nabla p - \nabla p_s + \nabla \cdot \tau_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \\ & + \sum_{l=1}^N [k_{ls} (\vec{v}_l - \vec{v}_s) + (\dot{m}_{ls} \vec{v}_{ls} - \dot{m}_{sl} \vec{v}_{sl})] + (\vec{F}_s + \vec{F}_{\text{lift},s} + \vec{F}_{\text{vm},s}). \end{aligned} \quad (2)$$

Индексы l – жидкая (liquid) фаза и s – твердая (solid) фаза, g – гравитационные силы, F_{Lift} – подъемная сила, – внешняя сила, F_{vm} – виртуальная массовая сила, p – общее давление фаз, τ_q – фазовый тензор напряжений q-й фазы, p_s – давление s-твердой фазы, $k_{ls}=k_{sl}$ – коэффициент обмена между l - жидкой и s - твердой фазами, N – общее число фаз.

$$\tau_q = \alpha_q \mu_q (\nabla \vec{v}_q + \nabla \vec{v}_q^T) + \alpha_q \left(\lambda_q - \frac{2}{3} \mu_q \right) \nabla \cdot \vec{v}_q \vec{I},$$

μ_q и λ_q – коэффициенты вязкости q-й фазы, $\nabla \vec{v}_q$ – градиент векторов скорости q-й фазы.

Уравнение движения (3) для жидкой фазы:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q \vec{v}_q^2) = & -\alpha_q \nabla p + \nabla \cdot \tau_q + \alpha_q \rho_q \vec{g} + \\ & + \sum_{l=1}^N \left[k_{pq} (\vec{v}_p - \vec{v}_q) + \left(\dot{m}_{pq} \vec{v}_{pq} - \dot{m}_{qp} \vec{v}_{qp} \right) \right] + (\vec{F}_q + \vec{F}_{\text{lift},q} + \vec{F}_{\text{vm},q}), \end{aligned} \quad (3)$$

\vec{v}_{pq} – межфазная скорость, определяемая следующим образом. Если $\dot{m}_{pq} > 0$ (то есть масса p фазы переносится на q фазу) $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_p$; если $\dot{m}_{pq} < 0$ (то есть масса q фазы переносится на p фазу) $\vec{v}_{pq} = \vec{v}_q$. Аналогично, если $\dot{m}_{qp} > 0$ тогда $\vec{v}_{qp} = \vec{v}_q$, если $\dot{m}_{qp} < 0$ тогда $\vec{v}_{qp} = \vec{v}_p$, k_{pq} – коэффициент межфазного взаимодействия.

При моделировании турбулентности течения используем модель турбулентности смеси. Уравнения для вычисления к– кинетической энергии турбулентности (4) и ε - скорости диссипации кинетической энергии (5):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m k) = \nabla \cdot \left(\left(\mu_m + \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + G_{k,m} - \rho_m \varepsilon + \Pi_{k,m}, \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \varepsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \bar{v}_m \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\left(\mu_m + \frac{\mu_{t,m}}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{1\varepsilon} G_{k,m} - C_{2\varepsilon} \rho_m \varepsilon) + \Pi_{\varepsilon,m}, \quad (5)$$

ρ_m – плотность смеси, μ_m – молекулярная вязкость, \bar{v}_m – скорость, которые вычисляются из формулы (6), модельные константы $C_{1\varepsilon}=1.44$, $C_{2\varepsilon}=1.92$, $C_\mu=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_\varepsilon=1.3$.

$$\rho_m = \sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i, \quad \mu_m = \sum_{i=1}^N \alpha_i \mu_i, \quad \bar{v}_m = \frac{\sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i \bar{v}_i}{\sum_{i=1}^N \alpha_i \rho_i}, \quad (6)$$

α_i , ρ_i , μ_i , и \bar{v}_i – объемная доля, плотность, вязкость и скорость i -й фазы соответственно.

Турбулентная вязкость $\mu_{t,m}$ смеси вычисляется из формулы (7):

$$\mu_{t,m} = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}. \quad (7)$$

Производство кинетической энергии турбулентности $G_{k,m}$ вычисляется из формулы (8):

$$G_{k,m} = \mu_{t,m} \left(\nabla \bar{v}_m + (\nabla \bar{v}_m)^T \right) : \nabla \bar{v}_m \quad (8)$$

В моделях турбулентности смеси включены параметры $\Pi_{k,m}$ и $\Pi_{\varepsilon,m}$ турбулентного взаимодействия между диспергированной фазой и непрерывной фазой модели Троско-Хасана [6]:

$$\Pi_{k,m} = C_{ke} \sum_{p=1}^M K_{pq} |\bar{U}_p - \bar{U}_q|^2$$

$$\Pi_{\varepsilon,m} = C_{td} \frac{1}{\tau_p} \Pi_{k,m}$$

$C_{ke} = 0.75$, $C_{td} = 0.45$ – коэффициенты модели, $\tau_p = \frac{2C_{vm}d_p}{3C_D|\bar{U}_p - \bar{U}_q|}$ – время индуцированной турбулентности, C_{vm} – коэффициент виртуальной массы, C_D – коэффициент сопротивления.

Частицы имеют сферическую форму и равномерно распределены в суспензионной смеси. Уравнения сохранения массы, количества движения и энергии решаются методом

контрольного объема. Сходимость вычислительного процесса считается достигнутым и решение найденным, если на шаге дискретизации максимальное значение невязки будет меньше, чем $1.0E-3$ на весь контрольный объем в вычислительной области.

Рассмотрим стационарное двухфазное течение газа и твердых частиц в канале переменного сечения в двумерной постановке. Геометрия области течения состоит из сопла, как показано на рис.1. На входе в сопло подается смесь жидкости и твердых частиц под давлением.

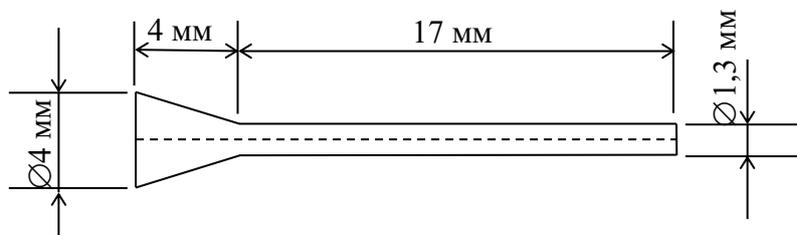


Рис. 1. Размеры расчетной области

Основываясь на экспериментальных наблюдениях по двухфазному течению смеси газа и твердых частиц, сделаны следующие ограничения задачи.

- 1) Жидкость является сплошной средой и несжимаемой.
- 2) Двухфазное течение рассматривается как смесь, в которой вода является жидкой фазой, а твердые частицы равного диаметра составляют твердую фазу, но хорошо смешиваются с жидкой фазой.
- 3) Между двумя фазами нет массового переноса.
- 4) Двухфазное течение стационарно и обладает турбулентными характеристиками потока.

Компьютерное моделирование процесса двухфазного течения смеси газа и твердых частиц в канале переменного сечения проводим в системе инженерных расчетов Ansys Fluent 15.0 [7].

В соответствии со структурой характеристики сопла и течения область вычисления строим как осесимметричную модель. На рис. 2. и рис. 3. изображена область вычисления. Для построения сеточной модели расчетной области использовали структурированную сетку, состоящую из 26071 ячеек типа Quad – четырехугольные элементы, которая позволяет получить более точные результаты.

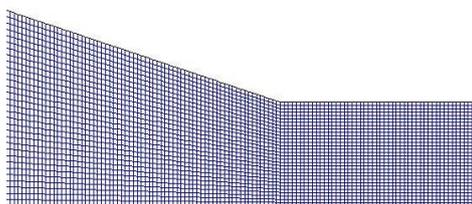


Рис. 2. Сеточная модель

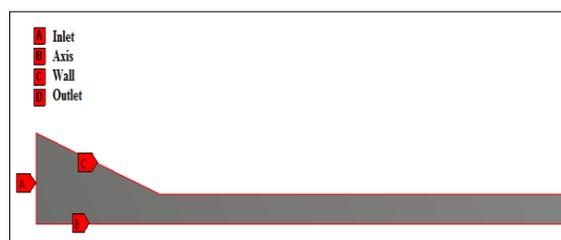


Рис. 3. Границы области

Задаем граничные условия в соответствии с расчетной областью и физическими свойствами процесса. Граничное условие на входе было определено как условие полного давления (pressure-inlet) $P=40$ МПа. Определим дополнительные граничные условия

турбулентности на входе: задаем масштаб турбулентности и гидравлический диаметр Turbulent Intensity=5%, Hydraulic diameter=0.004 м.

Граничное условие на выходе (pressure-outlet): статическое давление течения принимаем равным нулю, так что вычисление даст относительные перепады давления для всей области потока. Определим дополнительные граничные условия турбулентности на выходе: задаем масштаб турбулентности и гидравлический диаметр Turbulent Intensity=5%, Hydraulic diameter=0.0013 м.

В моделях вязкого течения на стенке компоненты скорости были установлены на ноль в соответствии с условиями отсутствия скольжения и герметичности. Одним из основных граничных условий при интегрировании является условие «прилипания», т.е. равенство нулю скорости жидкости на стенке.

При численном моделировании течения смеси газа и твердых частиц задаем две фазы, где вода рассматривается как несущая фаза – жидкая фаза I, а песок граната как твердые частицы – твердая фаза II. Входные параметры материалов двух фаз, используемые в анализе, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Входные параметры материалов для моделирования

№	Параметры	Значение
1	Объемная доля твердых частиц	5%, 10%, 15%
2	Плотность I фазы – жидкая фаза	998,2кг/м ³
3	Плотность II фазы – твердая фаза (песок граната)	2300 кг/м ³
4	Вязкость I фазы	0,001003 кг/(м.с)
5	Вязкость II фазы	1,7894e-05 кг/(м.с)
6	Размер частицы	0.1 мм

Результаты исследования. Результаты эксперимента, полученные G. Hu, W.Zhu, T.Yu J. Yuan в работе [8], использовались для подтверждения адекватности настоящей численной модели. График распределения скорости фазы I (жидкая фаза) вдоль сопла, полученный при численном моделировании, был сопоставлен с графиком, указанным в вышеназванной работе. Очевидно, что между двумя моделями существует согласованность относительно распределения скоростей, как показано на рис. 4–5. Следовательно,

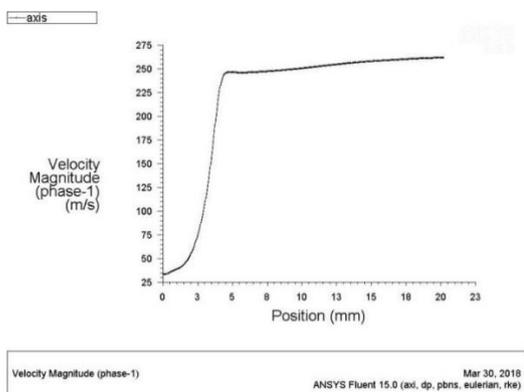


Рис. 4. Распределение скорости жидкой фазы

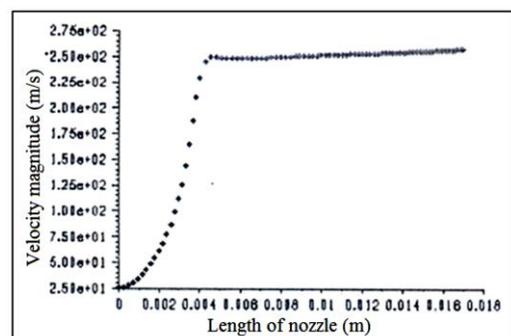


Рис. 5. Распределение скорости жидкой фазы из работы [8]

построенная компьютерная модель адекватно описывает двухфазное течение смеси газа и твердых частиц в заданной расчетной области.

На рис. 6 видно распределение скорости двух фаз, где наблюдается отставание твердой фазы вслед за жидкой фазой, что является характерным для двухфазных течений.

Вычислительные эксперименты проводились с заданием полного давления на входе в диапазоне значений: от 5 МПа до 40 МПа. Как видно из рис. 7, чем выше рабочее давление, тем сильнее будет касательное напряжение на стенки. Это верно, потому что в сопле энергия давления преобразуется в кинетическую энергию и, следовательно, скорость увеличивается вдоль канала, что приводит к более высокому напряжению на стенки из-за более высоких градиентов скорости.

Для любого заданного входного рабочего давления касательное напряжение на стенки канала начинает увеличиваться в сходящейся секции сопла и достигает пика вблизи критического участка, что связано с внезапным изменением градиента скорости, соответствующего изменению площади в критическом сечении канала. Но касательное напряжение на стенки, по-видимому, достигает почти постоянной величины вдоль трубки фокусировки, поскольку нет значительного изменения скорости в трубке фокусировки из-за постоянного диаметра канала до выхода из сопла. Из рис. 7 очевидно, что градиенты скорости будут иметь небольшую неустойчивость при переходе от сходящейся части канала к прямому каналному участку сопла, это видно из шероховатых кривых распределения касательного напряжения вблизи критического участка.

На рис. 8 видно, что касательное напряжение на стенки сопла увеличивается в зависимости от увеличения объемной доли твердых частиц от 5 до 15% в смеси при подаче абразива, см. табл. 1. Очевидно, чем больше концентрация твердых частиц в смеси, тем больше касательное напряжение на стенки канала, что приводит к быстрому разрушению стенок и к износу соплового насадка.

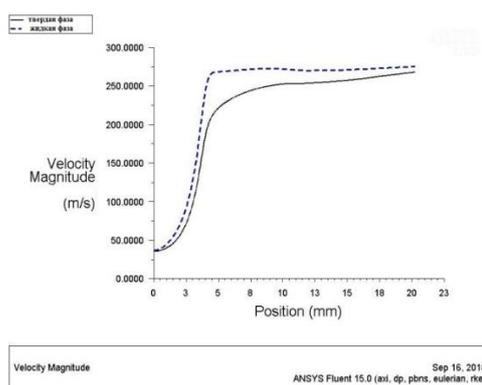


Рис. 6. Распределение скорости двух фаз

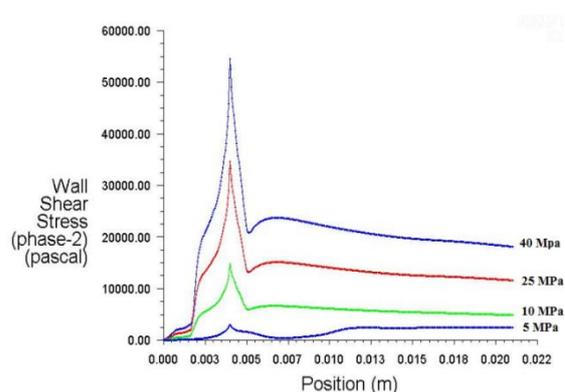


Рис. 7. Зависимость входного давления и касательного напряжения

Это связано с тем, что из принципа сохранения энергии энергия рабочего давления на входе должна проявляться в виде пропорционального количества кинетической

энергии на выходе сопла с диссипацией вязкого сдвигового напряжения, которая также пропорциональна условиям рабочего давления на входе, которая показана на рис. 9.

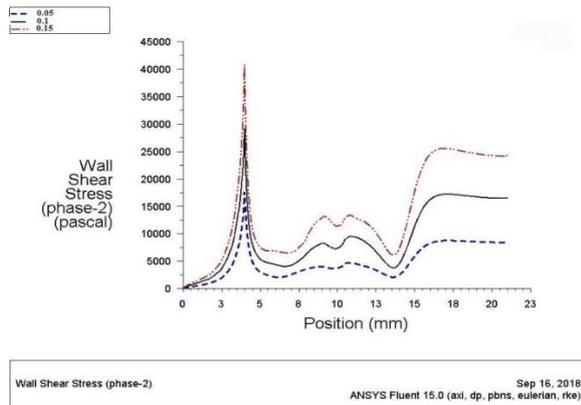


Рис.8. Влияние объемной доли твердых частиц в смеси на касательное напряжение

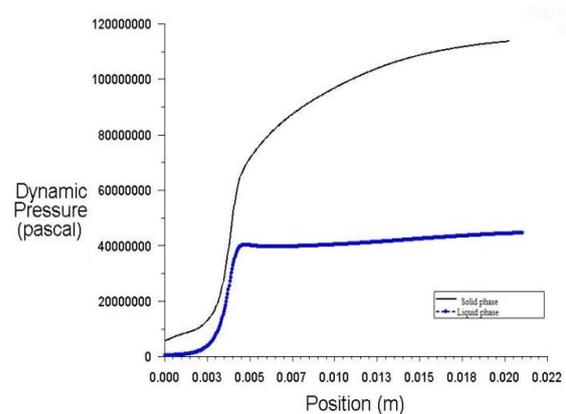


Рис. 9. Динамическое давление двух фаз

Энергия, рассеиваемая из-за стенового сдвига, вычисляется из работы, выполняемой силами сдвига на поверхности сопла, абразивные частицы, движущиеся с течением, вызывают сильный сдвиг стенки, что вызывает эрозию. Это приводит к эрозии внутренней поверхности сопла, что создает уменьшение кинетической энергии струи и влияет на эффективность производительности сопла.

Выводы. Проведено расчетное исследование процесса двухфазного течения смеси газа и твердых частиц в канале переменного сечения и тестирование $k-\epsilon$ модели турбулентности для моделирования течения в канале переменного сечения.

В расчете использовалось моделирование двух фаз: жидкой и твердой на основе многофазной модели Эйлера. Выявлены закономерности влияния рабочего давления на входе и объемной доли твердой фазы на касательное напряжение на стенки канала.

Установлено, что для любого заданного входного рабочего давления касательное напряжение на стенки канала начинает увеличиваться в сходящейся секции сопла и достигает пика вблизи критического участка, что связано с внезапным изменением градиента скорости, соответствующего изменению площади в критическом сечении канала. В заключение можно сделать вывод, что увеличение объемной доли твердых частиц в смеси и рабочего давления на входе приводит к увеличению касательного напряжения на стенки канала, быстрому разрушению стенок и к износу сопла. Почти весь импульс осажденных конденсированных частиц уничтожается трением, и вклад в импульс смеси от движения пристеночного слоя твердых частиц пренебрежимо мал.

Литература

1. Гарбарук, А.В. Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений [Текст] / А.В. Гарбарук, Х.М. Стрелец, Л.М. Шур. – СПб.: Изд-во политехн. ун-та, 2012. – 88 с.

2. Юн, А.А. Теория и практика моделирования турбулентных течений [Текст] / А.А. Юн. – М.: ЛИБРОКОМ, 2009. – 272 с.
3. CFD Training Manual [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.engr.uconn.edu/~barbertj/CFD%20Training/UConn%20Modules/CFD%20Training%20Manual.docx> . – Загл.с экрана. (Дата обращения 07.02.2017).
4. Cornell University. FLUENT Learning Modules [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://confluence.cornell.edu/display/SIMULATION/FLUENT+Learning+Modules4/10/11>. – Загл.с экрана. (Дата обращения 07.02.2018).
5. Басов, К.А. ANSYS Справочник пользователя [Текст] / К.А. Басов. – М.: Книга по требованию, 2005. – 640 с.
6. Каплун, А. Б. ANSYS в руках инженера [Текст]: практ. руководство / А.Б. Каплун, Е.М. Морозов, М.А. Олферьева. – М.: Либроком, 2015. – 272 с.
7. САЕ-система ANSYS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ansys.com>. – Загл.с экрана. (Дата обращения 10.08.2017).
8. "Numerical Simulation and Experimental Study of Liquid-solid Two-phase Flow in Nozzle of DIA Jet [Text]: proceedings of the IEEE International conference industrial informatics(INDIN 2008), Daejeon, Korea, July 13-16th 2008 / G. Hu, W. Zhu, T. Yu, J. Yuan // [Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Contemporary Intelligent Computing Techniques](#). – Daejeon, 2008. – P. 92-100.

УДК 631.6. (575.2)

Пресняков К. А., д.т.н., с.н.с.

Керимкулова Г.К., к.ф.-м.н., gulsaat@mail.ru

Аскалиева Г. О., к.т.н., 87guzya@mail.ru

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, Бишкек, Кыргызстан

ПУЛЬСАЦИИ ДИНАМИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ В ОТКРЫТОМ ТУРБУЛЕНТНОМ ПОТОКЕ ВОДЫ

Установлена формула для распределения пульсаций гидродинамического давления по глубине потока воды: значения указанных пульсаций уменьшаются с уменьшением относительной вертикальной координаты. Показано, что пульсации гидродинамического давления оказывают достаточно слабое возможное влияние их на площадку размером 1 м^2 в придонной части потока.

Ключевые слова: открытый турбулентный поток воды, усредненная скорость воды и ее пульсации, динамическое давление и его пульсации.

Введение. Как известно, турбулентному потоку воды присуще упорядоченное его движение, описываемое полем осредненных компонент его скорости [1]. Наличие в рассматриваемом объекте инерционных сил [2] способствует возникновению динамического давления. Оба указанных поля взаимосвязаны друг с другом.

Постановка задачи исследования. Поле осредненных скоростей турбулентного потока воды сопровождается возникновением поля его пульсаций [3]. Логично, что динамическое давление в потоке воды также не отрицает существование в нем поля его пульсаций. Указанные поля пульсаций скорости и динамического давления должны быть связаны друг с другом.

Задачи исследований. Найти выражения для поля пульсаций динамического давления (распределение пульсаций динамического давления по глубине потока) с целью выявления возможного влияния указанных пульсаций на границы открытого турбулентного потока воды и на отдельные элементы гидротехнических сооружений.

Решение поставленных задач. В случае прямолинейного (отсутствие поперечных течений) плоскопараллельного потока воды запишем выражение для динамического давления:

$$P_d = \rho(u^2 + v^2), \quad (1)$$

где P_d – динамическое давление, Па; u , v – продольная и вертикальная компоненты скорости воды соответственно, м/с; ρ – плотность воды, кг/м^3 .

Введем в формулу (1) пульсации соответствующих величин

$$P_{d,i} \pm P'_d = \rho[(u_i \pm u')^2 + (v_i \pm v')^2], \quad (2)$$

где $P_{d,i}$, u_i , v_i – текущие значения соответствующих величин; P'_d , u' , v' – пульсации соответствующих величин.

Раскроем круглые скобки правой части уравнения (2)

$$P_{д,i} \pm P'_д = \rho \left[u_i^2 \pm 2 \cdot u_i \cdot u' + u'^2 + v_i^2 \pm 2 \cdot v_i \cdot v' + v'^2 \right]. \quad (3)$$

Учтем, что $P_{д,i}$ равняется $\rho \cdot (u_i^2 + v_i^2)$. Тогда $\pm P'_д$ будет равно

$$\rho \left[\pm 2 \cdot u_i \cdot u' + u'^2 \pm 2 \cdot v_i \cdot v' + v'^2 \right]. \quad (4)$$

Разделим обе части уравнения (4) на (± 1) . Будем иметь

$$P'_д = \rho \cdot \left(2 \cdot u_i \cdot u' \pm u'^2 + 2 \cdot v_i \cdot v' \pm v'^2 \right). \quad (5)$$

В связи с тем, что вертикальной компоненте скорости и ее пульсации присущ один и тот же порядок, имеет место приближенное равенство $v(\tilde{y}) \approx v'(\tilde{y})$.

Следовательно, получим

$$P'_д = \rho \cdot \left(2 \cdot u_i \cdot u' \pm u'^2 + 2 \cdot v'^2 \pm v'^2 \right). \quad (6)$$

Рассмотрим два последних члена правой части уравнения (6). В случае знака «минус» второй член $2 \cdot v'^2 \pm v'^2 = v'^2$. А в случае знака «плюс» во втором члене $2 \cdot v'^2 \pm v'^2 = 3v'^2$.

Среднее значение рассматриваемой величины будет равно $2 \cdot v'^2 \pm v'^2 = 2v'^2$.

Тогда получим

$$P'_д = \rho \cdot \left(2 \cdot u_i \cdot u' \pm u'^2 + 2 \cdot v'^2 \right). \quad (7)$$

Рассмотрим первые два члена правой части уравнения. В случае знака «минус» во втором члене $2 \cdot u_i \cdot u' \pm u'^2 = 2 \cdot u_i \cdot u' - u'^2$. И в случае знака «плюс» во втором члене $2 \cdot u_i \cdot u' \pm u'^2 = 2 \cdot u_i \cdot u' + u'^2$. Сумма этих выражений будет равна $2 \cdot u_i \cdot u' - u'^2 + 2 \cdot u_i \cdot u' + u'^2 = 4 \cdot u_i \cdot u'$.

Среднее значение составляет $2 \cdot u_i \cdot u'$.

Перепишем уравнение (7), получим

$$P'_д = 2 \cdot \rho \cdot \left(u_i \cdot u' + v'^2 \right). \quad (8)$$

Для проведения дальнейших преобразований формулы (8) используем следующие соотношения:

$$u' = 2,10 \cdot u_* \cdot \phi(\tilde{y}), \quad v' = 1,05 \cdot u_* \cdot \psi(\tilde{y}), \quad [4, \text{с.108, ф.44 и ф.46}] \quad (9)$$

где u_* – динамическая скорость потока воды, м/с; $\phi(\tilde{y})$, $\psi(\tilde{y})$ – координатные части выражений для распределения пульсаций продольной компоненты скорости воды.

Кроме того, для конкретности нашего анализа используем в качестве профиля продольной компоненты скорости воды показательный закон $u_i = u_m \cdot \tilde{y}^{1/m}$.

После простейших преобразований (опущены) получим

$$P'_д = 2 \cdot \rho \cdot u_*^2 \cdot \left(2,10 \cdot \frac{u_m}{u_*} \cdot \tilde{y}^{1/m} \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right). \quad (10)$$

Теперь обезразмерим обе части равенства (10).

Для этого разделим их на величину нормального давления

$P_0=101\ 345\ \text{Па} = 1,01 \cdot 10^5\ \text{Па}$ (учтено, что стандарта пульсаций динамического давления не существует).

$$\tilde{P}'_d = \frac{2 \cdot \rho \cdot u_*^2}{1,01 \cdot 10^5} \cdot \left[2,10 \cdot \frac{u_m}{u_*} \cdot \tilde{y}^{1/m} \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right]. \quad (11)$$

Выражение (11) перепишем в другом виде

$$\tilde{P}'_d = A \cdot \left(B \cdot \tilde{y}^{1/m} \cdot \phi(\tilde{y}) + 1,05^2 \cdot \psi^2(\tilde{y}) \right), \quad (12)$$

где $A = \frac{2 \cdot 10^3}{1,01 \cdot 10^5} \cdot u_*^2$; $B = 2,10 \cdot \frac{u_m}{u_*}$.

Для проверки легитимности уравнения (12) определим размерность коэффициента А

$$[A] = \frac{[\rho] \cdot [u_*^2]}{[P_0]} = \frac{\text{М} \cdot \text{Л}^{-3} \cdot \text{Л}^2 \cdot \text{Т}^{-2}}{\text{М} \cdot \text{Л} \cdot \text{Т}^{-2} \cdot \text{Л}^{-2}} = \frac{\text{М} \cdot \text{Л}^{-1} \cdot \text{Т}^{-2}}{\text{М} \cdot \text{Л}^{-1} \cdot \text{Т}^{-2}} = 1; \quad (13)$$

т.е. показана безразмерность коэффициента А и тем самым безразмерность в целом уравнения (12).

Для пользования уравнением (12) необходимо составить таблицу исходных характеристик, относящихся к рассматриваемым объектам (таблица) [4].

Наш анализ проведем с использованием эмпирических данных по ПК р. Тору-Айгыр, каналу Туш и каналу Меркенскому (таблица) [5].

Результаты расчетов пульсаций динамического давления осуществлены с использованием формулы (12) и приведены на рисунке.

Таблица. Значения коэффициентов А, В для рассматриваемых опытов

Объект	u_m , м/с	u^* , м/с	$\tilde{\Delta}$	m	1/m	A	B
{8;10} ПК р. Тору-Айгыр	1,57	0,275	0,0571	4	0,25	0,0015	11,99
3 канал Туш	6,43	0,219	0,020	7	0,14	0,00095	61,66
13 канал Туш	8,20	0,237	0,018	9	0,11	0,0011	72,66
15 канал Туш	3,86	0,188	0,024	6	0,17	0,0007	43,12
25 канал Туш	3,72	0,188	0,020	6	0,17	0,0007	41,55
38 канал Туш	3,82	0,188	0,018	6	0,17	0,0007	42,67
б канал Меркенский	5,80	0,410	0,009	6	0,17	0,0033	29,71
В канал Меркенский	3,94	0,260	0,010	6	0,17	0,0013	31,82

Обсуждение результатов исследований. Все установленные кривые являются однотипными: они показывают уменьшение пульсаций динамического давления с уменьшением вертикальной координаты, причем разброс эмпирических точек выявляется в придонной части потока воды (при $\tilde{y} \leq 0,2$).

Минимальные значения \tilde{P}'_d выявлены в придонной части потока при $\tilde{y} \leq 0,02$, при этом сами значения \tilde{P}'_d (*) соответствуют третьему знаку после запятой. Максимальные

значения пульсаций динамического давления установлены вблизи поверхности потока воды, а значения $\tilde{P}'_d (**)$ находятся во втором знаке после запятой.

Сила, обусловленная минимальными пульсациями гидродинамического давления, равна

$$F_{P_d} = P'_d \cdot S = \tilde{P}'_d \cdot P_0 \cdot S \approx 10^{-2} \cdot 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot S \approx 1 \cdot 10^3 \text{ Па} \cdot S. \quad (14)$$

Для площадки размером в 1 м^2 искомая сила будет равна

$F_{P_d} \approx 10^2 \text{ Н}$, или 10 кГ силы (внесистемная единица измерения) на 1 м^2 ,
или 1Гр силы (внесистемная единица измерения) на см^2 .

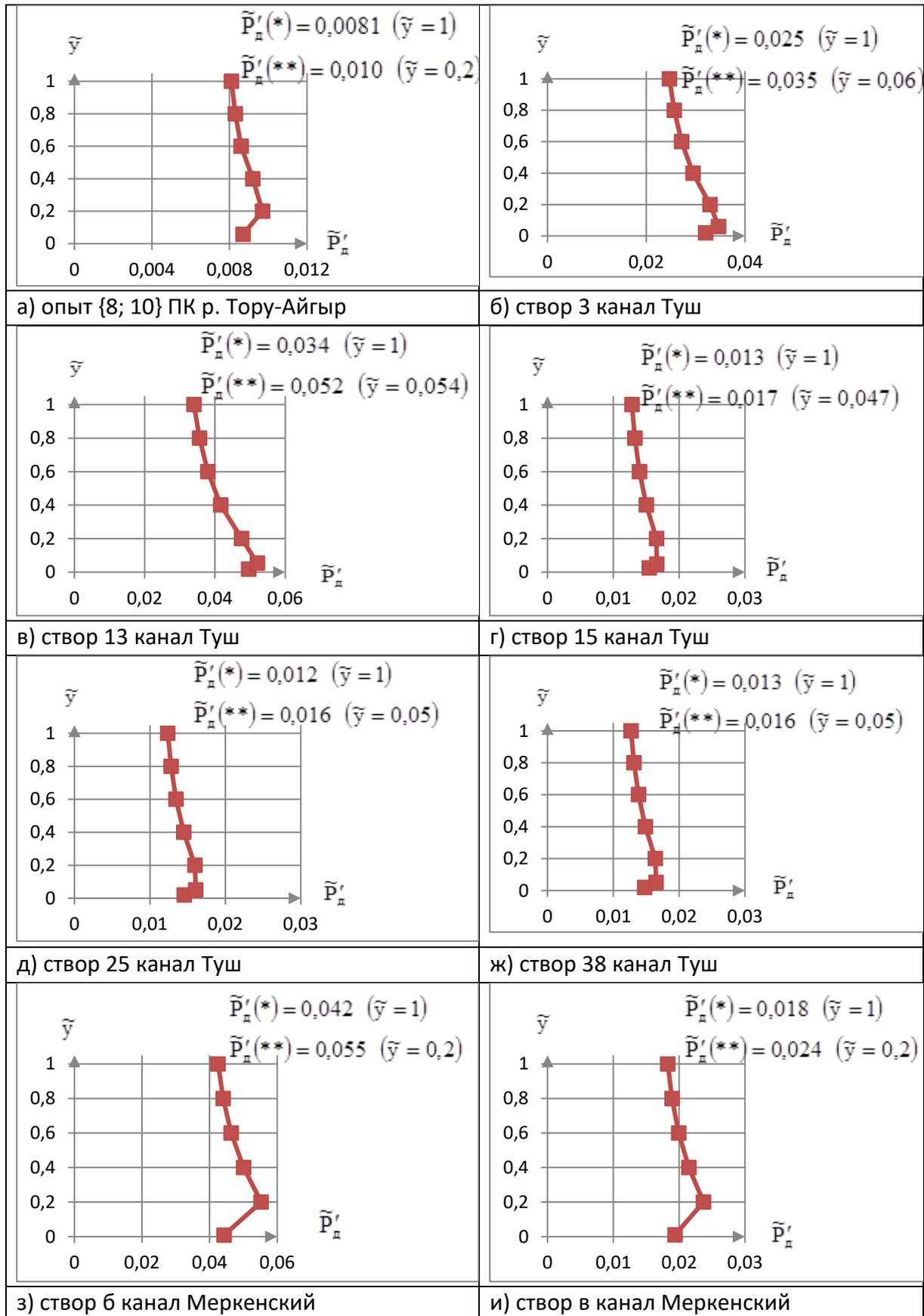


Рис. Распределение относительных пульсаций динамического давления воды. Условные обозначения: 1) в скобках указаны значения относительной координаты,

соответствующие значениям пульсаций динамического давления; 2) * и ** – минимальные и максимальные значения \tilde{P}'_d .

Эта предварительная оценка показывает достаточно слабое возможное влияние пульсаций динамического давления на площадку размером 1 м^2 , расположенную в придонной части потока воды.

Заключение. Получена формула для распределения пульсаций гидродинамического давления по глубине потока с максимальными ее значениями близи поверхности и минимальными – в придонной части потока воды. Предварительная оценка возможного влияния пульсаций гидродинамического давления на площадку размером 1 м^2 в придонной части потока воды показала достаточно малую степень его.

Литература

1. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергия (Лен.отделение), 1976.
2. Великанов М.А. Динамика русловых потоков. – Т.1 Структура потока. – М.: Госиздат техн.-теор. лит., 1954. –323 с.
3. Никитин И.К. Турбулентный русловой поток и процессы в придонной области. – Киев: Изд-во АН УССР, 1963. –138с.
4. Аскалиева Г.О., Пресняков К.А, Керимкулова Г.К. Модель и алгоритмы идентификации параметров открытых водотоков. – LAP LAMBERT, 2019 г. – 177с.
5. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К. Установление средне-интегрального профиля скорости воды частично изученного открытого водотока на основе реконструкции эмпирических данных // Проблемы автоматике и управления. – 2012.– №2(23) – С. 47–56.

UDC 539.379

T.B. Duishenaliev¹, duishenaliev@mail.ru
R.N. Askarbekov², askarbekovu@gmail.com

¹Moscow Power Engineering Institute (MPEI)

²Kyrgyz State Technical University named after I.Razzakov,

MATHEMATICAL MODEL FOR DESCRIBING ELASTIC DEFORMATION OF RUBBER-METAL ELEMENTS

In this paper was proposed mathematical model for description of elastic deformation. The model is based on the new (non-classical) solution of the second boundary value problem of mechanics' deformable body. These solutions give us more suitable description of deformation in rubber layers in rubber-metal supports (RMS). We consider RMS under the influence of a distributed or concentrated load. The numerical value calculation gives us the diagram of stress-strain condition of the rubber in the composition of single-layer and multilayer of rubber.

Keywords: boundary value problem, strain tensor, stress tensor, displacement, load, rubber, rubber-metal support.

Introduction

Engineers and designers are using new materials in different industries, the number of new materials is growing every year. The properties of some of them need to be determined, measured anew. New software systems are used to simulate the behavior of these new materials under the influence of various loads. Of course, all engineers need to create a mathematical model to develop an algorithm for modeling in software systems. In classical theories, such as the theory of elasticity, there are various options for general solutions [8-10]. Where displacements and stresses are expressed to satisfy equality through arbitrary independent functions.

A general theory of the plane problem is constructed using the solution of boundary value problems with the help of analytical functions, which are based on the Cauchy integrals [1-4]. Also, mechanical scientists studied the possibility of constructing a solution to boundary value problems based on analytical functions for a spatial setting. In specific problems of the theory of elasticity, the solutions of Papkovitch-Neuber and Galerkin [1-4] are used. Determining the stress-strain state in a rectangular parallelepiped under the action of external forces is an interesting problem, both from a practical and a theoretical point of view.

When solving specific problems, various methods are used today: potential theory, variational principles of group analysis, separation of Fourier variables.

General solutions of the equations of the theory of elasticity are an important tool for solving specific problems. Using the tensor of stress functions Krutkov [1, 4] obtained the solutions of Galerkin, Papkovitch [1, 4] and he showed that it is possible to form a symmetric tensor $\gamma_{pq} = \gamma_{qp}$ of the second rank from the stress functions of Maxwell and Morera. The question of the general solution of the equilibrium equations using stress functions was considered in many works. The importance and significance of stress functions are discussed in a large review. Links to later works can be found in [4]. Some representations of the general solution of the equations of motion are found in [4]. In work [1, 4] Ostrosablin presented 17 equivalent forms of the general solution of the equilibrium equations of a continuous medium, i.e., 17

forms of stress representation in terms of three stress functions. Exhaustive versions of the general solution of the equations of motion of a continuous medium through 6 functions of stresses in displacements are obtained based on the approach [1, 4]. 17 forms [4] are obtained for the general solution of the equilibrium equations in the absence of time derivatives.

The solution of the Lamé equations was presented by Betty, Lichtenstein, Cerruti in terms of the harmonic vector and the radius vector ξ . Deev solution [33] involves several more constants, which can be assigned different meanings. Grodsky, Papkovich, Neuber [4] represented displacements through four harmonic functions. Boussinesq and Galerkin [4] expressed displacements in terms of three biharmonic functions. Ostrosablin [4] proved the generality of the Papkovich-Neuber solution, as well as the Kelvin-Lame and Galerkin solutions. A connection is established between general solutions and symmetry operators, which are formulas to produce new solutions based on a specific solution.

The Saint-Venant compatibility conditions make it possible to find solutions for calculating the displacement under known strains and stresses (Maxwell / Morera), but now there are some uncertainties in the expression conditions themselves.

This topic is discussed in various literary sources [1, 4], the number of independent compatibility conditions and their modifications, the generality and completeness of stress functions, statement of the problem of the theory elasticity in stresses.

There are many works in which the formulation of boundary value problems in displacements / stresses is considered, that is, various versions of general solutions of the theory of elasticity are used. All existing works prove that the opinions of scientists still differ. When solving specific problems, the application of the classical theory becomes possible with the use of various additional conditions, additional components. Classical equations consist of equations of motion, generalized Hooke's law, Cauchy relations, etc. [5, 6, 11, 12]

Consider the first boundary value problem: the displacements of points of a material (elastic) body are known, which has a certain volume V and a boundary S .

Let us consider the second boundary value problem: the external forces applied to a material (elastic) body are known, which has a certain volume V and a boundary S .

$$1) u_j = \bar{u}_j, \quad x_i \in S, \quad 2) \sigma_{ij}n_j = p_i, \quad x_i \in S$$

The stresses and displacements are continuous, and the function itself is sufficiently smooth along the entire boundary S of the body.

Having analyzed the existing solutions of boundary value problems, Professor Duishenaliev T.B. proposed a new unconventional method constructed in the coordinates of the final state (Euler coordinates) [1, 4, 7]. The essence of the method is that the linear Cauchy tensor describes the finite deformations of a material body, under certain conditions.

Let me give you a mathematical formulation of this problem using an unconventional method, please look at Figure1. Let f_i and P_i , respectively, be the external forces given in the volume of the material body V and on the boundary of the body S .

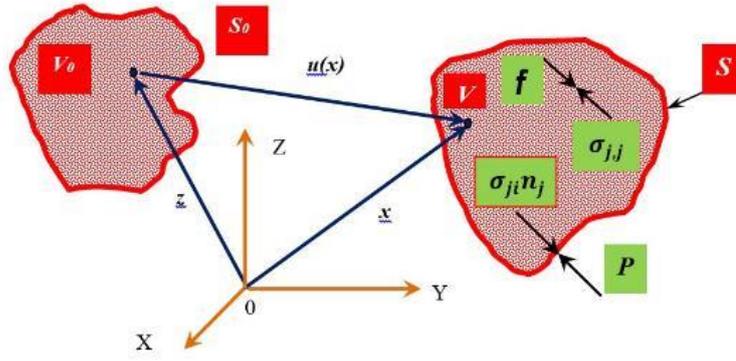


Fig. 1. *Left*: the state of equilibrium of the body without external forces, *right*: the state of equilibrium of the body with the applied forces

$$\sigma_{ji,j} + f_i = 0, \quad \sigma_{ij} = \sigma_{ji}, \quad x_i \in V, \quad (1)$$

$$\sigma_{ij,kk} + \frac{1}{1+\nu} \sigma_{kk,ij} + \frac{\nu}{1-\nu} \delta_{ij} f_{k,k} + f_{i,j} + f_{j,i} = 0, \quad x_i \in V, \quad (2)$$

$$\sigma_{ji} n_j = p_i, \quad x_i \in S, \quad (3)$$

where ν - Poisson's ratio, σ_{ij} - stress components, f_i and p_i respectively, external forces specified in the volume V and at the boundary S of the material body.

External forces are applied to each point of a material body of volume V and boundary S , which are balanced by internal stresses. Functions $\sigma_{ij}(x)$ satisfying to the equations (1-3) may also be solution in spatial coordinates (coordinates of the final state) of this boundary value problem [4]. Deformations are easily determined from such a solution:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} \left(-\nu \cdot \delta_{ij} \cdot \sigma_{kk} + (1+\nu) \sigma_{ij} \right), \quad (4)$$

where E is the modulus of elasticity.

The displacements are determined by the Cesaro formulas [4]:

$$u_i(x) = u_i(x^0) + \omega_{ij}(x^0) (x_j - x_j^0) + \frac{1}{E} \int_l \left(\varepsilon_{ik}(y) + (x_j - y_j) \left(\varepsilon_{k,ij}(y) - \varepsilon_{k,ji}(y) \right) \right) dy_k$$

where l is a line in region V , x^0 - starting point of this line, $u_i(x^0), \omega_{ij}(x^0)$ - integration constants.

Simulation of Stress-strain state of a single-layer rubber-metal supports

Let us set the domain of definition of the equations of the static boundary value problem in the form indicated in Fig. 2 rubber-metal elements with one rubber layer. We place the origin of the rectangular Cartesian coordinate system at the center, which corresponds to the position $(X, Y, Z) = (0,0,0)$.

By the notation V we mean the following region (we use metric):

$$-0.05 \leq x_1 \leq 0.05, \quad -0.05 \leq x_2 \leq 0.05, \quad 0 \leq x_3 \leq 0.1 \quad (5)$$

Let us consider the second boundary value problem without mass forces:

$$\sigma_{ji,j} = 0, \sigma_{ij} = \sigma_{ji}, x_i \in V, \quad (6)$$

$$\sigma_{ij,kk} + \frac{1}{1+\nu} \sigma_{kk,ij} = 0, x_i \in V, \quad (7)$$

$$\sigma_{ji} n_j = \delta_{i2} c x_3, x_i \in S, \quad (8)$$

where V is determined by expressions (5).

The rubber-metal support with forces (8) on its surface is in equilibrium. From expression (8) it follows that a uniformly distributed load is applied to the upper metal plate and its value increases gradually.

Let us give a solution to the problem by the method [4]:

$$\sigma_{ij} = \delta_{i2} \delta_{j2} c x_3, x_i \in V \quad (9)$$

Move functions can also be defined from the expression:

$$u_i = \frac{1}{E} \int c \left(-\nu \delta_{ik} x_3 + (1+\nu) \delta_{i2} \delta_{k2} x_3 + \right. \\ \left. (x_j - y_j) \left(-\nu \left(\delta_{ki} \delta_{3j} - \delta_{kj} \delta_{3i} \right) + (1+\nu) \delta_{k2} \left(\delta_{i2} \delta_{3j} - \delta_{j2} \delta_{3i} \right) \right) \right) dy_k, x_i \in V.$$

Integrating this expression, and we can find:

$$u_i(x) = -c \left(\delta_{i1} \nu x_3 (x_1 - x_1^0) - \delta_{i2} x_3 (x_2 - x_2^0) + \delta_{i3} \left(x_2^2 + \nu (x_3^2 - x_1^2) - x_2^0 (2x_2 - x_2^0) - \right. \right. \\ \left. \left. - \nu \left((x_3^0)^2 - x_1^0 (2x_1 - x_1^0) \right) \right) / 2 \right) / E, x_i \in V, \quad (10)$$

where x_i^0 is any fixed point of the region V . Let us present the expanded form of functions (10):

$$u_1(x) = -\frac{c \nu x_3 (x_1 - x_1^0)}{E}, u_2(x) = \frac{c x_3 (x_2 - x_2^0)}{E}, x_i \in V, \\ u_3(x) = -c \left(\left(x_2^2 + \nu (x_3^2 - x_1^2) - x_2^0 (2x_2 - x_2^0) - \nu \left((x_3^0)^2 - x_1^0 (2x_1 - x_1^0) \right) \right) / 2E \right), x_i \in V.$$

We will now consider three load cases: $c = 0$, $c = 0.3$, $c = 0.6$. There are no external forces on the surface S , the body occupies the region V (5) and is in a state of equilibrium. Figure 2 shows: on the left without an applied load and on the right with an applied load. As you can take the coordinates of any point in the area (5). In what follows, we will take for the initial coordinate: $x_1^0 = 0.05$, $x_2^0 = 0.05$, $x_3^0 = 0$.

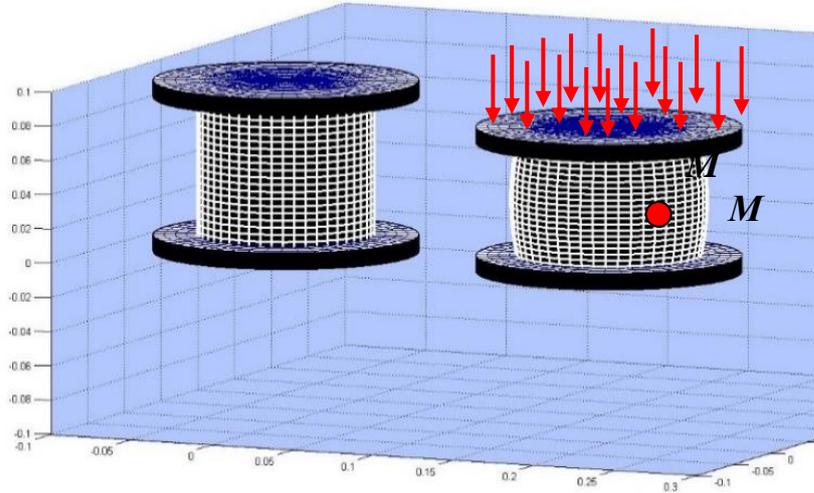


Fig. 2. *Left*: the state of equilibrium of the body, *right*: the state of equilibrium support under the distributed load of $c=0.3$.

We will consider the point M , located inside the rubber layer, which moves under the action of compressive forces. In this article, we will define the displacement of point M under the action of a distributed load on the upper metal plate. This point is in the middle of the rubber layer in height and has the greatest displacement values when the rubber layer bulges. The modulus of elasticity for rubber grade SNK 3826 is taken as $E=12\text{MPa}$, Poisson's ratio $\nu=0.4995$.

For the proposed mathematical model, when $c=0.3$ (external load is 3.82 MPa), a special program code was written in the Matlab software package. In this system, the components of the displacement of the point M in the rubber layer, were calculated (in meters).

$$u_{ij} = \begin{pmatrix} 0.01 & 0 & 0 \\ 0 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0084 \end{pmatrix}.$$

The strain tensor calculated in Matlab is determined by the formulas $\varepsilon_{ij} = 0.5(u_{i,j} + u_{j,i})$. Strain tensor in expanded form:

$$\varepsilon_{ij} := c \cdot \begin{pmatrix} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} u_1(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_1} u_1(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_2} u_1(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_1} u_2(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_3} u_1(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_1} u_3(x_1, x_2, x_3) \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} u_2(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_2} u_1(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_2} u_2(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_2} u_2(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_3} u_2(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_2} u_3(x_1, x_2, x_3) \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} u_3(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_3} u_1(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_2} u_3(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_3} u_2(x_1, x_2, x_3) \right) & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial}{\partial x_3} u_3(x_1, x_2, x_3) + \frac{\partial}{\partial x_3} u_3(x_1, x_2, x_3) \right) \end{pmatrix}$$

Strain tensor components for point M :

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} 0.064 & 0 & 0 \\ 0 & 0.064 & 0 \\ 0 & 0 & 0.09 \end{pmatrix}.$$

To calculate the stress tensor at point M , we use the generalized Hooke's law:

$$\sigma_{ij} = \lambda \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad \lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}.$$

For the cylinder we accept, $\varepsilon_x = \varepsilon_y$, $\sigma_x = \sigma_y$, $\nu = 0.4995$. As a result, we get the stress components, in MPa:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 1.495 & 0 & 0 \\ 0 & 1.495 & 0 \\ 0 & 0 & 1.504 \end{pmatrix}$$

Let us increase the value of the load and consider the case when $c=0.6$ (the load is 7.64 MPa). Under the action of the applied forces, the body occupies the same area in space.

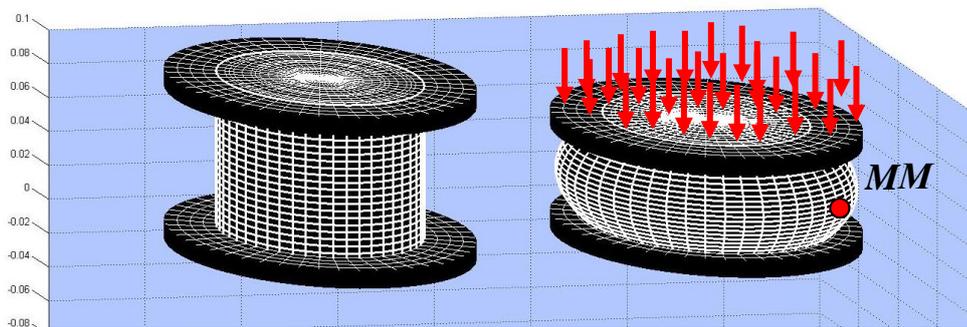


Fig. 3. RMS#2 under the influence of compressive forces $c=0.6$.

Displacement field for point M , in meters:

$$u_{ij} = \begin{pmatrix} 0.02 & 0 & 0 \\ 0 & 0.02 & 0 \\ 0 & 0 & 0.0168 \end{pmatrix}$$

Strain tensor components for point M :

$$\varepsilon_{ij} = \begin{pmatrix} 0.255 & 0 & 0 \\ 0 & 0.255 & 0 \\ 0 & 0 & 0.36 \end{pmatrix}$$

Stress tensor for point M , in MPa:

$$\sigma_{ij} = \begin{pmatrix} 5.981 & 0 & 0 \\ 0 & 5.981 & 0 \\ 0 & 0 & 6.018 \end{pmatrix}$$

This problem (1), (2), (3) can also be represented by the Navier equations:

$$\mu u_{i,jj} + (\lambda + \mu) u_{j,ji} = 0, \quad x_i \in V. \quad (11)$$

The boundary conditions for these equations can be written in three forms:

- The displacements on the surface S are given, which are determined by the function (10).
- Specified external forces on the surface S , determined by expression (8).

• Defined on the displacement faces, defined by expression (10), into which the following coordinate values must be substituted in turn $x_1 = -0.05$, $x_1 = 0.05$, $x_2 = -0.05$, $x_2 = 0.05$ and on the rest of the surface:

$$\sigma_{ij}(x_1, x_2, 0) = -\delta_{i2} c x_3, \quad \sigma_{ij}(x_1, x_2, 0.1) = \delta_{i2} c x_3 \quad (13)$$

There are many works of mechanics where the Cauchy and Almansi strain measures are generally accepted solutions. When the points of the body move relative to each other, the relations between the stress and strain tensors are the laws governing such movement. Deformations can be expressed in terms of displacement gradients given this condition. The solution of the problem will become more complicated if these expressions have nonlinearity. From a mathematical point of view, for scientists of mechanics, the deformation of the body, or rather the process of deformation of the body and the description of this process has always been an urgent task.

The description of the deformation process of such elastic materials as rubber or rubber-like elements using the new method is very interesting. The capabilities of the Cauchy tensor allows you to use the fundamental foundations of the theory of elasticity with the use of new approaches to study the behavior of a material under the influence of external loads.

Conclusion

In this work, we present the results of applying a mathematical model based on the analytical method, which allows to us describing the deformed and stressed states of rubber-metal elements under the influence of compressive forces. This direction refers to topical problems of mechanics and is closely related to the solution of various engineering and technical problems. The model determines the stress state of the RMS and can be successfully applied to the calculation of small, final, and large deformations of rubber-metal supports. The proposed mathematical model develops in relation to rubber-like materials, the analytical method for solving static boundary value problems of the theory of elasticity, proposed by Professor Turatbek Duishenaliev, is very convenient when using modern computational programs [1,4,13]. New results are obtained based on the application of fundamental principles and laws of continuum mechanics.

Reference

1. Аскарбеков Р.Н. Моделирование напряженно-деформированного состояния вибро- и сейсмоизолирующих резинометаллических элементов дис. ... канд. физ.-мат. наук. Бишкек, 2016. – 126 с.
2. Васидзу К. Вариационные методы в теории упругости и пластичности: пер. с англ. – М.: Мир, 1987. – 542 с.
3. Васильев В.В. К задаче теории упругости, сформулированной в напряжениях // Изв. РАН. Механика твердого тела. – 1996. – № 2. – С. 82-92.
4. Дуйшеналиев Т.Б. Неклассические решения механики деформируемого тела. – Москва: Издательство МЭИ, 2017. – 400 с.
5. Ле Тхи Тху Хуэн. Исследование сейсмоизолируемого здания с применением заменяемых резинометаллических сейсмоизоляторов [Текст]: дис. ... канд. техн. наук. – Москва, 2010. – 135с.

6. Мондрус В.Л. Сизов Д.К. Проблема определения собственных частот резинометаллического виброизоляторов современных программных комплексах, реализующих метод конечного элемента // Сборник докладов Междунар. науч.-техн. конф. проф.-препод. состава. – М., 2008. – С. 58-62.
7. Новацкий В. Теория упругости. – М.: Мир, 1975. – 872 с.
8. Ормонбеков Т.О., Бегалиев У.Т., Дерев А.В. и др. Применение тонкослойных резинометаллических опор для сейсмозащиты зданий в условиях территории Кыргызской Республики – Бишкек: Учкун, 2005. – 212 с.
9. Ормонбеков Т.О. Применение тонкослойных резинометаллических элементов (ТРМЭ) в сейсмозащите зданий, сооружений и инженерного оборудования. – Бишкек: Илим, 1996. – 25 с.
10. Потураев В.Н. Резиновые и резинометаллические детали машин. – М.: Машиностроение, 1966. – 298 с.
11. Сергаева М.Ю. Обоснование работоспособности резинометаллических виброизоляторов систем виброзащиты авиационного оборудования: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 2005. – 163 с.
12. Сизов Д.К. Статика и динамика резинометаллического виброизолятора: дис. канд. техн. наук / Д.К. Сизов. – Москва, 2008. – 149 с.
13. Duishenaliev T.B., Askarbekov R.N. Calculation of deformation of rubber layer in rubber metal elements // Proceedings of 15th International Scientific Conference Engineering for Rural Development. – Jelgava, Latvia, 2016. – 25-27.05. – P. 1402-1410.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ

УДК 681.322.067

С.В. Корякин, аспирант, srgkoryakin1@gmail.com

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, Бишкек, Кыргызстан

РАЗРАБОТКА УНИВЕРСАЛЬНОЙ СРЕДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ ЗАЩИЩЕННОГО ИСПОЛНЕНИЯ

В статье рассматриваются вопросы построения программно–аппаратного ядра универсальной среды, значительно упрощающей проектирование автоматизированных систем защищенного исполнения (АСЗИ) с использованием встроенных систем реального времени (СРВ). Универсальная среда проектирования предполагает полный цикл разработки, обеспечивая возможность моделирования отработки процессов, алгоритмов и проектируемых систем. Приведено описание концепции построения разработанной универсальной среды проектирования АСЗИ, алгоритм работы и функционал.

Ключевые слова: модель; этапы проектирования; среда проектирования; системы реального времени (СРВ); автоматизированная система защищенного исполнения, алгоритм работы, программно–аппаратное ядро, технологии проектирования, облачные библиотеки, системы и среды передачи информации.

Введение

«На современном этапе технологического развития наиболее значимой становится роль автоматизации систем управления в различных отраслях промышленности. На сегодняшний день внедрение подобных систем обеспечивает более качественное управление производством, сводя к минимуму участие человека в этих процессах и исключая тем самым ошибки, связанные с человеческим фактором. Развитие и разработка автоматизированных систем управления дает возможность улучшать многие направления деятельности: телекоммуникации, производство, экологию, экономику, энергетику и другие.

В настоящее время во всем мире, в науке и других сферах деятельности, активно развивается направление по созданию инструментов для моделирования, проектирования, настройки и сдачи по ТУ встроенных СРВ управления различными процессами» [1].

Следует отметить, что особый интерес из встроенных СРВ для различных сфер производства представляют так называемые автоматизированные системы защищенного исполнения (АСЗИ), которые отличаются наличием в своей структуре системы защиты информации (СЗИ). При этом СЗИ сами относятся к классу сложных систем, для построения которых требуются знания определенных методологических принципов

проведения исследований, проектирования, производства, эксплуатации и развития, что в итоге существенно усложняет сам процесс проектирования АСЗИ в целом [2].

В связи с этим существует необходимость проведения ряда работ по созданию универсальной среды проектирования (СП) АСЗИ, работающих в режиме реального времени.

При этом «универсальная среда проектирования АСЗИ должна поддерживать все технические циклы разработки создаваемых систем управления процессами (СУП) и необходимого для этого программного обеспечения, тем самым обеспечивая качественную обработку всех вычислительных алгоритмов СУП и давая возможность скоростного имитационного моделирования этих систем. Применение СП позволит обеспечить выпуск всего объема необходимой документации на создание и проектирование АСЗИ, такой, как технологическая, конструкторская, программная.

Кроме того, разработка подобной СП позволит проводить эффективное моделирование встроенных СУП на этапе их проектирования, а также проводить анализ работы АСЗИ в режиме реального времени на основе полученных результатов от проводимых испытаний» [1].

Анализ особенностей проектирования АСЗИ

«Главная задача, которая ставится при построении СП, – получить инструмент, с помощью которого станет возможным проводить работы по построению, пуско-наладке и запуску в эксплуатацию АСЗИ, используя принцип моделирования объекта управления как для самой АСЗИ, так и для всех существующих взаимосвязей.

Следует отметить, что сам процесс создания АСЗИ для управления объектами невозможен без моделирования процесса взаимодействия проектируемой системы и объекта управления. При этом должен соблюдаться принцип максимальной универсальности, а применение единых технологий на разных уровнях в свою очередь упростит задачу создания сложных многоуровневых систем комплексной автоматизации (СКА). Кроме того, распространение принципа универсальности на программное обеспечение позволяет сформулировать соответствующие основные требования к используемым программным продуктам. [7]

Следует учитывать, что ряд устройств СКА (в особенности компьютеры) развивается настолько стремительно, что через полтора-два года новейшая модель становится в лучшем случае моделью среднего уровня. То же самое, только с немного большими сроками, относится и к операционным системам. Наиболее консервативными элементами СКА из аппаратной части являются устройства ввода-вывода, а из программной – пакеты автоматизированного проектирования, а также расширения реального времени для операционных систем.

Кроме того, система обязательно должна позволять работать в режиме реального времени, производить измерения и передавать результаты измерений в дежурно-диспетчерский центр необходимых параметров» [1].

В качестве примера рассмотрим АСЗИ, в топологии которых распределение оборудования происходит территориально. Управление процессами и функциями такой «системы осуществляется распределенной вычислительной сетью, которая входит в состав АСЗИ в целом. Управление техническими и технологическими элементами и

оборудованием системы в обязательном порядке должно выполняться в реальном масштабе времени и соответствовать параметрам, заданным в техническом задании» [4].

Для управления такими объектами вычислительные системы должны создаваться как распределенные и относиться к классу АСЗИ, работающих в режиме реального времени.

АСЗИ, «распределенная по всем основным параметрам и показателям, является сложным для проектирования объектом. Поэтому для успешного выполнения работ по созданию АСЗИ необходимо использовать ряд методов моделирования. Самым известным и универсальным методом для анализа различного рода систем принято считать имитационное моделирование» [2, 3]. «Для анализа отдельных характеристик систем применяются некоторые из частных моделей:

- для выявления показателей производительности – сети массового обслуживания,
- для выявления уровня надежности – марковские цепи,
- для анализа и выявления корректности функционирования процессов
- взаимодействующих параллельно – сети Петри» [4],
- для определения процесса принятия решений – нейронные сети.

Эти модели оптимально использовать, как правило, при соблюдении условий, что отдельно используемые характеристики в ходе выполнения процесса проектирования АСЗИ выдвигаются системными процессами на уровень критериев. Основным из известных препятствий при применении системой проектирования методов имитационного моделирования, как правило, считаются очень большие затраты на осуществление процесса разработки программного обеспечения, которым и имитируется функционирование АСЗИ. [4]

Как правило, эта проблема в большинстве случаев особенно ярко может наблюдаться в АСЗИ, у которых 80 % всех затрат в основном направляется на прикладное программное обеспечение. Отсюда следует, что затраты, используемые на программирование всех возможных алгоритмов моделирования при проектировании систем, в данном случае в большей мере сопоставимы с выполнением процесса разработки программного обеспечения. Принято считать, что наиболее важным фактором, усугубляющим и снижающим эффективность выполнения процесса проектирования систем, является то, что при выполнении процесса проектирования приходится использовать и внедрять эволюционный подход, при этом основная исходная модель, заложенная системой, при поиске наиболее эффективного и оптимального варианта АСЗИ неоднократно подвергается процессу трансформации. [4]

Исходя из вышесказанного, можно сделать вывод, что многократное перепрограммирование исходной модели практически исключает возможность применения имитационного моделирования. Поэтому при создании АСЗИ правильнее использовать реальное программное обеспечение.

При таком подходе к проектированию АСЗИ наблюдается снижение затрат, расходов на разработку и модификацию системы.

При этом считается, что при проектировании АСЗИ во многих источниках сформулирован ряд основных направлений.

- Создание библиотек для различных модулей и всех основных процессов.

- Проектирования автоматизированных систем.
- Разработка базовых и инновационных технологий проектирования.
- Использование различных языковых словарей и передовых средств, для
- Обработки данных.
- Создание и внедрение систем программирования и различных алгоритмов
- Моделирования.
- Недостаточное использование автоматизированных систем моделирования [4].

При этом важно отметить, что на сегодняшний день все известные возможные решения, связанные с проектированием АСЗИ, недостаточно проработаны и очень слабо развиваются. Здесь, как правило, необходима формализация всех существующих задач, связанных с модификацией основных узлов системы.

Поэтому в данной статье, в отличие от ближайшего аналога системы, представленного в источнике [3], основное внимание в большом объеме уделено:

1. Развитию, модульного подхода к проектированию (МП), поскольку в настоящее время для систем подобного класса отсутствие модульного подхода является критически важным, так как без этого невозможно обеспечить устоявшиеся на сегодняшний день ключевые принципы МП АСЗИ – дискретность, изменчивость модели, представление форм модели в виде графов, активность [4]. При этом акцент направлен на снижение затрат, которые могут возникать при модификации основных существующих исходных моделей АСЗИ.
2. Использование модуля, работающего с применением облачных технологий и искусственных нейронных сетей, и библиотек, подчиняющихся алгоритмам централизованного управления ядра УСП АСЗИ.

Принцип дискретности-изменчивости модели в большинстве случаев соответствует представлению о имеющейся модели в виде модульной структуры, что позволяет перераспределять ресурсы при реструктуризации проектируемых систем.

Графическое представление позволяет обеспечить интерактивность процесса реструктуризации систем. Активность позволяет унифицировать процессы, выполняемые в реструктуризируемой системе.

Таким образом в современных АСЗИ в обязательном порядке необходимо использовать упомянутые принципы для возможности стандартизации процессов проектируемой системы при реструктуризации.

Исходную стандартную форму в классических системах проектирования принято называть активной формой модели системы, выполняемой, как правило, модулем моделирования с применением виртуализации (ММВ). В нашем случае в дальнейшем активную форму модели системы будем именовать как универсальную среду проектирования УСП АСЗИ. При этом будем определять УСП АСЗИ как модульно структурированную имитационную модель АСЗИ, которая работает в режиме реального времени и представляется системе в виде программного обеспечения для ММВ. Процесс выполнения схожего программного обеспечения на ММВ в большинстве случаев будет аналогичен основному системному процессу функционирования АСЗИ и представляться в виде модели.

Основные элементы УСП АСЗИ

УСП АСЗИ структурно будет состоять из двух основных элементов, используемых при построении:

1. Применяемый во всех классических автоматизированных информационных системах модуль, фактически представляющий собой имитатор структурного элемента моделируемой АСЗИ и работающий в автономном режиме (далее модуль 1) [8].
2. Модуль облачных нейронных сетей и библиотек, подчиняющихся алгоритмам централизованного управления ядра УСП АСЗИ, далее модуль 2.

В качестве структурных элементов для модуля 1 примем алгоритмы прикладных функций АСЗИ или ее отдельные фрагменты. Эти структурные элементы должны будут выполнять алгоритмы функционирования различных узлов, составляющих технологическое дерево оборудования АСЗИ [9].

Рассмотрим структуру, предложенную для представления модуля 1, работающего внутри УСП АСЗИ. Для этой структуры существует необходимость формализации, которая возможна при выполнении всех вероятных действий по модификации предложенных нами исходных моделей. Кроме этого, в ней нами представлено описание всех необходимых для работы функций, связанных с настройкой используемого в данный момент времени модуля для удовлетворения всем условиям в УСП АСЗИ. Причем все перечисленные условия расположены в ядре УСП АСЗИ и используются при работе системы, функционируют в обязательном порядке отдельно от используемого в системе описания существующего алгоритма, необходимого для функционирования модуля [10].

При этом все настройки работы системы в обязательном порядке должны быть, как минимум, описаны в форме представления кодов и символов понятной для ММВ. Алгоритмы функционирования, используемые для всех модулей предложенной структуры, должны быть представлены в виде ПО на машинном языке, совместимом с используемым ПК.

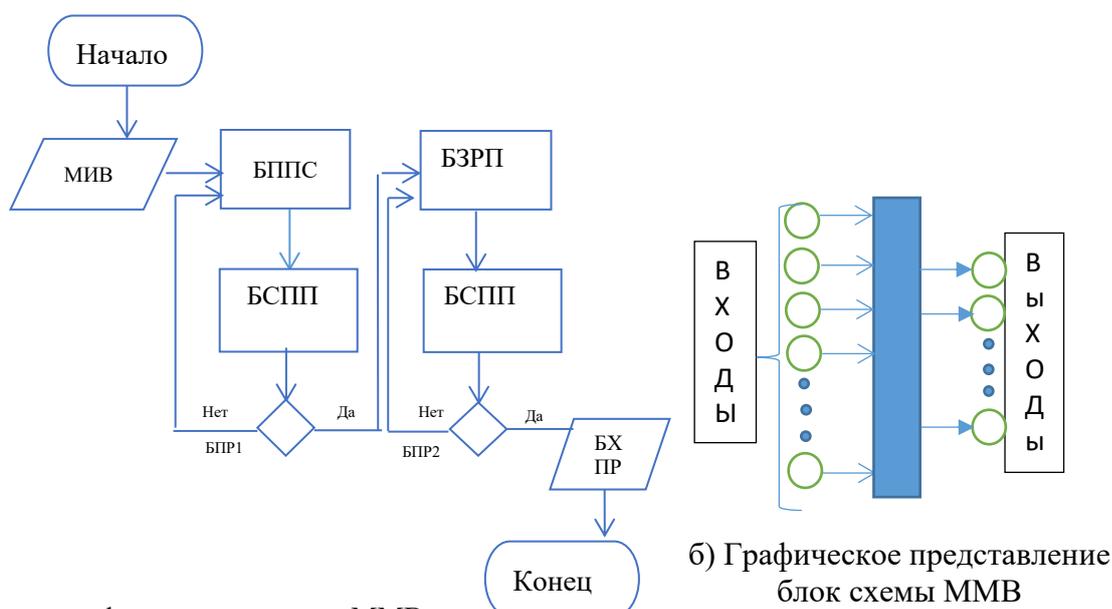
На рис. 1 приведена функциональная структура используемого в системе модуля моделирования ММВ. Данная структура модуля, работающего внутри УСП АСЗИ, разработана таким образом, чтобы во время выполнения процессов функционирования рассматриваемой системы обеспечить максимум из имеющихся возможностей при виртуальном моделировании системы.

На рис. 1а с модуля информационных входов (МИВ) поступает сигнал на блок процесса проектирования системы (БППС) или, другими словами, операционный блок – это исполняющая функции и процессы системы часть модуля, которая в своем составе содержит базовую, не изменённую программу реализации выполнения исходного алгоритма, моделирующего работу соответствующего для этого уровня компонента системы. Далее в блоке БППС выполняются задачи по описанию параметров и функций системных настроек.

После чего процесс переходит в блок состояний процесса проектирования и полученных результатов проектирования (БСПП) – эта часть используемой системы фиксирует значения (состояния) всех возможных параметров входов и выходов работающего в данный момент модуля, отражая при этом тем самым возможные варианты состояний соответствующего компонента используемой системы в текущий момент времени.

Далее моделируемая структура системы поступает в блок принятия решений (БПР), где полученная модель сравнивается с моделями, хранящимися в библиотеках данных по выставленным критериям оценки, если оценка положительная, процесс моделирования приходит в блок задания режимов процессов проектирования автоматизированной системы и функций управления этими режимами (БЗРП) – это часть модуля, в которой производится настройка, параметров модуля используемой системы и его входов и выходов для применения его возможностей в модели универсальной среды проектирования АСЗИ.

Далее процесс передается в блок принятия решений, где принимается решение о завершении процесса моделирования системы, после чего результаты передаются в блок хранения и представления результатов проектирования (БХПР).



а) Блок схема функционирования ММВ:
 МИВ-модуль информационных входов, БПС- блок процесса проектирования
 БСП-блок состояния процесса проектирования и полученных результатов пр
 ния,
 БЗРП- блок задания режимов проектирования, БХПР – блок хранения и представления

Рис. 1. Структура ММВ

«Структура, состоящая из трех основных системных блоков и представленная на рис. 1а, как правило, остается неизменной, поскольку применяется для любого модуля рассматриваемой системы и при этом никак не зависит от его функционального назначения.

В существующих системах проектирования, в которых есть компоненты для участия и поддержки друг друга, такие как система обнаружения вторжения в сеть IDS/IPS, система межсетевое экрана, система мониторинга сети, антивирусная система, по выполняемым предлагаемой системой функциям используемые в системе модули делятся на шесть основных рабочих групп. Каждая из рабочих групп отражает специфику, приемлемую для определенной совокупности компонентов, которые представлены в системе имитируемых соответствующими процессами используемыми модулями (рис. 2)» [4].

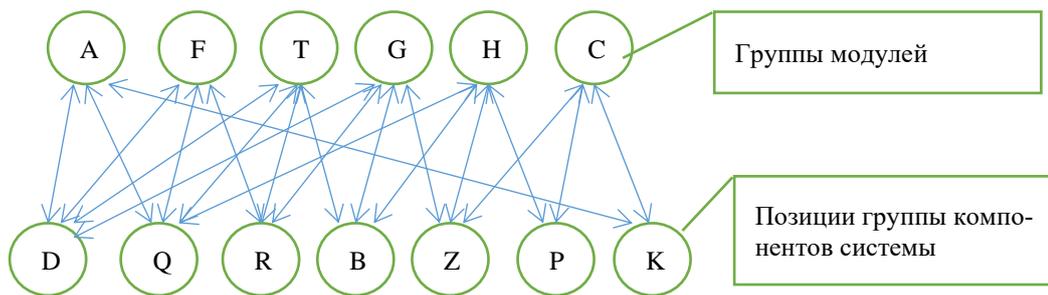


Рис.2. Графическое представление функционального взаимодействия групп модулей и позиций группы компонентов системы

Модули группы А. Модули группы А по своему функционалу производят имитацию работы всех основных узлов системы или используемые при работе их фрагменты, которые по своей сути представляют отдельные в некоторых случаях уникальные функциональные подсистемы основных узлов предлагаемой системы. На входы находящегося в процессе работы модуля поступают последовательно исходящие сигналы запуска, предназначенные для отдельного узла, на исполнительные механизмы работающего модуля поступают сигналы, предназначенные для управления, параметры всех необходимых настроек и их значения, показатели с временных таймеров и т. п. Основным результатом при выполнении рабочих процессов модуля группы А является сформированный модулем расчет показаний, поступающих от группы датчиков, установленных в АСЗИ для предлагаемой структуры СП. Точность расчета всех основных показаний группы, используемых в системе датчиков, выполняемая модулем группы А, как правило, пропорционально зависит от всех существующих показателей адекватности и всех закономерностей, которые в предлагаемой структуре системы положены в основу разработки первоначально важного алгоритма, имитирующего всю основную работу соответствующего узла и также в немалой степени зависящего от «полноты реализации ПО этих закономерностей, применимые для блока процесса проектирования рассматриваемого в данном случае модуля. Этот рассматриваемый в предлагаемой структуре системы блок реализует все имеющиеся закономерности, непосредственно связанные с вычислением наиболее важных значений параметров» [4], которые контролируют используемые в системе периферийные устройства (датчики, сенсоры и т.д.).

Модули группы F. В эту группу в большей степени входят модули, которые реализуют используемые в системе алгоритмы прикладных функций АСЗИ, таких, как обработка и анализ всех ключевых показаний, снятых в процессе работы датчиков, определение различных воздействий для выполнения действий по управлению и контролю, используемых в рассматриваемой системе проектирования различными процессами, адаптивная по времени реакция на системные процессы и события, а также непрерывное выполнение всех незавершенных задач, которые, как правило, предусмотрены в базовом элементном составе АСЗИ.

Следует отметить, что модули «группы F, как правило, воспроизводят работу алгоритма, который используется в варианте представления, сформированном средой проектирования к началу моделирования проекта у специалиста–разработчика.

На первых этапах при появлении изменения в заданной исходной модели возможен процесс имитации основных системных алгоритмов, которые должны быть представлены после выполнения всех операций в упрощенном варианте в соответствии со всеми целями, которые были заданы при моделировании» [4] системы. Главным назначением всех существующих модулей группы F является:

1. Управляющие воздействия модулей группы на систему.

2. Предоставление всех возможных промежуточных состояний данных для дальнейшего использования другими модулями предлагаемой выше системы с целью получения максимально возможных воздействий по управлению. Работа всех основных системных элементов и процессов в данном случае осуществляется непосредственно в пределах контура управления АСЗИ. Кроме этого, на время, предназначенное для выполнения промежуточных состояний модулей этой группы, накладываются ограничения.

Модули группы H. Назначение всех имеющихся в системе модулей группы H – имитация второстепенных для группы функций. Таких, к примеру, как функции контроля всех возможных состояний оборудования, выявления возникающих в процессах предварительных «ситуаций, анализа экономических показателей работы компонентов системы, обработки всех используемых директив операторов и т. п. Модули этой группы в основном выполняются без каких–либо ограничений по времени выполнения основных процессов в фоновом режиме» [4].

Модули группы G. Группа модулей предлагаемой СП G состоит из генерации всех основных моментов наступления событий. При работе всеми модулями группы G формируются сигналы, которые необходимы для запуска различных модулей, используемых системой. Модули этой группы, как правило, работают в соответствии с предлагаемым в системе алгоритмом генерации всех появляющихся случайных величин, распределенных в процессе работы по заданному закону. Сюда входят используемые системой модули генерации детерминированной последовательности во всех моментах времени, которые задаются основной функцией параметров, при этом указываются их исходные значения.

Модули группы T. Группу составляют все используемые в системе модули, для имитации работы в СП системных таймеров, формирующих необходимые сигналы запуска для других модулей рассматриваемой СП и модули счетчиков времени, определяющие время работы системы [4].

Модули группы S. Отвечают за синхронизацию системных событий, запуска и завершения работы системных процессов.

Также все зарезервированные системой используемые модули, по своему функциональному назначению работающие в этой группе, призваны выполнять роль переключателей, при этом, когда на основе анализа ситуации, произведенного системой, модулями группы принимается наиболее эффективное и оптимальное решение о запуске заданных системных процессов.

Все вышеперечисленные групповые модули в большинстве случаев, как правило, используют однотипную структуру (рис. 1а). Модули разных системных групп, которые функционируют в пределах границ предлагаемой системы, обычно могут отличаться содержанием и назначением имеющихся в группах модулей функций, выполняемых при работе системы операционными блоками и, как правило, в большинстве случаев имитируют компоненты групп модулей, находящиеся в процессе формирования и обработки моделируемой системы, соответственно их функциональной принадлежности. Также очень значимым основанием для идентификации всех используемых в системе модулей внутри соответствующих групп является наличие проблемной ориентации используемых систем. В большой степени по функциональному применению это относится к модулям, работающим в пределах группы А, имитирующим работу всех основных компонентов системы, которые находятся под управлением АСЗИ.

Поэтому рассматриваемые в предлагаемой структуре системы модули группы А и F значительно отличаются по своему составу при использовании в разных отраслевых автоматизированных системах. Модули рассматриваемых в предлагаемой структуре системы групп Н, G, Т, С являются общесистемными и в большинстве случаев отражают существующие правила, применяемые для построения активных имитационных моделей автоматизированных систем. При этом все используемые модули этих групп по своей сути инвариантны относительно существующей проблемной ориентации при работе систем.

В связи с этим для используемых в предлагаемой структуре СП групп А и F необходимо в обязательном порядке создавать библиотеки проблемно-ориентированных модулей, хранящие сигнатуры и программные скрипты работы функциональных блоков и отдельных элементов АСЗИ, а для групп Н, G, Т, С общие для всех существующих систем из разных отраслей универсальные библиотеки.

Таким образом, описывая предлагаемую структуру СП, будем рассматривать блок состояний процесса проектирования автоматизированной системы и полученных вследствие деятельности процессов проектирования результатов, в котором хранятся все используемые описания значений (состояний) входов рассматриваемого блока и его выходов. Согласно установленным ядром системы алгоритмов, состояние модуля, входящего в состав блока, в текущий момент времени использует установленные алгоритмы и определяется по заданным значениям и их атрибутам. Соответственно, при работе универсальной среды проектирования АСЗИ можно, как правило, наблюдать и анализировать динамику работы для заданных основных компонентов используемого в данный момент модуля, определяемого системой в пространстве используемых состояний. Значения всех используемых входов и выходов рассматриваемого системного процесса работы заданного в начальных условиях модуля с учетом всех системных атрибутов, имеющихся в наличии блока, будем именовать состояниями. Как правило, отсюда следует зависимость в том, что определенное в конкретный момент времени состояние группового системного модуля описывается при помощи вектора используемых в системе состояний всех его входов и всех выходов. Также необходимо отметить, что при этом в большой степени просматривается зависимость того, что вектором состояний модулей описывается состояние УСП АСЗИ при выполнении алгоритмов и процессов. Следует отметить, что более глубокому анализу динамики работы всей предлагаемой в работе системы в

пространстве глубокого множества всех возможных состояний работы системы будет посвящено отдельное исследование. В данной работе приводится классификация всех возможных состояний системы по непосредственному для них назначению, а также в данной работе дается наиболее по своему содержанию полное определение всех возможных состояний признакового пространства для используемых атрибутов АСЗИ.

Модуль предлагаемой в работе структуры УСП с входами и выходами, используемыми в системе, «будем изображать согласно форме, которая в работе представлена для более детального рассмотрения на рис. 2, используя при этом для более тонкого и детального описания элементов системы метод графов. Такая форма графического представления модуля рассматриваемой системы была принята в других источниках для изображения графа потока данных» [3], который представляет по своей сути модульную структуру рассматриваемой в работе универсальной среды проектирования АСЗИ. Таким образом для проектируемой системы будем использовать основные принципы работы существующих систем проектирования – «по аналогии со схожими в работе с сетями Петри входы и выходы предлагаемой СП рассматриваемого в ее структуре основного рабочего блока (модуля) будем именовать для системы позициями, а действия блока, используемые рассматриваемой системой для процесса проектирования, а также всех имеющихся у него задействованных при этом модулей по обработке входов и получению данных с выходов, переходом» [3].

Со стороны используемых системой позиций модуля, всех его входов и выходов процессами во время выполнения связываются все имеющиеся в этом модуле значения переменных, а также имеющиеся значения, которые обладают определенной последовательностью для всех атрибутов. Эти атрибуты в данном случае в полной степени отражают условия, необходимые для полноценного формирования действующего процесса состояния позиций для предлагаемой структуры УСП, а также его хранения и реализации функционального назначения. Обозначенные в системе позиции в этом конкретном случае, как правило, делятся на основные системные группы, классифицированные по их непосредственному функциональному назначению для всех основных компонентов предлагаемой в работе системы и ее основным признакам.

Группа D. Включает в своем составе позиции, которые в основном отражают измеренные и обработанные значения от основных системных датчиков, измеряющих системные параметры при управлении элементами системы. Понятие множественности используемых группой состояний вводится для позиций, работающих в этой группе. Чтобы своевременно определить количество всех возможных состояний, доступных рассматриваемой системе в режиме реального времени, все состояния классифицируются в принятом системой соответствии с их основным функциональным назначением. Позиции включают все возможные запросы обработки наиболее важных приоритетов, а также условия обновления и все их атрибуты, которые характеризуют все необходимые условия для получения нужных системе состояний.

Группа Q. Эта группа количественно отражает определенные ресурсы в режиме реального времени. Количество ресурсов, необходимых для использования модулем, как правило, указывается непосредственно в блоке, отвечающем за настройки и никогда не должно превышать доступный в группе ресурс в позиции рассматриваемого системой входного ресурса, необходимого для группы Q, синхронизация доступа при этом не

учитывается. В отличие от сетей Петри системные переходы независимы и интеллектуальны.

Группа R. «Эта группа представляет стандартные системные ресурсы: свободен, занят, неисправен, частично неисправен и т. д. Системой ресурс используется для выполнения» [3] задач нужного системного модуля и имеет вид физического устройства. Например, ресурс занят – это его состояние во время работы, а ресурс свободен – его состояние после завершения всех задействованных в системе операций модуля.

В позиции, работающей в пределах этой группы с точностью, можно определить используемый системой счетный ресурс, а значит, группу однородных в работе ресурсов (устройств). Только при соблюдении условия, при котором модуль использует в работе один из имеющихся в системе доступных или свободных ресурсов.

Группа B. Группа отвечает за работу и синхронизацию процессов обращения к библиотекам данных.

Группа Z. Группа отвечает за работы протоколов доступа к ресурсам группы B.

Группа U. Отвечает за прерывания процессов группы Z.

В УСП АСЗИ группа U выполняет функцию выходов для модулей группы F и входов для модулей группы A.

Группа P. Позиции сигнализируют о состоянии выполняемых процессов системы

Группа K. Это группа позиций, отражающая состояния счетчиков.

Позиции описанных системных групп и все их состояния, подробно изложенные выше, по составу обладают большим разнообразием числовых, а также символьных атрибутов, которые необходимы для формирования области настроек системных модулей на заданные в начале работы системы условия их применения при построении УСП АСЗИ.

Структура БЗРПП и основные функции его настройки

Операторы описания параметров модулей и состояния позиций в совокупности составляют основную часть блока задания режимов процесса проектирования БЗРПП, выполняющего функцию адаптации модулей.

Состав БЗРПП имеет переменную структуру. В исходном (библиотечном) варианте БЗРПП в предлагаемой схеме УСП представлен как массив в виде набора сертифицированных паспортных данных, описывающих работу модуля, и основными системными параметрами, которые, как правило, настраиваются «при включении основных элементов в многоуровневую модульную структуру для рабочей модели проектируемой системы. При установлении наиболее важных соответствий входных и выходных позиций, используемых системой модулей вовремя, когда они объединяются между собой в предлагаемой универсальной модульной структуре. Большая часть из используемых системой настроек БЗРПП формируется правило во время его проектирования и только после построения основной схемы модульной структуры проектируемой системой модели, таблица 1.

Таблица 1. Паспортные данные модуля и настраиваемые параметры

№	Паспортные данные	Настраиваемые параметры
1	Имя модуля (группа)	Системный номер перехода
2	Входы запуска	Позиции с требованием на обработку
3	Информационные входы	Системные номера входных позиций
4	Потребляемый ресурс	Связь с позицией группы Q
5	Разделяемый ресурс	Связь с позицией группы R
6	Входы модуля	Системные номера входных позиций
7	Контролируемый модуль	Номера контролируемого перехода
8	Относительные приоритеты модуля	Перечень переходов и отношений
9	Требуемый объем памяти	Блок размещения перехода
10	Время выполнения	Тип процессора для перехода

Настройка основных системных параметров во время построения модульной структуры, проектируемой системой модели, осуществляется в строгом соответствии с п. 1–8, таблица 1» [4]. «Блок размещения перехода пункт 9 и тип процессора пункт 10 выбираются после решения задач по распределению переходов и позиций по станциям». Системный номер в соответствии с пунктом 7 таблицы 1 соответствует переходу, по которому определяется кратность выходных позиций модуля, при этом число срабатываний контролируется при помощи счетчика. В пункте 8 указаны приоритетные по доступу к позиции номера переходов» [3]. «Прогнозируемое время выполнения модуля в исходном варианте БЗРПП указывается в паспортных данных пункт 10 таблицы 1. с учетом типа процессора, установленного в соответствующей станции, время выполнения модуля уточняется на ММВ. Другая группа настроек составляет основную часть работы БЗРПП и характеризует признаковое пространство, в котором после выполнения всех настроек будет функционировать УСП при выполнении ее на ММВ.

Перечисленные настройки обеспечивают корректность совместной работы модулей во время имитации функционирования системы с учетом значений параметров и атрибутов позиций, которые определяют признаковое пространство. При этом условия функционирования системы отображаются в признаковом пространстве описателей состояний позиций, настройки перестраивают блоки процесса проектирования модулей для выполнения этих условий. Настройки выполняемых операций разделяются на три вида» [5]:

1. Настройка операторов в программе операционного блока.
2. Замена и/или включение новых операторов в программу операционного блока.
3. «Включение дополнительных переходов и позиций, скрытых от пользователя» [4].

Взаимодействие настроек, их вид и краткое описание выполняемых операций, инициализируемые описателями состояний входных и выходных позиций модуля, указаны

в таблице. 2. При этом БЗРПП включает лишь часть настроек для разных модулей. Настройки параметров, приведенные в табл. 1, используются в БЗРПП для всех модулей, в модульную структуру проектируемой модели.

Таблица 2. Настройки блока задания процессов проектирования модуля

№	Цель настройки	Описатели состояний	Виды	Комментарии
1	Селекция состояний	Функция селекции	1,2	Кратность состояний
2	Организация счетчика	Параметры счета	3	Изменение модульной структуры
3	Организация взаимного контроля	Параметры взаимного контроля	2,3	Изменение модульной структуры
4	Настройка на условия обновления	Признаки обновления	1,2	Возможна настройка
5	Восстановление исходного СОСТОЯ-	Признаки восстановления	1,2	Зависимость от группы входной позиции
6	Организация доступа к ресурсу Q	Схема потребления ресурса	3	Необходимость контроля пополнения
7	Организация доступа к ресурсу Q	Схема разделения ресурса	3	Возможна настройка
8	Организация доступа к буферу В	Метод доступа к буферу	3	Вид синхронизации
9	Организация доступа к области Z	Метод доступа к области	3	Вид синхронизации
10	Настройка обработки прерывания	Условия прерывания	2,3	Необходимость точного таймера

Активная модель среды проектирования АСЗИ

Построение активной модели универсальной среды проектирования (АМУСП) АСЗИ начинается с задания исходных данных. Исходными данными для построения среды проектирования являются входные данные, заданные по техническому заданию, облачная библиотека базовых вариантов моделей рабочих систем (ОББВМРС) и облачная библиотека модулей и процессов проектирования систем (ОБМиППС), алгоритмы прикладных функций АСЗИ и алгоритмы, предназначенные для функционирования основного технического и технологического оборудования. На основе всех представленных данных разрабатывается для дальнейшего использования рабочая модель АСЗИ (РМС), а также модель основного алгоритма функционирования системы.

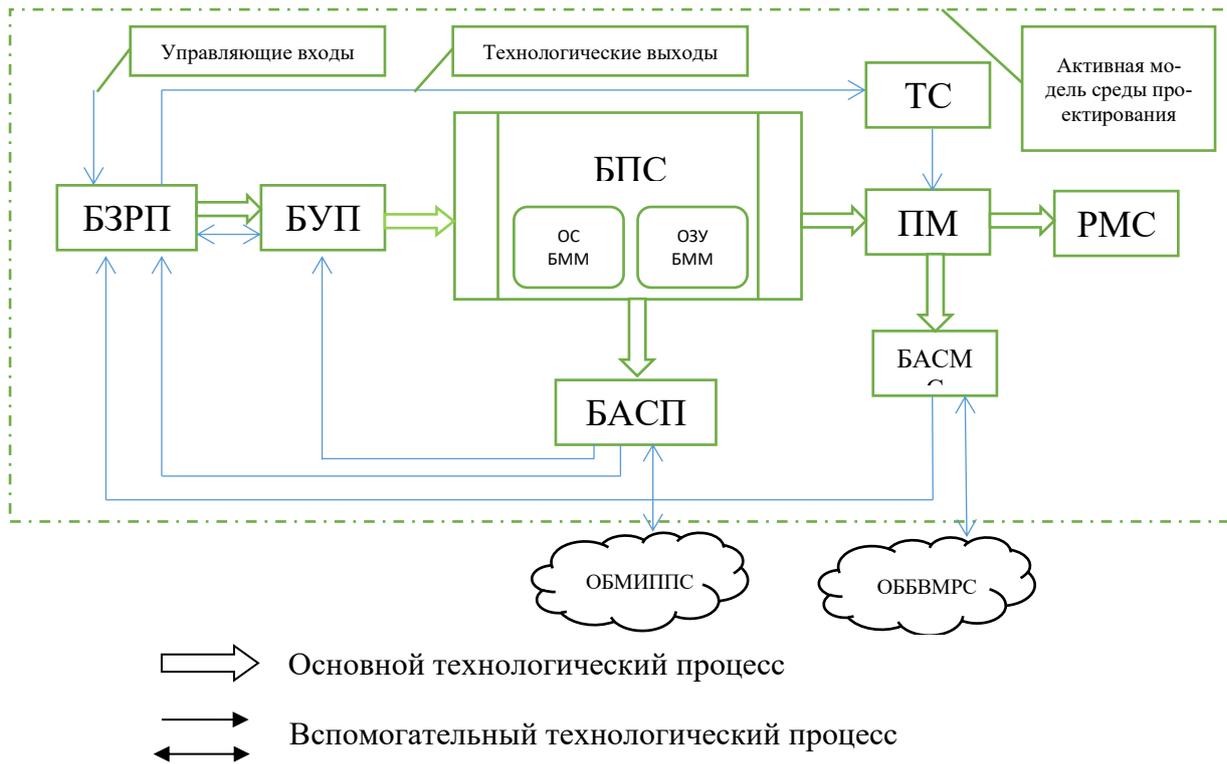


Рис. 3. Функциональная структура модели универсальной среды проектирования АСЗИ

Вначале всех процессов проектирования в форме характерной для модульной структуры средой проектирования «разрабатывается модель функционирования процессов системы и при этом обуславливается последовательность работы основных позиций и связанных между собой переходов. После завершения процесса разработки модель формируется, как правило, в виде совокупности основных системных процессов, работающих в режиме реального времени» [7]. «После выполнения которых системе предоставляется набор основных решений для установления первоначально важных условий функционирования проектируемой УСП системы: запуск процессов, взаимодействия элементов системы при обновлении наиболее ключевых состояний выходных системных позиций, селекции, потребления основных системных ресурсов, приоритетность и др. Принятые условия традиционно отображаются в операторах описателя состояний основных рабочих позиций и заданных исходных паспортных данных БАСП (табл. 1). После БАСП дополняется всеми основными необходимыми настройками (табл. 2), которые непосредственно связаны с работой ВММ» [4]. Предлагаемая универсальная среда проектирования структуры автоматизированных систем воспринимается ММВ как ПО. При выполнении основных процессов ПО СП отражает динамику работы проектируемой системы в виде традиционно принятого модельного представления. Для этого в состав предлагаемой в работе модели универсальной среды проектирования автоматизированных систем включаются «компоненты, в обязательном порядке взаимодействующие с ММВ при выполнении процесса моделирования работы системы. На (рис.3) для рассмотрения представлена функциональная структура модели универсальной среды проектирования АСЗИ.

Блок анализа состояний процесса проектирования БАСПП и проектируемая модель системы ПМС (блоки 4 и 6) работают по технологии модульного проектирования, основываясь на результатах анализа размещения оборудования в топологическом поле системы активной модели среды проектирования и облачной библиотеки базовых вариантов модулей рабочих систем (ОББВМРС). Описатели состояний позиций после завершения настроек будут подключены в блок 6. Паспортные данные входных и выходных позиций описателей модуля хранятся в БЗРП. Для упрощения настроек во время проектирования БЗРП (блок 1), рис. 3, программа БЗРП должна быть разработана в соответствии с требованиями правил настройки. Настройка основных параметров работы ВММ БППС (блок 3) в структуре системы сосредоточена на определение адресов, где в ОЗУ ВММ в специальном формате хранятся компоненты проектируемой модели системы, отображаемой учет результатов моделирования и остальных настроек, которые необходимы для подготовки проектируемой модели системы для выполнения алгоритмов проектирования на ВММ» [4].

Заключение

В процессе выполнения поставленной задачи был предложен подход, предназначенный для решения всех основных проблем, возникающих во время построения, а также при адаптации после внедрения и при дальнейшей модернизации спроектированных моделей автоматизированных систем в составе УСП АСЗИ, работающих в режиме реального времени, а также описан новый алгоритм работы универсальной среды проектирования и ее функционал.

Основная суть предложенного в работе подхода к проектированию АСЗИ заключается в следующем:

1. Сформулирована классификация и дано определение модулей, выполняющих функцию имитации работы процессов реальных АСЗИ.
2. Предложена структура модуля, обеспечивающего работу процессов АСЗИ в виде основного компонента системы в режиме имитации, при построении различных моделей автоматизированных систем защищенного исполнения.
3. Предложена функциональная структура БЗРПП, указан список всех основных настроек и выполняемых БЗРП функций.
4. Предложена функциональная структура УСП АСЗИ, в которой используются облачные библиотеки, управляемые нейронными сетями.
5. Приведена классификация основных системных модулей и ключевых позиций компонентов системы.

Предложенная структура УСП АСЗИ по своей сути является открытой, поэтому при выполнении процессов моделирования реальных автоматизированных систем допускается ведение в структуру новых групп модулей системы и ее позиций, которые в обязательном порядке должны соответствовать предложенной структуре.

Полученные в работе результаты могут быть широко использованы в качестве ключевой концептуальной основы для более детальной и глубокой проработки модели универсальной среды проектирования АСЗИ. Наличие в составе УСП АСЗИ ММВ позволит в значительной степени расширить возможности по основному применению УСП

и на основе результатов, полученных от этого применения, существенно повысить эффективность имитационного моделирования при проектировании АСЗИ.

Таким образом предложенная универсальная среда проектирования АСЗИ позволит сократить временные затраты на согласование времени и способа построения АСЗИ, повысить надежность, универсальность, а также снизить число ошибок при планировании и проектировании АСЗИ.

Литература:

1. Корякин С.В. Разработка программно–аппаратного ядра универсальной среды проектирования автоматизированных систем защищенного исполнения // Проблемы автоматизации и управления. –2020. –№ 1 (38). – С. 60–69.
2. Альянах И.Н. Моделирование вычислительных систем. – Л.: Машиностроение. 1988. – 223 с.
3. Советов Б.Я. Моделирование систем. – М.: Высшая школа, 2001. – 343 с.
4. Погребной В.К. О построении активных моделей распределенных систем реального времени. – Томск.: Изд.во ТПУ, 2008. –Т 312. –№ 5 – С. 78–84.
5. Вылегжанин О.Н., Шкатова Г.И. Сравнительная оценка двух методов выбора наилучших линейных регрессоров // Применение математических методов и ЭВМ в медико–биологических исследованиях: Межвузовский научно–технический сборник. – 1988. – С. 18–22.
6. Брякин И.В. Проектирование автоматизированных систем защищенного исполнения: научно-методическое пособие. Бишкек 2017. 24 с.
7. Корякин С.В. Современные тенденции развития систем информационной безопасности // Проблемы автоматизации и управления. – 2017. – С 82-91.
8. Брякин И.В., Корякин С.В. Информационная безопасность в системах реального времени // Проблемы автоматизации и управления. –2020. –№ 2 (33). – С. 116–129.
9. Курзыкина А. В. Проблемы внедрения автоматизированной информационной системы // Молодой ученый. – 2017. – №4. – С. 124–167
10. Галибус Т.В., Краснопрошин В.В. Концептуальное моделирование и организация механизмов защиты информации в распределенных системах // Информатика. – 2016 (1). – С. 92-102.

УДК 696.2

АЛГОРИТМ ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ ПЕРЕМЕШИВАНИЯ СЫРЬЯ В МЕТАТЕНКЕ БИОГАЗОВОЙ УСТАНОВКИ

А. Дж. Обозов¹, obozov-a@mail.ru

А.В. Лаврентьев², Aleksei.1987@mail.ru

¹*Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, Бишкек, Кыргызстан*

²*Кыргызский государственный университет строительства транспорта и архитектуры им. Н. Исанова, Бишкек, Кыргызстан*

В статье представлен алгоритм управления системой автоматического контроля режима перемешивания субстрата в биохимическом реакторе БГУ. Произведен сравнительный анализ работы биогазовой установки в различных режимах. Разработана система управления автоматического контроля с применением программного обеспечения системы перемешивания субстрата.

Ключевые слова: биогазовая установка, биогаз, система контроля, программное обеспечение, автоматика.

В связи с истощением запасов ископаемого топлива и ухудшением экологической ситуации, вызванной с их использованием, в мире увеличивается повышенный интерес к альтернативным источникам энергии. Одним из таких источников является биомасса, получаемая в результате анаэробной ферментации, которая выделяет биогаз. Процесс метаногенеза осуществляется в специальных биохимических реакторах при заданной температуре. При брожении необходимо производить постоянное перемешивание фракции, так как это способствует созданию однородной температурной среды и ликвидации корки, которая образуется в верхнем слое сырья в процессе брожения.[1]

Цель работы. Исследования и анализ особенностей работы биогазовой установки по режиму перемешивания сырья в биохимическом реакторе и автоматизация режима перемешивания.

В настоящее время биогазовые установки располагают механизмами пневматического перемешивания сырья. Перемешивание сырья в реакторе повышает эффективность работы установки, а также способствует:

- предотвращению формирования корки и осадка;
- предотвращению появления участков разной температуры внутри метатенка;
- равномерному распределению популяции бактерий [2,3].

Традиционная конструктивная схема биогазовой установки, применяемая на практике, с горизонтальным расположением биохимического реактора с дополнительными элементами приведена на рис.1.

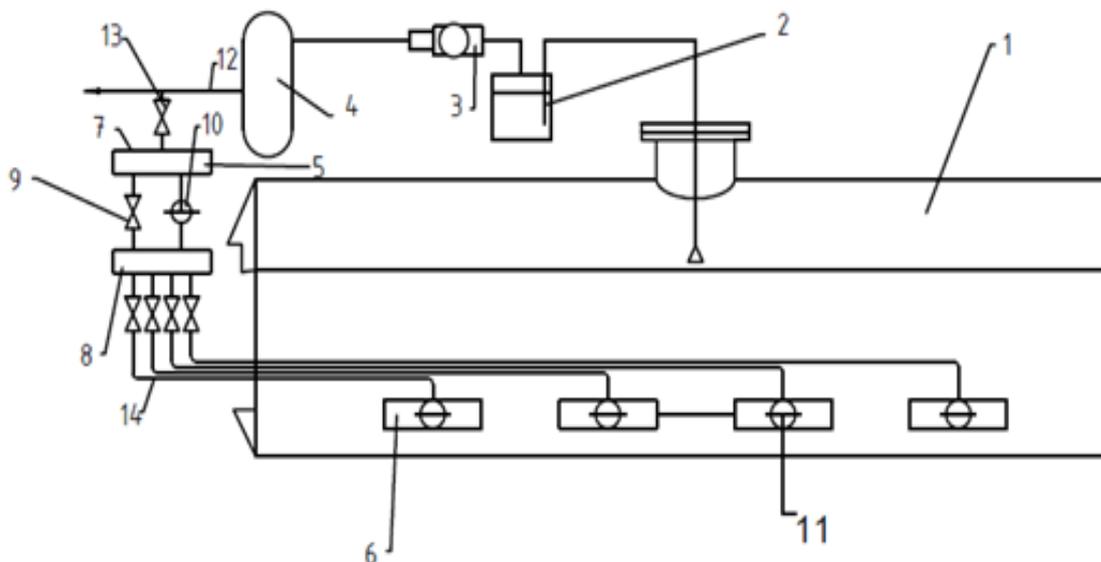


Рис. 1. Традиционная -технологическая схема БГУ

1 – реактор, 2 – водяной затвор, 3 – компрессор, 4 – ресивер, 5–коллектор, 6 – барботеры, 7– приемная камера, 8 – раздаточная камера, 9 – запорный вентиль, 10–электромагнитный клапан, 11–периферийное устройство, 12 – трубопроводы, 13 – вентиль, 14– трубопроводы

Биогазовая установка оснащена механизмом перемешивания сырья с помощью струй биогаза. А также снабжена системой отбора биогаза из реактора, включающей водяной затвор, компрессор и ресивер, соединенных трубопроводами. Конструкция перемешивания сырья содержит коллектор, установленный с внешней стороны реактора, и набор барботеров, расположенных последовательно в донной части реактора. При этом коллектор включает в себя приемную камеру и раздаточную камеру, соединенных между собой запорным вентилем и электроклапаном. Каждый барботер содержит перфорированные насадки, расположенные в горизонтальной плоскости в виде радиальных лучей, исходящих из центра [4].

Для метанового сбраживания используются пищевые отходы влажностью 85–92%. Масса субстрата в подобном состоянии представляет собой неоднородную гетерогенную смесь. Для обеспечения однородной смеси перед загрузкой в камеру приема производят измельчение пищевых отходов с целью создания однородной фракции [5,6].

Предлагаемый метод осуществляет равномерное распределение сырья во всем объеме метатенка за счет перфорированных лопастей перемешивающего механизма. Причем лопасти полые – для подачи перемешивающего газа через перфорированные отверстия. Тем самым обеспечивают более эффективное размножение метановых бактерий для получения биогаза.

Рассмотрим дополнительные элементы системы перемешивания (рис.2.), которые состоят: электромагнитный клапан, микроконтроллер (модели Arduino UNO R3), драйвер-двигатель (модели L298N) и персональный компьютер (ПК). В управлении электромагнитным клапаном мы применяем драйвер-двигатель L298N, который имеет порт для подключения к микроконтроллеру (Arduino UNO R3) и два порта-выхода для подачи сигнала на катушку электромагнитного клапана. Принцип работы контроллера заключается

в смене полярности сигналов, что позволяет открывать и закрывать электромагнитный клапан для подачи газа в раздаточную камеру биохимического реактора с целью перемешивания субстрата.

Подключение произведем к микроконтроллеру (Arduino UNO R3) через персональный компьютер, который выполняет функцию управления над двигателем L298N.

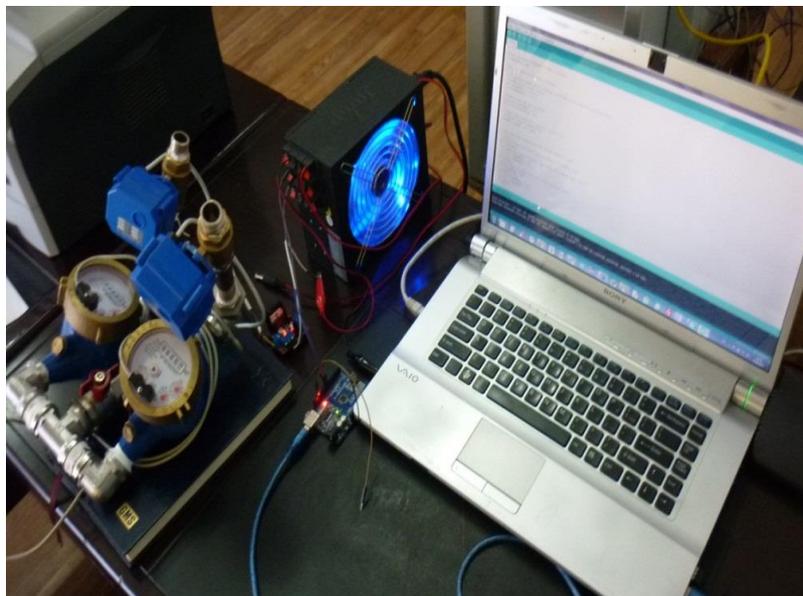


Рис. 2. Элементы оборудования, подключенные к ПК - системе контроля открытия заслонок клапана

Система автоматического управления (рис.3) основывается на обратной связи совместной работы дополнительных элементов автоматического контроля.

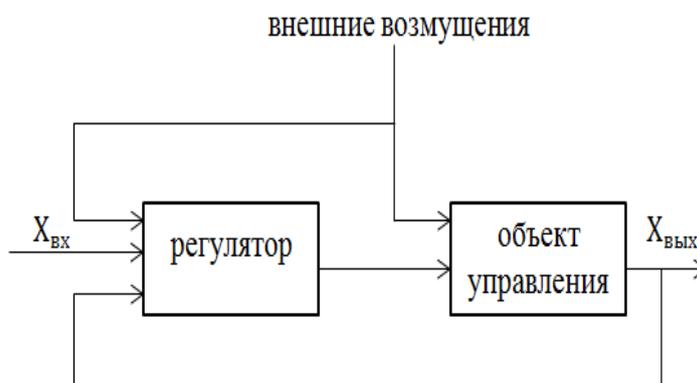


Рис. 3. Принципиальная схема автоматического управления

Принцип работы дополнительной разработанной системы автоматки состоит: регулятор (ПК), объект управления (электромагнитный клапан). Значением входных параметров $X_{вх}$ регулятора является заданная программа временного режима работы электромагнитного клапана [7,8,9].

Включение происходит каждые 4 – 6 часов на 30 секунд. Что позволяет не образовываться в верхней части сырья корки и способствует равномерному распределению

температуры внутри биохимического реактора. Что создает благоприятный климат для жизнедеятельности бактерий, на рис.4. приведена блок-схема системы управления.

Для использования программного обеспечения построим алгоритм управления открытия и закрытия заслонки электромагнитного клапана в установленное время:

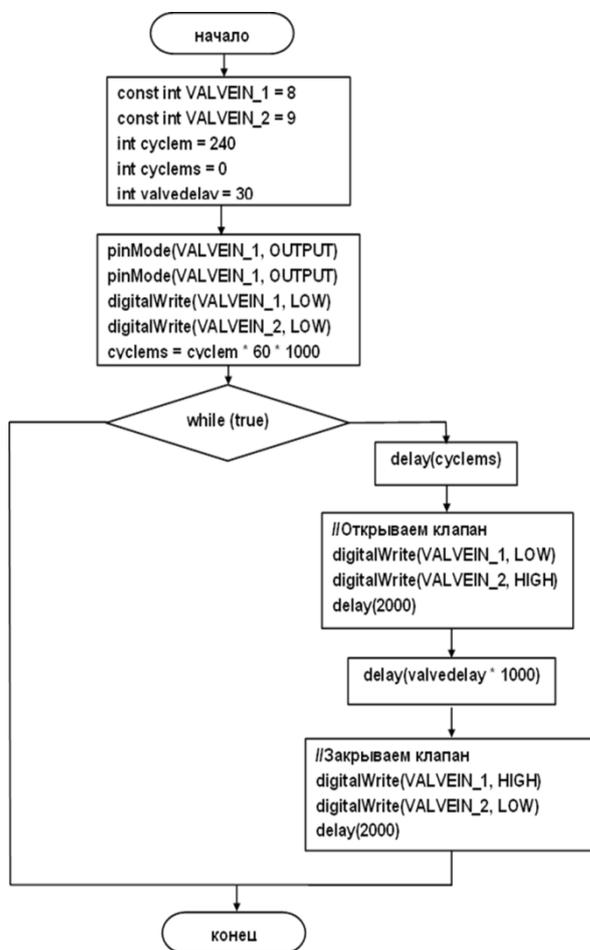


Рис. 4. Блок-схема системы управления

Известные мало энергоемкие биогазовые установки содержат механическую мешалку с ручным приводом. Недостаток установок в том, что перемешивание сбразиваемой массы происходит вручную, что является трудоемкой операцией, требующей приложения больших физических сил. Поэтому такой способ перемешивания может быть использован только в установках небольшого размера с объемом реактора не более 100 м³ [10].

На (рис.5.) приведенны результаты сравнения ручного и автоматического режимов перемешивания и их влияние на производительность установки.

Автоматический режим управления перемешивания сырья в БГУ создает увеличение выхода биогаза за счет ее оптимизации и обеспечение ликвидации плотной корки, препятствующей выходу газа в верхнюю часть реактора. Разработан алгоритм программного управления перемешивания субстрата в метатенке.

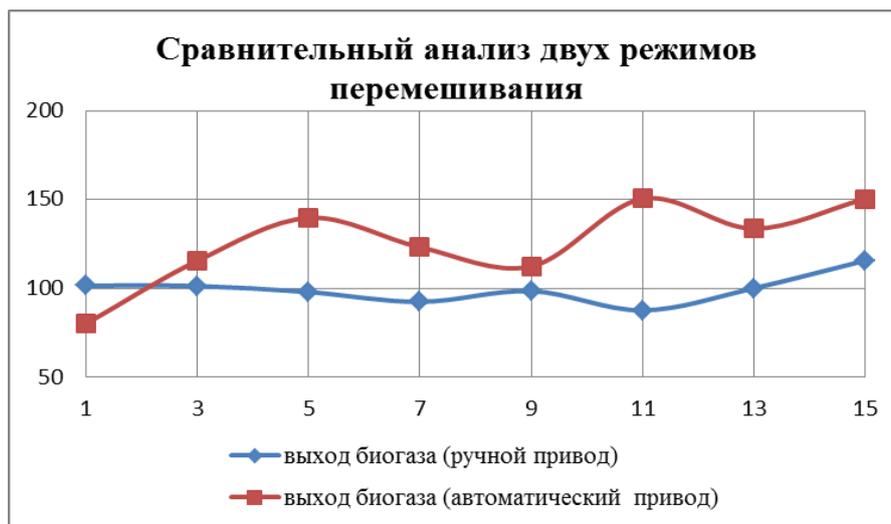


Рис. 5. Диаграмма выхода биогаза в зависимости от режимов перемешивания

Литература

1. Лаврентьев А.В. Влияние выхода биогаза в различных режимах включения системы перемешивания субстанции в биогазовых установках // «Евразийское научное объединение». – М., 2021. – № 1 (71). – С.112–114.
2. Обозов, А.Дж., Асанкулова А. Технические потенциалы биогазовой установки в Кыргызской Республике // Вестник КРСУ. – Бишкек, 2007. – №4. – С.151–153.
3. Асанкулова А. Анализ теплотехнических характеристик биогазовой установки // Вестник КГТУ. – Бишкек, 2007. – №10. – С.150 – 153.
4. Веденев А.Г., Лаврентьев А.В. Биогазовая установка // Патент Кыргызской Республики № 1624.2014. 20130081.1
5. Веденев А.Г. Биогазовые технологии. – Бишкек, 2017. – 97с.
6. Обозов, А. Дж., Ботпаев Р.М. Возобновляемые источники энергии. – Бишкек, 2010. –218с.
7. Лукас В.А. Теория автоматического управления. – М.,1990. –416с.
8. Литвиненко Н.А. Технология программирования на С++, Win32 APL- приложения. – БХВ-СПб:2010. –288с.
9. Дворецкий С.И., Дворецкий С.И., Муратова Е.И. Ермаков А.А. Компьютерное моделирование биотехнических процессов и систем. – Тамбов: 2005. –76с.
10. Асакунова А. Анализ факторов, влияющих на выход биогаза // НАН КР. – Бишкек, 2009. – №1. – С.126–130.

УДК 005.92

С.Г. Исроилов¹ cptrex.si@gmail.com

С.Н. Верзунов², к.т.н. verzunov@hotmail.com

¹Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова, Бишкек, Кыргызстан

²Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, Бишкек Кыргызстан

РАЗРАБОТКА ЗАЩИЩЕННОЙ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА НА ОСНОВЕ БЛОКЧЕЙН-ТЕХНОЛОГИИ

В данной статье представлены результаты разработки распределенной системы документооборота для хранения и обработки данных подучетных лиц СПЭНМ ГУВД г. Бишкека на основе технологии Blockchain.

Ключевые слова: информационная безопасность, информационная система, рабочая станция, модель угроз

Введение

На сегодняшний день сотрудники МВД КР имеют в своем распоряжении недавно введенную (с 01.01.2019 года) информационную систему ЕРПП (Единый реестр преступлений и проступков), куда заносится информация о всех правонарушениях, которые фиксируются на территории Кыргызской Республики. Данная централизованная система позволяет сотрудникам всех ведомств отслеживать правонарушения на территории республики. Подобная информационная система позволяет изучать динамику преступности в стране, делать выводы и разрабатывать стратегию по предотвращению новых преступлений. Положительные отзывы о такой централизованной системе подтолкнули другие ведомства на разработку внутренней гибкой системы документооборота, которая позволяла бы собирать информацию, обрабатывать, анализировать и формировать статистические отчеты.

Однако такие информационные нововведения охватывают лишь поверхностно все структуры без возможности углубления в определенные ведомства для решения узконаправленных задач. Для улучшения качества работы сотрудников и сокращения затраты времени на работу с документацией и была разработана система хранения и обработки данных для СПЭНМ ГУВД г. Бишкека (Служба по противодействию экстремизму и незаконной миграции Главного управления внутренних дел города Бишкека, далее просто Служба).

К сожалению, помимо повышения качества работы силовых ведомств путем внедрения информационных технологий, растет и спрос на конфиденциальную информацию, которой владеют структуры, а такие технологии не редко открывают доступ злоумышленникам к нужной для них информации, если раньше вся секретная документация находилась в рукописном виде, то теперь ведомства активно пользуются информационными технологиями, что ставит под удар секретность информации. Поэтому при разработке информационной системы хранения и обработки данных Службы было принято решение уделить внимание в первую очередь обеспечению безопасности секретных данных, которыми располагают сотрудники.

Актуальность проблемы обусловлена возрастающей в настоящее время нагрузкой на сотрудников Службы, связанной с решением ряда рутинных задач. В связи с чем предлагается автоматизировать такие задачи документооборота, как обработка, хранение и передача данных подучетных лиц Службы. Кроме того, в настоящее время отсутствуют какие-либо средства защиты информации, что увеличивает вероятность нарушения

главных свойств информационной безопасности – конфиденциальности, целостности, доступности. Разработанная система позволит решить вышеперечисленные проблемы с использованием передовой технологии и вычислительных ресурсов Службы и обеспечить информационную безопасность без потери результативности работы сотрудников.

Формулировка проблемы

Целью данной работы является разработка распределенной системы документооборота для хранения и обработки данных подучетных лиц СПЭНМ ГУВД г. Бишкека с целью автоматизации работы со служебными материалами, формирования детальной отчетности и обеспечения, безопасности при помощи блокчейн-технологии.

Задачами настоящего исследования являются:

- Описание предметной области.
- Разработка политики информационной безопасности информационной системы.
- Разработка распределенной системы управления базой данных (РСУБД).
- Внедрение технологии blockchain в разработанную РСУБД.
- Разработка графического интерфейса пользователя к системе.
- Разработка механизмов защиты информации, обрабатываемой системой.

Блокчейн-технология в системах электронного документооборота

Блокчейн (blockchain или block chain) – выстроенная определенным образом непрерывная последовательная цепочка блоков, содержащих информацию. Цепь блоков строится по правилам, которые задает разработчик системы, куда внедряется данная технология. На каждом узле блокчейн-системы хранятся копии всей базы данных в целом, и они сверяются между собой. Это придает системе жизнеспособность даже в случае успешных хакерских атак на ее одиночные узлы. Для проверки информации, хранящейся в цепи блоков, используются полные узлы сети. На рис. 1 демонстрируется, как устроена цепь blockchain. Цепь blockchain формируется из блоков, которые неразрывно связаны между собой хэшем предыдущего блока. Самый первый блок в цепи называется генезис-блоком и формируется отдельно по особому алгоритму, который задает разработчик, а последующие уже согласно технологии. Блок может формироваться по разным критериям, с соблюдением некоторых правил, которые перечислены ниже [1]:

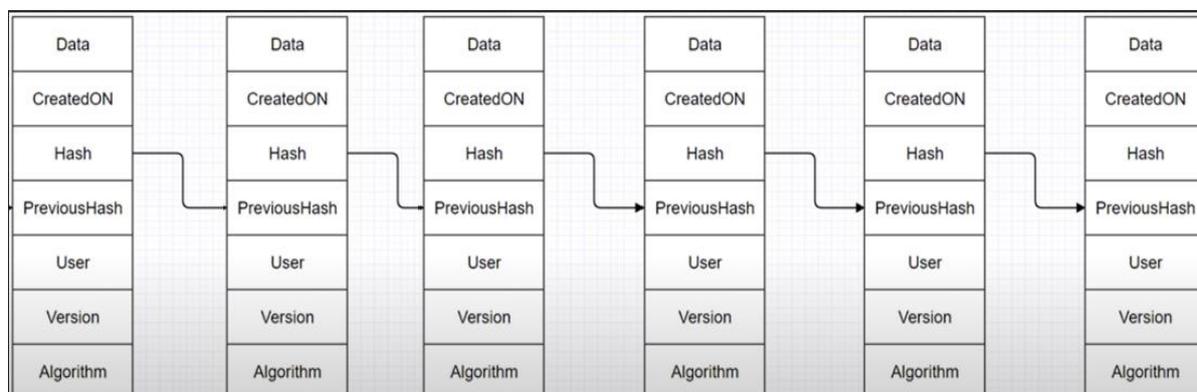


Рис. 1. Цепочка блоков информации технологии Blockchain

1. Блок должен нести в себе хэш предыдущего блока.
2. Блок должен нести в себе собственный хэш, который формируется по собственному алгоритму разработчика.
3. Блок должен нести в себе все данные, которые участвуют в образовании хэша блока.

Технология blockchain включает в себя такие важные составные, как:

- распределенное хранение данных;
- доказательство работы (PoW)/доказательство доли (PoS);
- консенсус.

Распределенное хранение данных подразумевает, что каждый узел сети будет иметь собственную копию данных. Нет единого централизованного хранилища. Согласно источнику [1]: «Полные узлы – точки, отвечающие за отправку и получение данных в блокчейн-сети. Они поддерживают и обеспечивают безопасность blockchain-сети. Эти узлы также называются полными проверяющими узлами (validating nodes), поскольку участвуют в процессе проверки транзакций и блоков системы. Полные узлы также могут ретранслировать новые транзакции и блоки в блокчейне».

Консенсус, алгоритм консенсуса – способ решения задачи, поставленной сервером (например, добавление нового блока, проверка другой цепи блоков, может определяться как механизм, с помощью которого blockchain-сеть достигает консенсуса. Он удостоверяет, что соблюдаются все правила проверок, и гарантирует, что целостность блока или цепи блоков не нарушена.

Доказательство работы (PoW) – алгоритм консенсуса, который используется для подтверждения операции в системе и передачи новых блоков цепи серверу. Проще говоря, как только произойдет операция, которая требует модификации существующей информации или же добавление новой, сервер попытается сформировать блок данных и после успешного формирования (прохождения всех этапов проверки) узел, который сформировал этот блок, отправит цепь блоков на проверку другим участникам сети (другим полным узлам), которые в свою очередь подтвердят целостность данных инициатора- узла.

Таким образом, блокчейн – выстроенная по определённым правилам непрерывная последовательная цепочка (связный список) блоков, содержащих информацию [2]. Впервые термин появился как название полностью реплицированной распределённой базы данных, реализованной в системе Биткойн, из-за чего блокчейн часто относят к базовым технологиям криптовалют, однако система цепочек блоков может быть распространена на любые взаимосвязанные информационные блоки и может использоваться в самых разных отраслях нашей жизни: управление поставками, логистика, защищенный документооборот [3].

Информация, хранящаяся в блокчейне, существует как общая и постоянно сверяемая база данных. Такой способ использования сети имеет очевидные преимущества. База данных блокчейна не хранится в каком-то единственном месте, а это означает, что он сохраняет записи действительно публично, и они легко проверяются. Не существует централизованной версии этой информации, которую можно было бы повредить. Копии хранятся на миллионах носителей одновременно, и ее данные доступны для всех пользователей во внешней сети [4].

Основная задача технологии блокчейн – доверительная передача собственности на цифровые активы в недоверительной сети без посредников. Ключевым понятием блокчейна является транзакция – единственный способ изменить состояние данных. Блок – это структура данных, позволяющая хранить список транзакций. Узлы блокчейн-сети создают транзакции, обмениваются ими и изменяют состояние блокчейн-сети. Чаще всего копии цепочек блоков хранятся и обрабатываются независимо друг от друга на различных компьютерах. Фактически блокчейн представляет собой логику хранения данных, не зависящую от какого-либо центра – отдельного сервера или группы серверов. Блокчейн отличается неизменностью хранимых данных, которая достигается за счет приемов криптографии, а не за счет доверия к кому-либо. Два простейших криптографических алгоритма, используемых в блокчейне, – это хеш-функции и электронные подписи, обеспечивающие целостность транзакций и отвечающие за авторизацию. Участники блокчейн-сети не являются равноправными: почти в любой реализации этой технологии введено следующее распределение ролей: – валидаторы – участники, пишущие транзакции в журнал; – аудиторы – участники, не записывающие транзакции, а только проверяющие их правильность; – легкие клиенты – участники, не хранящие полные копии блокчейна, а взаимодействующие с сетью через другие узлы. Глобальные вложения, связанные с блокчейн-технологиями, в 2021 году могут достичь 9,7 млрд долларов США. Размер рынка рассчитывается на основе прогнозируемых доходов от внедрения решений блокчейн, а также предоставления услуг и сервисов на его основе. При этом предполагается, что среднегодовой темп роста в период до 2022 года составит от 79,6% до 81,2%, однако ряд регионов будет наращивать темпы роста в области блокчейн-индустрии опережающим образом: Япония – 127,3%, Латинская Америка – 152,5% , Анализ мировых трендов патентования технологий блокчейн за последние 5 лет выявил 2565 патентных документов, сгруппированных в 1804 патентных семейства. До 2013 года активность практически отсутствовала, начиная с 2014 года и далее наблюдается увеличение количества поданных патентных документов. Согласно статистике, приведенной Всемирной организацией интеллектуальной собственности WIPO, за 2014 год было сделано 84 запроса на патентирование блокчейн-проектов, за 2015 год – 229 запросов, 2016 год – 455, ещё больше за 2017-й – более 1500. Несмотря на непродолжительный период патентования технологий блокчейн, доля выданных патентов высока и составляет более 10%. Принимая во внимание то, что более 75% патентных документов опубликованы после 2015 года, а также продолжительный срок экспертизы патентных заявок (около двух лет в Европейском патентном ведомстве и до нескольких лет в США), такая большая доля выданных патентов свидетельствует о зрелости и высокой значимости технологий [5].

Во многих организациях осуществляется обмен информацией: с деловыми партнерами, государственными служащими, региональными партнерами. Значительная часть информации передается в виде документов на традиционных носителях. Но в последнее время значительный объем информации поступает по информационно-цифровым каналам, посредством которых передаются электронные документы. Даже традиционный (бумажный) документооборот сегодня немыслим без использования электронных документов и электронного документооборота [6].

Если обратиться к областям применения блокчейн, то одной из наиболее перспективных представляется технология защищенного документооборота, который может

стать намного безопаснее – в первую очередь за счёт ведения децентрализованного реестра документов, который невозможно изменить или подправить. Пользователи смогут работать с документами, имея полную уверенность в их авторстве и подлинности. Таким образом, решается множество проблем, связанных с несовершенством бюрократического аппарата, опасностью махинаций и подделки документов. На данный момент в мире уже существует множество реализаций подобной технологии, например, сервис BlockSign (США), разработанный нью-йоркской компанией Waspo, представляющей собой общедоступный регистр, в котором хранятся подписанные электронным способом документы [7].

С появлением новой технологии многие зарубежные компании начали внедрять её в свои организации. Так, китайская консалтинговая компания PwC поделилась результатами исследования, проведенного в 2018 г., по теме: «Технология блокчейн и ее применение». В процессе исследования было опрошено 600 руководителей из 15 крупных организаций. Их спрашивали, применяют ли они систему блокчейн и в чем видят её потенциал. Итоги опроса позволили сделать вывод, что Китай в скором времени может стать блокчейн-державой. Также нельзя оставить без внимания и Бразилию. Ведь именно в данной стране произошла первая сделка по продаже недвижимости при помощи блокчейн-технологии. Она была заключена всего лишь за 20 минут вместо 30 требуемых дней. США и страны Европы также не остались в стороне. Так, в США данная технология применяется уже не только в финансовой сфере, но и для обмена медицинскими данными. А в Испании создают блокчейн-систему контроля поставок древесины [8]. Успешные примеры внедрения технологии блокчейн в бизнес-процессы различных компаний дают надежду и системам электронного документооборота. Но способен ли блокчейн действительно улучшить архитектуру подобных систем? Прежде всего следует оценить технологию по ключевым параметрам: юридической значимости и актуальности для бизнес-процессов. Несмотря на сдерживающие факторы (технические сложности внедрения и высокие финансовые издержки) повсеместного перехода документооборота организации на технологию блокчейн, данная технология полностью оправдывает себя в действии. Она позволяет не только оптимизировать различные бизнес-процессы, но и сэкономить миллиарды долларов. По данным международного агентства Accenture, к 2025 г. экономия на операционных расходах с учетом внедрения блокчейна составляет от 8 до 12 млрд. долларов [9]. По многочисленным исследованиям, проведенным в зарубежных организациях, было выявлено, что технология решает огромный спектр задач начиная от оптимизации документооборота, проведения платежей, обмена документацией в рамках различных сделок до контроля цепочек поставок и сокращения временных затрат на исполнение бизнес-сделок как внутри компании, так и на стороне контрагентов. Отсюда можно сделать вывод, что данная технология достаточно эффективна и имеет ряд преимуществ в электронном документообороте, таких как:

- снижение правовых рисков;
- увеличение скорости и точности обработки информации;
- уменьшение затрат при хранении данных и при обмене платежами;
- эффективно организованную поисковую систему документов;
- исключение дублирования информации;

- исключение возможности потери/кражи или вовсе уничтожения какого-либо документа или его фрагмента;
- отсутствие постоянной нужды в улучшении технических средств и наращивании технических объёмов.

Таким образом, резюмируя всё вышесказанное, можно сделать следующий вывод, что технология блокчейн позволит не только сократить время проведения различных бизнес-операций, но и также оптимизировать и обезопасить документооборот организации. Работоспособность данной технологии в системе электронного документооборота уже доказана на практике, поэтому остаётся лишь подобрать подходящие области для её применения и предусмотреть соответствующие механизмы контроля и управления, препятствующие её использованию в противоправных целях.

Предлагаемое решение и его теоретическое обоснование

СЭД (система электронного документооборота) насчитывает в настоящем времени 15 пользователей с разными правами доступа к хранящейся информации. Пользователи могут просматривать информацию, которая доступна им, а редактировать только ту информацию, которая была внесена автором.

На всю группу сотрудников (5 человек) выделено по три персональных компьютера. В помещении находится три сетевых принтера, один сетевой коммутатор, один сетевой маршрутизатор. Существует локальная сеть, доступ в интернет отсутствует.

Только на служебных компьютерах имеется возможность для редактирования информации пользователем в системе. С других устройств в сети пользователи смогут только просматривать информацию и отправлять на печать.

Пользователи имеют доступ к своей информации, у руководителя Службы есть возможность скрывать информацию и делать ее доступной определенному пользователю. Права администратора СЭД будут отсутствовать у пользователей, которые являются сотрудниками. Учетная запись администратора будет существовать отдельно и по умолчанию не будет использоваться. Возможность использования такой учетной записи будет доступна только начальнику Службы или отдельному техническому сотруднику.

Для того, чтобы воспользоваться возможностями СЭД, сотрудник должен авторизоваться в операционной системе, а затем подключиться к СЭД. После этого сотруднику будут открыты возможности согласно его правам доступа. Авторизованные сотрудники могут внести новую информацию. Для этого необходимо заполнить все обязательные пункты и подтвердить добавление информации или изменение существующей. Помимо этого, сотрудники могут просматривать существующую информацию, отслеживать статистику и распечатывать необходимую информацию. Сотрудники могут вносить заметки и оставлять комментарии для своих коллег, чтобы те обратили внимание на определенные детали.

Главной задачей такой системы является обеспечение безопасности хранения информации для дальнейшего удобного использования. Система нацелена на быстрый поиск нужной информации и выдачу информации на основе выставленных фильтров.

Таким образом следует выделить следующие возможности системы:

- обработка досье подучетных лиц Службы;
- доступ к досье подучетных лиц Службы;

- хранение досье подучетных лиц Службы;
- распечатка досье подучетных лиц Службы.

Основная цель информационной безопасности СЭД – обеспечение стабильной работы Службы и защита от непреднамеренного (неправильного, незаконного) изменения информации в системе, а также хранение, защита от раскрытия, потери, утечки.

Анализ требований. В процессе проведения анализа требований к разрабатываемой системе была создана модель в виде диаграммы IDEF0 (рис.2). Данная диаграмма показывает бизнес-процессы, которые протекают внутри Службы. Однако для более детального описания бизнес-процессов была составлена декомпозиция основной диаграммы описания бизнес-процессов IDEF0 (рис. 3), что позволяет более детально рассмотреть проблемы и правильно определить требования к разрабатываемой системе.

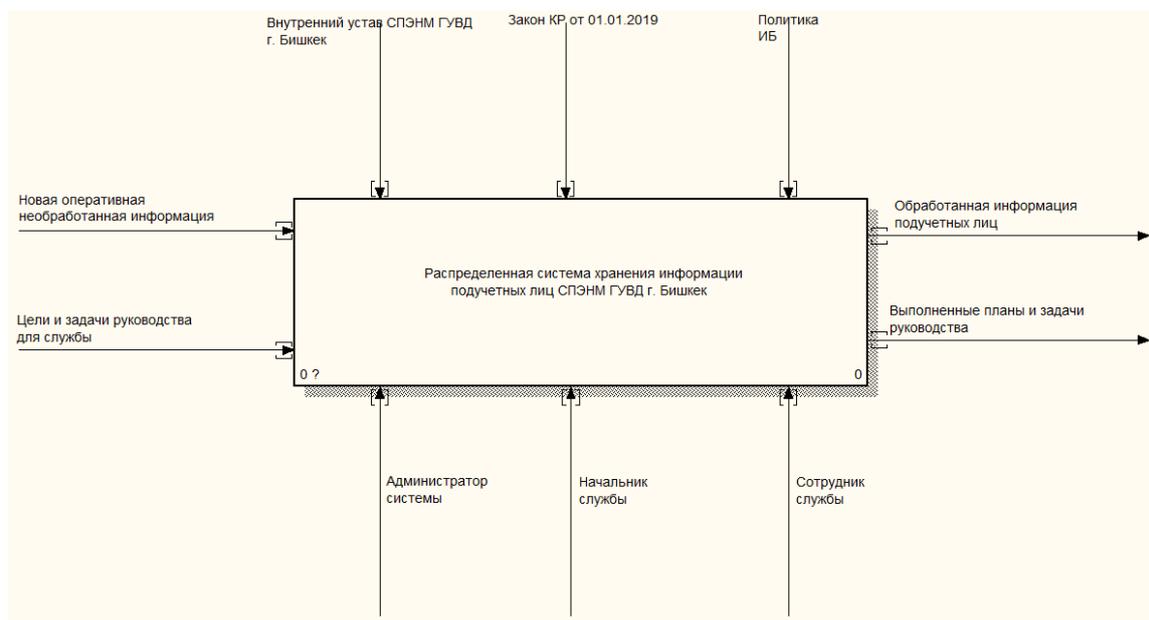


Рис. 2. Диаграмма описания бизнес-процессов в СЭД

В процессе определения требований к разрабатываемой системе были выявлены основные свойства, которыми она должна обладать.

Концептуальная модель. Для того чтобы графически отобразить общие требования к функциональному поведению проектируемой системы, была разработана концептуальная модель в виде UML – диаграммы вариантов использования (USE CASE). Данная модель предоставляет список всех пользователей системы, а также цели, которые они преследуют при использовании.

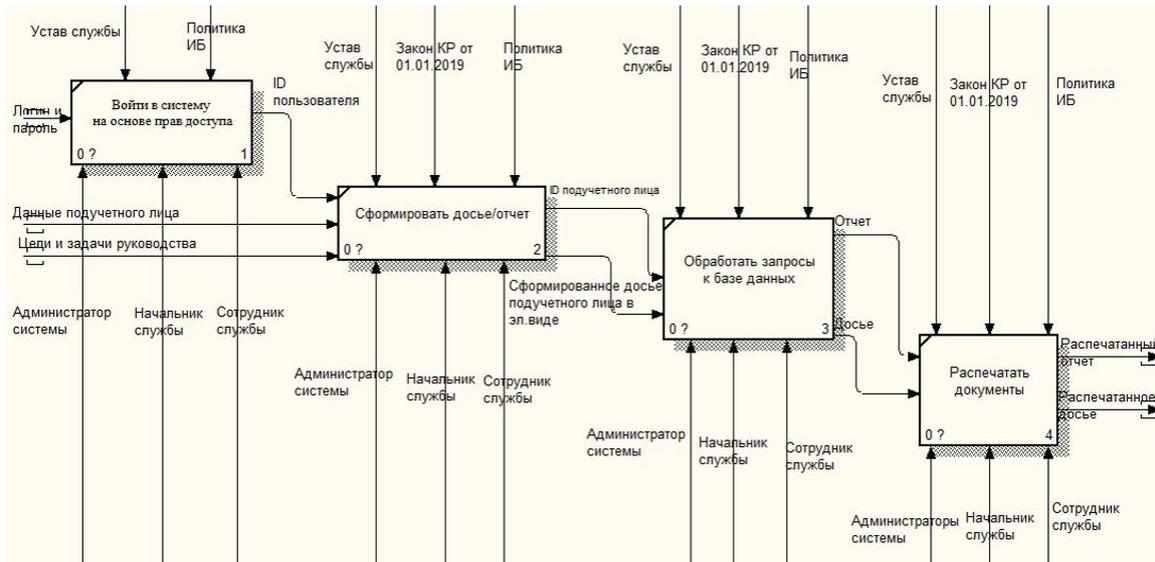


Рис. 3. Декомпозиция основного процесса СЭД

На рис. 4 представлена диаграмма вариантов использования. В системе предусмотрены следующие роли: «Администратор системы», «Начальник службы»,

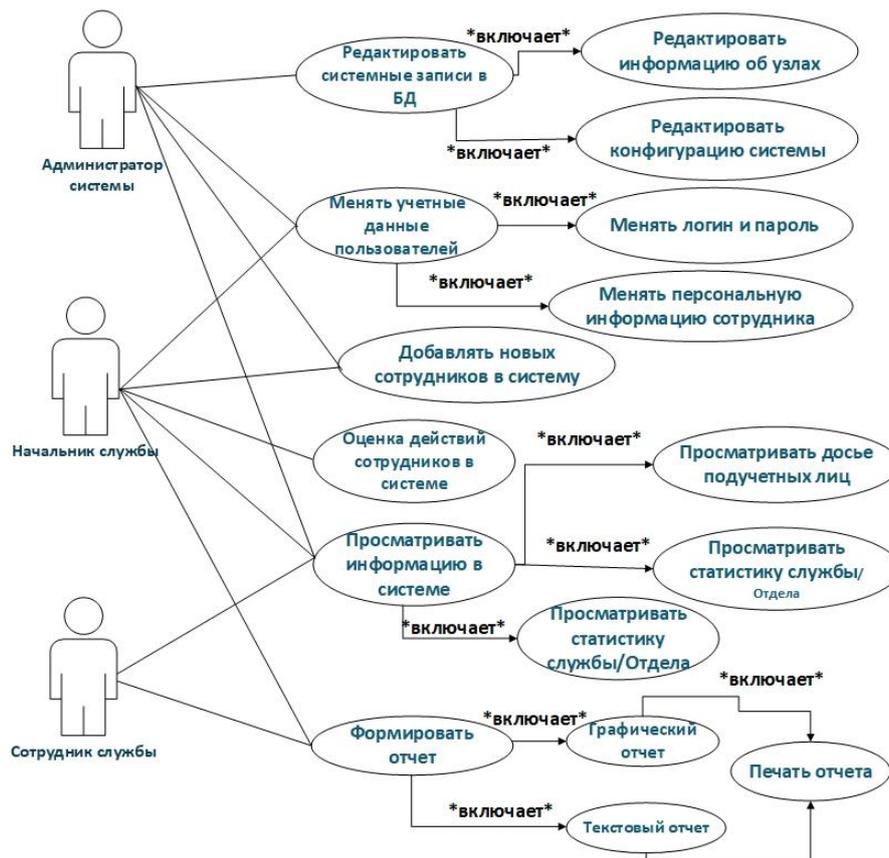


Рис. 4. Концептуальная модель Use-Case

«Сотрудник службы». На диаграмме показаны три актера, которые являются необходимыми для работы СЭД. Их роли определяются следующим образом: Актер «Администратор системы» – лицо, которое следит за работоспособностью системы: все ли узлы обрабатывают блоки данных или нет. Также вводит данные об уровнях доступа

пользователей, проводит мониторинг инцидентов, регистрирует новых сотрудников в системе. Актер «Начальник службы» – лицо, которое следит за работой. Актер «Сотрудник службы» – лицо, которое выполняет рутинные операции, обеспечивающие работу Службы.

Модель потоков данных. С помощью модели потоков данных приведем описание того, как будут в системе преобразоваться потоки данных, используя разрабатываемую систему (модель TO-VE). Данная модель описывает процесс преобразования данных от ее входа до выдачи пользователю. Модель потоков данных начинается с построения диаграммы работы Службы. Она включает в себя три внешние сущности: «Начальник службы», «Сотрудник службы», «Администратор службы» (рис. 5). Весь функционал системы представлен в виде декомпозиции диаграммы потоков данных.

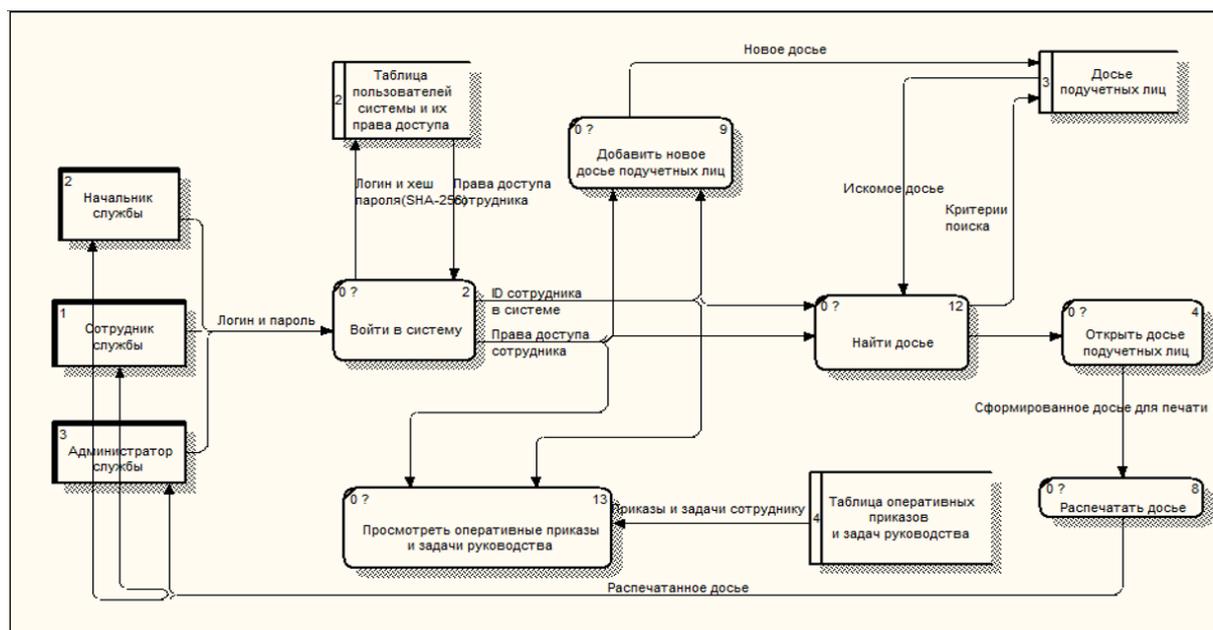


Рис. 5. Диаграмма потоков данных TO-VE

Ролевая модель безопасности объекта. В процессе исследования деятельности Службы была выбрана ролевая модель безопасности как наиболее гибкая, максимально точно подошедшая под спроектированную распределенную СЭД, обеспечивающую хранение данных подучетных лиц. Как сказано в работе [10]: «Ролевая модель безопасности появилась как результат развития дискреционной модели. Однако она обладает новыми по отношению к исходной модели свойствами: управление доступом в ней осуществляется как на основе определения прав доступа для ролей, так и путем сопоставления ролей пользователям и установки правил, регламентирующих использование ролей во время сеансов. В ролевой модели понятие «субъект» замещается понятиями «пользователь» и «роль».

Пользователь – человек, работающий с системой и выполняющий определенные служебные обязанности. Роль – это активно действующая в системе абстрактная сущность, с которой связан набор полномочий, необходимых для выполнения определенной деятельности. Подобное разделение хорошо отражает особенности деятельности различных организаций, что привело к распространению ролевых политик безопасности. При этом как один пользователь может быть авторизован администратором на выполнение

одной или нескольких ролей, так и одна роль может быть сопоставлена одному или нескольким пользователям. При использовании ролевой политики управление доступом осуществляется в две стадии»:

- для каждой роли указывается набор полномочий (разрешений на доступ к различным объектам системы);
- каждому пользователю сопоставляется список доступных ему ролей.

При определении ролевой политики безопасности используются следующие множества и функции:

- U – множество пользователей;
- R – множество ролей;
- P – множество полномочий (разрешений) на доступ к объектам системы;
- S – множество сеансов работы пользователя с системой.
- $user: S \rightarrow U$ – функция, определяющая для сеанса $s \in S$ текущего пользователя $u \in U$: $user(s) = u$;
- $roles: S \rightarrow \{R\}$ – функция, определяющая для сеанса $s \in S$ набор ролей из множества R , доступных в данном сеансе;
- $permissions: S \rightarrow \{P\}$ – функция, задающая для сеанса $s \in S$ набор доступных в нём полномочий (иначе говоря, совокупность полномочий всех ролей, доступных в данном сеансе).

Согласно работе [10]: «В качестве критерия безопасности ролевой модели используется следующее правило: система считается безопасной, если любой пользователь системы, работающий в сеансе $s \in S$, может осуществлять действия, требующие полномочия $p \in P$, только в том случае, если $p \in permissions(s)$. Существует несколько разновидностей ролевых моделей управления доступом, различающихся видом функций $user$, $roles$ и $permissions$. В частности, может определяться иерархическая организация ролей, при которой роли организуются в иерархии, и каждая роль наследует полномочия всех подчиненных ей ролей. Могут быть определены взаимоисключающие роли (т. е. такие роли, которые не могут быть одновременно назначены одному пользователю). Также может вводиться ограничение на одновременное использование ролей в рамках одной сессии, количественные ограничения при назначении ролей и полномочий, может производиться группировка ролей и полномочий». В системе предусмотрено три роли:

Сотрудник Службы – основная роль, которая позволяет пользователю взаимодействовать с системой (просматривать и редактировать досье согласно полномочиям).

Руководство Службы – роль для пользователей с повышенными правами. Данная роль игнорирует полномочия и позволяет просматривать всю информацию в системе.

Администратор Службы – роль для сотрудников информационной безопасности Службы. Не имеет ограничений. Открыт доступ к системным записям.

В системе предусмотрено три уровня (полномочий) доступа (рис. 6):

Уровень 1 – основной уровень, данным уровнем располагают все сотрудники Службы.

Уровень 2 – присваивается отдельным пользователям в системе. Позволяет просматривать информацию уровнем ниже.

Уровень 3 – присваивается к досье высокого уровня секретности. По умолчанию имеют доступ роли «Руководство Службы».

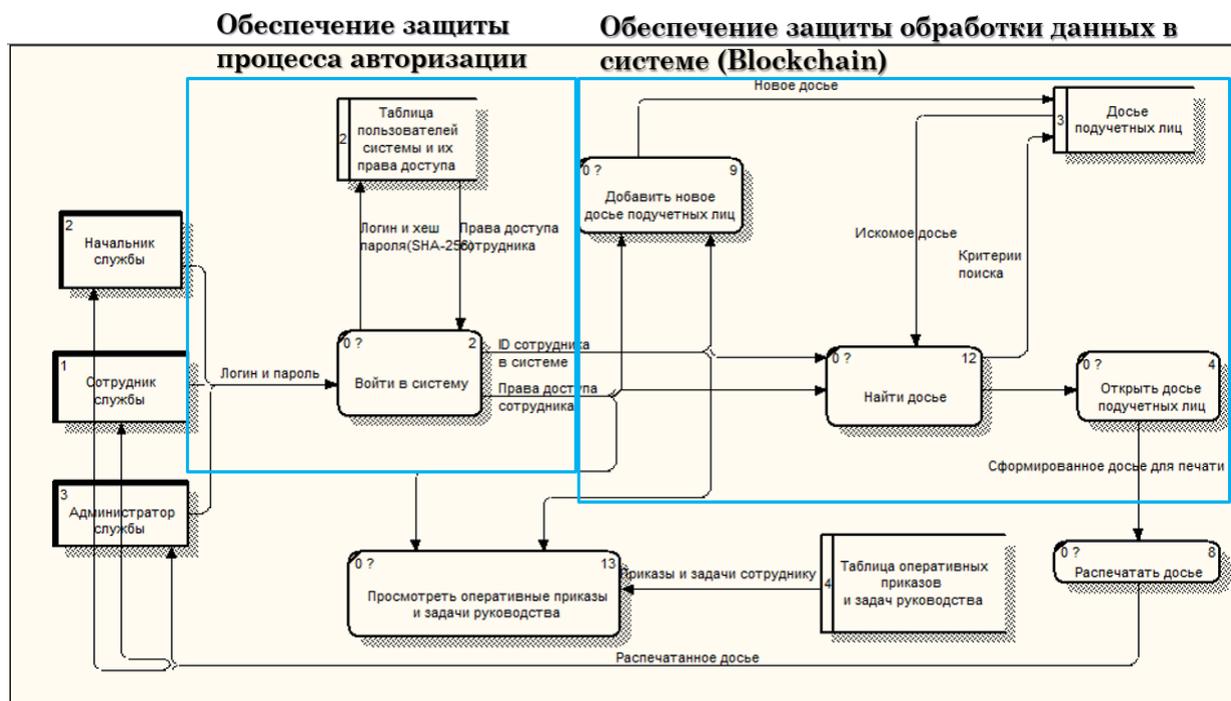


Рис. 6. Схема расположения защитных механизмов в СЭД

Методы и технологии для защиты системы

При решении вопроса о защите информационной системы внимание акцентировалось на достижение трех фундаментальных понятий информационной безопасности, таких как:

- Конфиденциальность
- Целостность
- Доступность

Эти три понятия не перекрывают друг друга по уровню значимости и всегда находятся на одной ступени. Для того, чтобы достичь обеспечения всех трех условий информационной безопасности, было принято решение сменить архитектуру с централизованной системы на распределенную. Такой подход позволит снизить финансовые затраты на оборудование и повысить отказоустойчивость и доступность данных. Однако этого недостаточно, так как остальные механизмы безопасности (правовые документы, технические ограничения и т.д.) не обеспечивают достижения целостности в полной мере при заданных условиях работы информационной системы.

Проанализировав функционирование Службы и сделав выводы о специфике работы, для достижения целостности было принято решение взять за основу принцип работы технологии blockchain.

Распределенная система хранения данных. Распределенная система хранения данных – это комплексное программно-аппаратное решение по организации надёжного хранения информационных ресурсов и предоставления гарантированного доступа к ним.

Плюсы:

1. Разделимость и локальная автономность.

2. Повышение доступности данных.
3. Повышение надежности.
4. Повышение производительности.
5. Экономические выгоды.
6. Модульность системы.

Использование блокчейн-технологии в СЭД. Блокчейн-технология внедрена в СЭД Службы для обеспечения одного из главных свойств информационной безопасности – целостности данных.

Загрузка блоков в цепь blockchain. При включении одного из серверов системы серверная машина выгружает из базы данных блоки с информацией. Каждый блок состоит из (рис. 7) таких элементов, как:

1. ID – идентификатор блока.
2. Дата создания блока.
3. Хэш блока (заранее просчитанный перед добавлением в базу данных).
4. Данные (досье), которые хранит в себе блок.
5. Предыдущий хэш блока (заранее просчитанный перед добавлением в базу данных).
6. Адрес сервера, который был инициатором добавления блоков.



Рис. 7. Таблица блоков данных цепи blockchain

Проверка целостности блока данных. Перед добавлением блока данных в основную цепь blockchain блок проходит проверку на целостность данных внутри блока. Блок, выгруженный из базы данных, имеет свой заранее просчитанный хэш, а также данные, которые он предназначен хранить (досье). Сервер, используя данные блока, заново просчитывает хэш, используя алгоритм шифрования SHA 256, и сверяет его с изначальным хэшем блока. Создание хэша происходит по следующей формуле:

$$\text{Hash} = \text{SHA256}(\text{ID} + \text{PreviousHash} + \text{Data}).$$

Hash – сформированный хэш блока.

ID – идентификатор блока (присваивается автоматически сервером в момент его формирования. Уникален).

PreviousHash – хэш предыдущего блока.

Data – данные системы, которая содержит в себе блок (досье подчетного лица).

SHA256() – криптографический алгоритм необратимого преобразования произвольной длины сообщения в фиксированную длину потоков символов.

В случае, если только что сформированный хэш равен хэшу блока, то проверка считается пройденной, и сервер переходит к следующему этапу.

Сравнение хэша с другими блоками. После успешного прохождения проверки хэша блока сервер начинает проверку хэша предыдущего блока с хэшем текущего блока. Если хэш совпадает, то данный блок добавляется в основную цепь блокчейна системы.

Проверка всей цепи блоков других серверов (узлов) в сети показана на рис. 8. После успешного формирования цепи блоков сервер запрашивает другие сформированные цепи блоков узлов в сети. Каждый узел в сети проверяет все доступные цепи блоков. Если хотя бы одна цепь блоков не пройдет проверку, работа в сети будет невозможна, так как в этом случае возникает вероятность нарушения целостности данных системы.

Практическое исследование и выводы

Вход в систему. Для входа необходимо запустить соответствующее приложение на рабочем столе. После запуска перед пользователем откроется окно авторизации приложения (рис. 9).

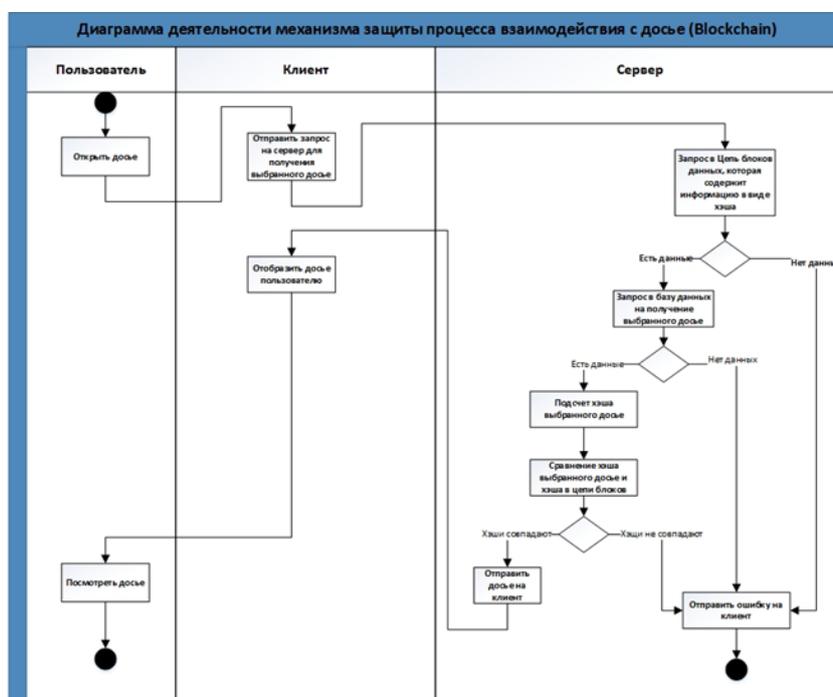


Рис. 8. Диграмма деятельности процесса защиты информации в системе с использованием Blockchain

Профиль сотрудника. Завершив процесс авторизации в системе, пользователю становится доступно окно профиля сотрудника, которое содержит информацию о сотруднике, а также меню выбора операций в системе (рис.10).

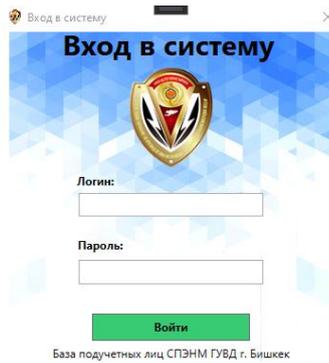


Рис. 9. Окно авторизации приложения

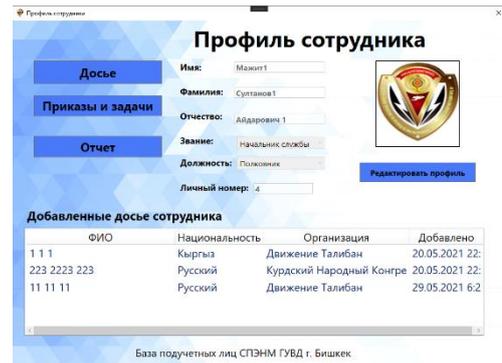


Рис. 10. Профиль сотрудника

Досье подучетных лиц. После нажатия на кнопку «Досье» перед пользователем открывается окно приложения, содержащее список доступных досье для просмотра, редактирования или печати (рис. 11). Нажав ЛКМ (левая кнопка мыши) на доступную запись, сотрудник откроет данное досье.

Просмотр досье. При просмотре досье сотруднику доступна полная информация о подучетном лице. Пользователь может распечатать досье, а также отредактировать информацию (рис. 12).



Рис. 11. Список досье подучетных лиц



Рис. 12. Просмотр досье

Поиск досье. Для поиска соответствующего досье существуют определенные критерии поиска. Выбрав один из них и заполнив поле текста, пользователь может осуществить поиск (рис. 13).

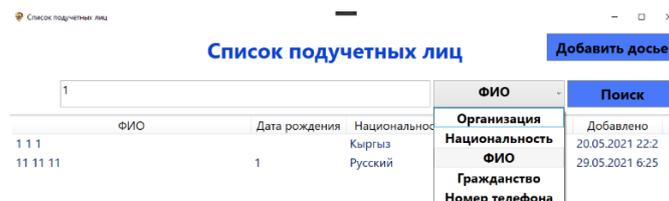


Рис. 13. Поиск досье

Добавление нового досье. Добавление нового досье доступно всем авторизованным сотрудникам в системе. После добавления происходит проверка согласно реализованной технологии блокчейн в системе (рис. 14).

Рис. 14. Добавление нового досье

Запуск сервера. Запуск сервера происходит путем открытия .exe- файла в папке с сервером (рис. 15).

```

D:\Учеба\Дипломная\Работа\Diploma\ServerHost\bin\Debug\ServerHost.exe
=====
04.06.2021 3:36:06 | Сервер включен!
04.06.2021 3:36:06 | Запрашивается база данных по указанному адресу ...
04.06.2021 3:36:06 | Соединение установлено!
=====
=====КОНФИГУРАЦИЯ СЕРВЕРА=====
ID сервера:1
Отображаемое имя: Test Server
Системное имя: srv1_test
Адрес в сети: 192.168.0.100
Порт: 27001
Список разрешенных пользователей:
test
04.06.2021 3:36:06 | Блоки были загружены в цепь данных
04.06.2021 3:36:06 | Начата проверка целостности цепи с данными...
04.06.2021 3:36:06 | Цепь данных успешно прошла проверку
=====
    
```

Рис. 15. Информация о запуске сервера

Добавление нового досье в систему. После добавления досье сервер уведомляет об успешном добавлении (рис.16).

```

04.06.2021 3:33:48 | Блок данных (ID: 1) был добавлен в блокчейн (хеш: 10c9d1)
04.06.2021 3:33:48 | Проверка хеша блока успешно прошла
    
```

Рис. 16 . Информация о добавлении нового досье в СЭД

Просмотр досье в системе. При просмотре досье сервер проверяет целостность данных досье, если сформированный хэш совпадает с хэшем блока, то досье доступно для просмотра (рис. 17).

```

Пользователь test открыл досье №:2
Хеши совпадают
Хеш досье: aef137d22f8f5e0b4ebab1f45ad840f6fc5623acda9b57f04dc06cb115d33926
Хеш блока: aef137d22f8f5e0b4ebab1f45ad840f6fc5623acda9b57f04dc06cb115d33926
    
```

Рис. 17 .Информация о просмотре досье пользователем

Таким образом, хранение данных в блокчейне позволяет обеспечить наличие таких принципов СЭД, как высокий уровень доверия к системе, максимальная защищенность

данных, доступность СЭД для всех участников и временная привязка электронных документов.

Заключение

Для хранения данных была исследована блокчейн-технология, которая в основном используется в финансовом секторе для хранения транзакций. Было проведено исследование возможности адаптировать данную технологию, в частности, метод хранения данных к описанному объекту защиты, а именно системы электронного документооборота для ведения распределенной базы хранения подучетных лиц. Так, были спроектированы диаграммы основного процесса работы системы документооборота. Была разработана политика информационной безопасности. Есть плюсы и минусы использования данной технологии. Минус заключается в сложной интеграции блокчейн-технологии в уже работающие бизнес-процессы, отсюда вытекает значительное расходование средств на внедрение. Ещё одним минусом можно назвать не слишком быструю работу блокчейн, так как при подтверждении транзакции необходимо обойти все узлы сети и проверить каждую цепочку блоков. Однако существенное влияние вышеописанный минус технологии на распределенную систему не оказывает, потому что данная СЭД не подразумевает миллионные транзакции, чтобы он стал ощутим. Плюсом является высокая отказоустойчивость, невозможность нарушения целостности информации.

Литература

1. <https://www.investopedia.com/terms/b/blockchain.asp> (дата обращения: 15.04.2021)
2. Пескова О.Ю., Половко И.Ю., Захарченко А.Д. Применение блокчейн-технологий в системах электронного документооборота: анализ и программная реализация // Инженерный вестник Дона. – №3. –2019. – <http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2019/5801>
3. Генкин Артем, Михеев Алексей. Блокчейн. Как это работает и что ждет нас завтра. – М.: Альпина Паблишер, 2017. – 592 с.
4. Chris Skinner Value Web // K. Information technologies. – 2016 – С. 150 – 175.
5. Технологии блокчейн: Современное состояние и ключевые инсайты <https://www.fips.ru/vse-uslugi/patent-analytics/report-blockchain.pdf> (дата обращения: 10.07.2021)
6. Бафанова В.Е, Миленькая Н.В, Сергиенко Н.Л. Применение информационной технологии блокчейн в системе электронного документооборота // Научные труды КубГТУ. – № 3. – 2020. – С. 791 – 798.
7. BlockSigh: How it all works <https://blocksign.com/about> (дата обращения: 10.07.2021)
8. Федотова В.В., Емельянов Б.Г., Типнер Л.М. Понятие блокчейн и возможности его использования // European science2018. – № 1 (33). – С. 40 – 48.
9. <http://nbj.ru/publs/banki-i-biznes/2019/11/26/kompanija-mindsmith-provela-masshtabnoe-issledovanie-otechestvennogo-blokchein-rynka/index.html> (дата обращения: 10.07.2021)
<http://veteranov.net/content/seti-teoriya/basesecurityautosystem/42-part2-6> (дата обращения: 03.05.2021)

УДК 004.75

В. Гайдамако, dolpha@gmail.com

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, Бишкек, Кыргызстан

АНАЛИЗ АЛГОРИТМОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ В ОБЛАЧНОЙ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ

Балансировка нагрузки играет важнейшую роль в обеспечении производительности облачных вычислений. Назначение балансировки – равномерное использование вычислительных ресурсов – центров обработки данных, серверов, виртуальных машин для обеспечения высокого качества обслуживания запросов пользователей. Некоторые из алгоритмов балансировки нагрузки, условия их применения, достоинства и недостатки рассматриваются в статье. Также рассматриваются задачи, которые должны быть решены при разработке модели облачной информационно-измерительной системы с учетом балансировки нагрузки.

Ключевые слова: облачные вычисления, облачные ИИС, балансировка нагрузки, Round Robin, Throttled Algorithm, Equally Spread Current Execution, Min-Min, Max-Min, исчисление реального времени, моделирование.

Введение. В связи с широким распространением распределенных и облачных вычислений в последнее время вопросы балансировки нагрузки привлекают внимание и практиков, и многочисленных исследователей. Особенностью облачных вычислений является применение технологии виртуализации, позволяющей консолидировать распределенные ресурсы и предоставляющей пользователю видимость цельной системы, а также способность динамически изменять состав оборудования, обслуживающего запросы пользователя в зависимости от нагрузки [1]. Физической средой облака являются центры обработки данных (ЦОД), связанные друг с другом через глобальные или корпоративные сети. Балансировка необходима и при принятии решения, на какой ЦОД облака будет направлен запрос пользователя, и внутри ЦОД, при планировании размещения запроса на вычислительном ресурсе – виртуальной машине (ВМ). Пользователи генерируют запросы на услуги случайным образом, и, если запросы будут направляться на исполнение без предварительного планирования, может появиться дисбаланс в распределении нагрузки – какие-то ЦОД, серверы или виртуальные машины (ВМ) будут перегружены, в то время как другие простаивать. Если принять во внимание, что облачные ЦОД состоят из тысяч физических серверов, на каждом из которых могут быть запущены несколько экземпляров виртуальных ресурсов (ВМ или контейнеров), становится ясно, что задача балансировки нагрузки в облачной среде является одной из важнейших.

Балансировка нагрузки распределяет рабочую нагрузку между несколькими вычислительными ресурсами таким образом, чтобы, с одной стороны, минимизировать время отклика на запрос пользователя, а с другой— обеспечить эффективное использование

вычислительных и коммуникационных ресурсов. При планировании виртуальных ресурсов возникает возможность переноса нагрузки с перегруженных ВМ на недогруженные, а также миграции, добавления и удаления ВМ с физических серверов [2, 3, 4]. Алгоритмы балансировки нагрузки в облаке позволяют эффективно предоставлять ВМ для обслуживания запроса пользователя.

Типы алгоритмов балансировки. Алгоритмы балансировки нагрузки в облачной среде подразделяются на статические и динамические. Исходными данными для алгоритмов статической балансировки нагрузки является информация о ресурсах системы и выполняемых задачах, они просты в разработке и требуют небольших вычислительных ресурсов и времени. Недостатком статических алгоритмов является то, что применяться они могут только в системах, где все серверы и ВМ идентичны по характеристикам, они не учитывают текущее состояние системы, не гибки, плохо приспосабливаются к изменяющейся нагрузке.

Алгоритмы динамической балансировки нагрузки более гибки, надежны и способны обрабатывать большее количество запросов пользователей, чем статические алгоритмы, могут изменять нагрузку в процессе обработки задач. Эти алгоритмы используют информацию о текущем состоянии системы и лучше всего подходят для облачной среды и непредсказуемых рабочих нагрузок. Недостатком является увеличение накладных расходов на балансировку. Динамические алгоритмы делятся на централизованные и распределенные. В централизованных алгоритмах решения принимаются на одном или нескольких узлах балансировки, в распределенных системах в принятии решения участвуют все узлы, которые взаимодействуют и обмениваются информацией для обеспечения лучшей балансировки. Распределенные решения более устойчивы к отказам и хорошо работают в гетерогенной среде, но требуют высокой частоты репликации, что приводит к большой нагрузке на коммуникации и может привести к снижению производительности системы в целом. Распределенные алгоритмы в свою очередь могут быть кооперативными и некооперативными [2]. При кооперативном подходе существует общая цель, критерий работы системы в целом, к которой «стремятся» все узлы. При некооперативном у каждого узла своя цель, например, улучшить время отклика для «своих» задач. Данные о состоянии ВМ собираются периодически в процессе мониторинга, при изменении состояния или по необходимости.

В отдельную группу выделяют [5, 6] алгоритмы, основанные на изучении природных процессов, прежде всего поведения коллективных насекомых – бионические алгоритмы.

Критерии оценки. Результатом работы балансировки нагрузки должно стать эффективное использование ресурсов и, следовательно, распределение задач на ВМ таким образом, чтобы не было перегруженных, недогруженных или простаивающих ВМ. После этого уже на ВМ применяются алгоритмы планирования задач. В совокупности все эти действия должны обеспечить выполнение требований, указанных в Соглашении о качестве обслуживания (Service Level Agreement – SLA).

В качестве метрик для оценки алгоритмов балансировки нагрузки могут рассматриваться [5, 7]:

- Использование процессорного времени (для центрального процессора – ЦП): общий процент времени, в течение которого процессор или процессоры использовались или не использовались. Также важно использование других ресурсов – памяти, пространства хранения, пропускной способности сети.
- Пропускная способность: количество выполненных на ВМ задач (или обслуженных запросов) за единицу времени.
- Пропускная способность линий связи. Количество данных, пересылаемых из одного узла другому.
- Масштабируемость: алгоритм должен эффективно работать независимо от увеличения/уменьшения количества задач и нагрузки, в том числе при пиковых нагрузках.
- Время отклика: время, необходимое для выдачи первого результата запроса. Сюда включается время ожидания, время передачи и время обслуживания. При оценке эффективности работы алгоритма балансировки может рассматриваться время отклика для балансировки – время от поступления запроса до начала выполнения первой команды обслуживания запроса на ЦП [5].
- Время ожидания: общее время, затраченное запросом на ожидание в очереди готовности после первого выполнения на ЦП.
- Время выполнения: общее время, затраченное на полное обслуживание запроса, включая время ответа, время ожидания и время обслуживания.
- Общее время выполнения набора задач (makespan), необходимое для выполнения всех задач набора, включая время распределения ресурсов пользователям в системе.
- Справедливость: принцип, согласно которому каждый запрос должен получать равную долю процессорного времени.
- Отказоустойчивость (надежность): балансировка нагрузки должна работать вне зависимости от отказа некоторых элементов системы. Если одна ВМ становится недоступной по причине отказа или перегруженности, другая доступная ВМ должна иметь возможность выполнять задачи.
- Стоимость ресурсов: общая стоимость ресурсов, приобретенных или используемых для обслуживания запросов различными потребителями облака.
- Сопутствующие накладные расходы: объем затрат, образованных при выполнении алгоритма балансировки нагрузки.
- Время миграции: это общее время, необходимое для миграции задачи с одной ВМ на другую. Процесс миграции не должен влиять на доступность системы. Чем ниже время миграции, тем лучше будет общая производительность системы и производительность алгоритма балансировки нагрузки.
- Нарушение Соглашения о качестве услуг (Service Level Agreement – SLA: количество нарушений SLA с точки зрения ограничения сроков, приоритетов и т.

д. Нарушения SLA происходят из-за ситуаций, когда ресурсы недоступны из-за перегруженности VM.

- Энергоэффективность и снижение углеродного следа – алгоритм балансировки не должен приводить к значительному повышению потребления электроэнергии, и, следовательно, увеличению углеродного следа.

Эти критерии могут использоваться при оценке алгоритма балансировки нагрузки как на реальных облачных системах, так и при моделировании облачных и распределенных систем.

Статические алгоритмы балансировки нагрузки

Циклический алгоритм – Round Robin (RR). Балансировщик поддерживает список доступных виртуальных машин в виде циклической очереди и выделяет для обслуживания поступившего запроса первую VM в очереди, затем следующему и т.д. При достижении конца списка указатель очереди перемещается на первый элемент списка. По этому принципу, например, работают серверы DNS. Так как первая в очереди VM была назначена для обслуживания какое-то время назад, велика вероятность того, что она к этому моменту выполнила все задачи и является наименее загруженной. Но, конечно, это верно не всегда, возможно, задача или задачи, назначенные ранее, требуют больших затрат вычислительных ресурсов и времени, и эта VM в данное время как раз перегружена. Алгоритм лучше всего работает для схожих по характеристикам VM и однотипных задач. Главное достоинство алгоритма – простота и легкость реализации. Основной недостаток – требует предварительной информации о задачах пользователя и ресурсах, не принимает во внимание текущее состояние системы, серверы и VM не отличаются по характеристикам [2, 5]. Существует также циклический алгоритм RR для планирования заданий на одной машине, его также называют алгоритмом с разделением времени, это один из самых распространенных алгоритмов планирования. Каждой задаче для выполнения выделяется один квант времени, по истечении которого задача вытесняется, происходит смена контекста и на исполнение идет другая задача. Этот алгоритм может применяться в VM, но не является алгоритмом балансировки.

Циклический алгоритм с весами – Weighted Round Robin (WRR). Циклический алгоритм с весами (WRR) отличается от традиционного RR тем, что каждому узлу присваивается вес в зависимости от его характеристик, и для обслуживания запроса выбирается VM с наибольшим весом из следующей в очереди. Таким образом повышается загруженность более производительных VM, а VM с низкой производительностью становятся не перегруженными. Разрабатываются гибридные алгоритмы с использованием WRR, например, в [8] предлагается эффективный алгоритм балансировки нагрузки, основанный на комбинации WRR и Max-Min (WmaxMin), сокращающий время ожидания и время отклика. Он использует Max-Min для выбора задачи с максимальным временем обработки и назначает ее VM, имеющей самые высокие возможности обработки. В [9] предложен метод, учитывающий приоритеты запросов. Исходный балансировщик нагрузки разделяет запросы на обычные и срочные. Каждая VM отправляет свой вес балансировщику,

чтобы определить количество запросов, которые могут быть распределены на нее. Этот подход имеет ограничение на большое время выполнения по сравнению с WRR и предполагает, что все запросы имеют одинаковый уровень приоритета.

Алгоритмы Min-Min и Max-Min. Алгоритм Min-Min (MM) так же, как и Max-Min алгоритм, использует для планирования время выполнения задачи и скорость обработки процессора [10]. Min-Min задачу с наименьшим временем выполнения направляет на самый «быстрый» ресурс. В этом случае более «длинные» задачи могут долго находиться в очереди ожидания («голодать») из-за того, что приоритет отдается более мелким задачам. Из-за того, что всегда выбирается ресурс с минимальным временем исполнения, невзирая на то, занят он или нет, может возникнуть дисбаланс нагрузки. Max-Min алгоритм, наоборот, отправляет на самый быстрый ресурс наиболее «крупную» задачу с максимальным временем выполнения. Если количество «мелких» задач превышает количество «крупных», Max-Min алгоритм выглядит предпочтительнее, однако при большом количестве «крупных» задач общая пропускная способность системы может пострадать.

Алгоритм учета ресурсов – Resource Aware Scheduling Algorithm (RASA). Этот алгоритм сочетает функции алгоритмов Max-Min и Min-Min. Алгоритмы Max-Min и Min-Min один за другим применяются в соответствии с количеством доступных ресурсов, если количество ресурсов четное, тогда применяется Max-Min, иначе применяется Min-Min алгоритм. В [10] предложен Resource Aware Min-Min (RAMM) алгоритм, который ведет учет ресурсов и их состояний «доступно/занято», и, если ресурс с минимальным временем исполнения занят, выбирается самый быстрый ресурс из оставшихся.

Динамические алгоритмы балансировки нагрузки

Алгоритм минимума соединений – Least Connections Algorithm. Запрос направляется на узел с наименьшим количеством активных соединений. Для этого нужно поддерживать список узлов с количеством активных соединений и периодически обновлять его. Может применяться при принятии решения, в какой ЦОД запрос будет направлен для обслуживания [2, 11].

Регулируемый алгоритм балансировки нагрузки – Throttled Algorithm. Запрос пользователя отправляется контроллеру центра обработки данных (Data Center Controller – DCC). Контроллер ЦОД обращается к балансировщику нагрузки для поиска VM, которая может справиться с данной рабочей нагрузкой. Балансировщик поддерживает список виртуальных машин и их статус «доступна/занята». Если подходящая VM найдена (по производительности ядер ЦП, объему памяти, доступности), балансировщик принимает запрос на обслуживание и направляет задачу выбранной VM. Если же подходящая VM не свободна, задача отправляется в очередь до тех пор, пока подходящая VM не станет доступной [12, 13]. Этот подход хорош для балансировки нагрузки, поскольку он рассматривает текущее состояние всех VM в ЦОД. Основным недостатком является то, что он работает правильно только в том случае, если все виртуальные машины в центре

обработки данных имеют одинаковую конфигурацию оборудования, не принимает во внимание время обработки. Существует множество модификаций этого алгоритма [5].

Алгоритм балансировки нагрузки с равным распределением – Equally Spread Current Execution (ESCE). Его также называют методом расширения спектра (Spread Spectrum technique), так как он «расширяет», распределяет нагрузку по различным узлам. Размер задачи определяет ее приоритет, балансировщик направляет задание на ВМ с небольшой нагрузкой случайным образом. Балансировщик поддерживает список ВМ в виде хэш-таблицы, с ключом-идентификатором ВМ и значением – количеством выполняющихся задач. Запросы пользователей поступают в очередь заданий. Балансировщик проверяет очередь заданий и список ВМ. Если какая-либо ВМ свободна, а в очереди есть задание, запрос направляется ей. Если же какая-либо ВМ оказывается перегруженной, балансировщик перемещает часть нагрузки на незанятую или недогруженную ВМ. При завершении запроса ВМ сообщает об этом балансировщику, так как таблица ВМ должна постоянно обновляться. Главный недостаток – высокие вычислительные и коммуникационные затраты для обновления таблицы ВМ [6].

Гибридные алгоритмы (TA+ESCE). Знание состояний виртуальных машин и выполняющихся на них приложений – две основные особенности алгоритмов TA и ESCE. Если объединить эти функции, алгоритм планирования становится более эффективным, а нагрузка распределяется более равномерно и справедливо. В [14] для уменьшения времени отклика в ЦОД предлагается гибридный балансировщик (TA & ESCE), который ведет хэш-таблицу ВМ и запросов и ищет доступную виртуальную машину. Но если ВМ заняты (при использовании TA запрос отправляется в очередь), используется ESCE – задача назначается ВМ с наименьшей нагрузкой. Похожий подход описан в [15]. Балансировщик в случае занятости ВМ не помещает задание в очередь, а создает новую ВМ. Оба алгоритма уменьшают время отклика, но не принимают во внимание миграцию ВМ. Другие подходы используют пороговое значение нагрузки или состояние ВМ для перемещения части нагрузки на недогруженные машины, а в некоторых случаях создают новую ВМ для размещения задачи [5].

Бионические алгоритмы балансировки

Исследования социальных животных и социальных насекомых со сложным коллективным поведением привели к созданию ряда вычислительных моделей коллективного интеллекта роя. Этот тип алгоритмов балансировки относится к классу метаэвристических алгоритмов [16], которые дают практически приемлемое решение задачи оптимизации в условиях недостаточной или ограниченной вычислительной мощности. Методы могут быть как относительно простыми, так и очень сложными и требующими высоких вычислительных мощностей. В этой области в последние годы проводится много исследований и экспериментов.

Алгоритм сбора меда – Honey Bee algorithm. Пчелы-разведчицы разлетаются в поисках нектара, если найдут – летят в улей и сообщают другим пчелам. Рабочие пчелы

летят в найденные места и уточняют местоположение источника и собирают нектар [17]. Если сопоставить улью — ЦОД (или несколько, если речь идет о выборе ЦОД), пчеле — задачу (с учетом приоритетов), цветку (источнику нектара) — VM, процессу поиска нектара — загрузку задачи на VM, можно использовать алгоритм поиска меда для поиска подходящей VM. Недостатком алгоритма является высокое время ожидания для задач с низким приоритетом. Создано множество реализаций и модификаций этого алгоритма, а также гибридных алгоритмов на его основе [5].

Алгоритм оптимизации колонии муравьев (Муравьиный алгоритм) – Ant Colony Optimization Algorithm. Этот алгоритм основан на поведении муравьев при поиске пищи. Муравьи беспорядочно исследуют окрестности в поисках пищи и, если находят, возвращаются в колонию, помечая путь феромоном (химическое вещество, которое воспринимают другие муравьи). Другие муравьи, пересекая эту тропу, с большой вероятностью последуют по этому пути и, если найдут пищу, также будут помечать ее. Таким образом, наиболее удачные тропы будут помечены большим количеством феромона. Феромон испаряется со временем, поэтому более короткий путь будет больше помечен [18, 19]. Применение муравьиного алгоритма и гибридные алгоритмы обсуждаются в [5, 18-20].

Алгоритм оптимизации роя частиц – Particle Swarm Algorithm. Использует социальное поведение скоплений живых существ в природе, например, стремительный полет группы летающих существ или быстрые перемещения стаи рыб с резким изменением направления движения всей стаи – часто кажется, что ими кто-то управляет, настолько «разумно» поведение. Каждая особь является частицей. Частицы ищут цель с заданной скоростью (стая уток в поисках пищи), стараясь не сталкиваться и держась на равном расстоянии друг от друга. Поскольку частицы изменяют и обновляют ситуацию относительно себя и своих соседей, алгоритм может выполнять как локальный, так и глобальный поиск. В алгоритме рой составляют возможные решения – частицы, оптимум находится путем перемещения частиц в пространстве поиска, что описывается простыми математическими формулами [21]. Определяется лучшая найденная локальная позиция, а также лучшие найденные позиции в пространстве поиска, они обновляются как лучшие позиции, а затем их находят другие частицы. Ожидается, что это переместит рой к лучшим решениям. Перемещения подчиняются принципу наилучшего найденного в этом пространстве положения, которое постоянно изменяется при нахождении частицами более выгодных положений. Алгоритм роя частиц широко применяется в задачах машинного обучения. В [5] обсуждаются различные реализации и модификации этого алгоритма.

Генетический алгоритм – Genetic Algorithm (GA). Основан на процессе естественного отбора в природе. Генетические алгоритмы служат главным образом для поиска решений в многомерных пространствах поиска. [22]. Решение задачи представляется в виде набора генов – генотипа. Ген может быть битом или числом. Создается набор генотипов — начальная популяция. Состояние генотипа оценивается с точки зрения его «приспособленности» с помощью функции приспособленности (fitness-функции).

Выбираются наиболее приспособленные особи (этап Отбора или Селекции), и проводится Скрещивание (Crossover) и Мутация (изменение), и получается новое поколение решений. Процесс повторяется, пока не будет найдено решение [23]. Алгоритм усложняется при увеличении пространства поиска, что делает его затратным по времени.

Алгоритм с использованием модульного анализа производительности на основе исчисления реального времени

В [24] был предложен метод оценки производительности облачных приложений с использованием математического моделирования (ИРВ) – модульный анализ на основе исчисления реального времени (МА-ИРВ). Для проведения модульного анализа производительности с ИРВ (МА-ИРВ) необходимо построить абстрактную модель производительности, включающую модель нагрузки, модель обслуживания и модель обработки. Модель должна включать сведения о доступных вычислительных и коммуникационных ресурсах, о приложениях и об архитектуре самой системы. Реальная система представляется в виде абстрактных аналитических компонент (ИРВ-компоненты). Компоненты обработки – это ВМ. Для каждого ресурса на основе его характеристик и дисциплины обслуживания строятся кривые обслуживания. Ресурсная модель собирает информацию о доступных ресурсах обработки, включенных в обработку запросов и о распределении задач по этим ресурсам. Также рассматриваются характеристики потока событий, входящих в систему (запросов клиентов, запросов на обслуживание от сервера приложений к серверу баз данных), которые описываются их кривыми поступления. Используя аналитический фреймворк ИРВ, мы можем вычислить максимальную задержку на одном ресурсе и максимальную задержку при прохождении потока событий через несколько ресурсов обработки (для многоуровневых приложений). Обработка представляется как преобразование кривых поступления и обслуживания в выходные. ИРВ позволяет получить выходные кривые из входных с помощью уравнений. Таким образом могут быть получены значения жесткого реального для времени обслуживания потока запросов и размера очереди. В [24] предлагается использовать МА-ИРВ в мониторинге облачных систем (рис. 1).

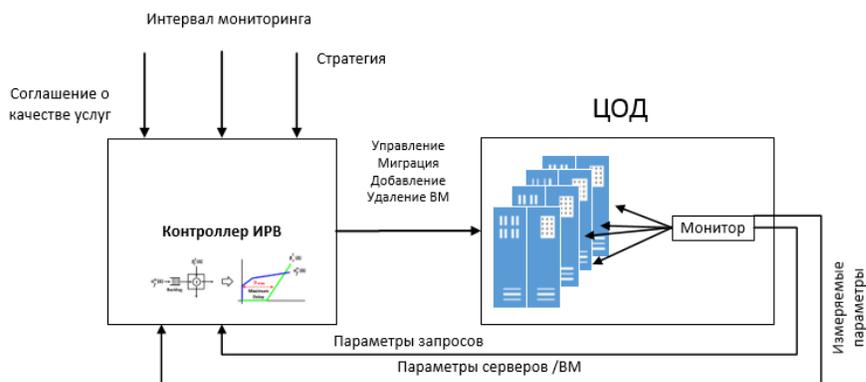


Рис.1. Мониторинг облака с на основе ИРВ

Все параметры, необходимые для построения ИРВ-модели, собираются в процессе мониторинга, контроллер ИРВ анализирует текущее состояние, и, если время обработки запросов и/или размер очереди выходит за заданные предельные величины, производится управляющее воздействие – добавление, удаление или миграция ВМ. Таким образом, система динамически адаптируется к изменениям.

Моделирование облачной информационно-измерительной системы с учетом балансировки нагрузки

Моделирование облачной системы с использованием балансировщика нагрузки позволяет провести модельные эксперименты с различными параметрами при проектировании для выбора оптимальной политики балансировки. Практически во всех рассмотренных работах эффективность работы алгоритма балансировки проверялась с помощью инструмента моделирования Cloudanalyst, который был разработан как средство визуализации на основе пакета моделирования облачных и распределенных систем CloudSim [25], построенного на основе GridSim. В инструменте реализованы алгоритмы (политики) балансировки нагрузки на уровне ЦОД - Round Robin, Equally Spread Current Execution Load и Trottled. Возможна разработка собственных модулей балансировки нагрузки для проведения экспериментов с другими алгоритмами. В работах [2, 7-10, 12-15, 18, 20, 21] рассматривается использование инструмента Cloudanalyst для моделирования работы ЦОД с различными политиками балансировки нагрузки.

Однако этот инструмент не позволяет моделировать работу облачных информационно-измерительных систем (ОИИС), которые имеют разные типы нагрузки, что должно быть учтено при моделировании:

- нагрузка от беспроводных сенсорных сетей (БСС) и отдельных датчиков, это предсказуемая нагрузка с известным временем и объемом трафика. Для балансировки приема данных могут применяться статические алгоритмы;
- нагрузка от виртуальных датчиков, предсказуемая, но меняющаяся;
- нагрузка от пользователей веб-портала.

Это означает, что и в системе, и в модели должны быть реализованы три вида балансировщиков нагрузки, реализующих разные политики балансировки. В [26] описана модель простого ЦОД для ОИИС, создаваемая с помощью пакета моделирования распределенных систем Simgrid. Модель содержит следующие компоненты:

- хост Sensor;
- хост Координатор (Gateway). Управляет подсоединенными датчиками (модулями), собирает сенсорную информацию, возможно, частично обрабатывает ее и передает в облако, на облачную станцию;
- хост Облачная Станция (Cloud Station) – собирает сенсорную информацию, а также информацию о состоянии датчиков с подсоединенных координаторов и перенаправляет по назначению – на виртуальные датчики или серверы хранения;
- хост Сервер Хранения;
- виртуальная машина.

Для моделирования балансировки нагрузки добавляются следующие компоненты:

- хост DCController (контроллер ЦОД, координирует всю работу ЦОД) ;
- хост LoadBalancer (балансировщик нагрузки) собирает и анализирует данные мониторинга и обращается к модулю расчета;
- программный модуль расчета для алгоритма балансировки (например, контроллер ИРВ на рис.1);
- агент – программный модуль для сбора информации о текущем состоянии ВМ (мониторинга), загружается на ВМ при создании;
- генератор нагрузки на веб-сервере, нагрузка от физических и виртуальных датчиков генерируется соответствующими хостами и ВМ;
- база данных пользователей – содержит информацию о расположении и активности пользователей (часы активности, объем трафика на запрос).

Так как предполагается, что модель будет использоваться для тестирования эффективности работы различных алгоритмов, модули расчета должны легко подключаться и иметь стандартный интерфейс, в идеале также подходящий для включения в модель Cloudanalyst, что позволит быстрее проверить работу алгоритма и сравнить с результатами уже проведенных тестов.

Для создания модели ОИИС должны быть выполнены следующие задачи:

1. Создание программных модулей для компонент модели, включая коммуникации.
2. Создание программных модулей для осуществления облачного мониторинга.
3. Создание программных модулей для осуществления и учета миграции задач и ВМ.
4. Выбор алгоритмов балансировки для разных типов балансировщиков и создание программных модулей для их реализации.
5. Создание программных модулей для генерации потоков запросов в соответствии с базами пользователей, потоков запросов с заданными характеристиками.
6. Создание программных модулей сбора и обработки данных эксперимента.
7. Создание программных модулей для визуализации результатов эксперимента.
8. Создание графического интерфейса пользователя для задания конфигурации модели и параметров эксперимента.

Часть этих задач может быть выполнена с помощью пакета моделирования Simgrid, часть должна быть разработана как самостоятельные модули, которые могут быть использованы для других целей и в других моделях.

Заключение

Задача балансировки нагрузки в облачных системах является одной из важнейших в этой области, проводится огромное количество исследований, создано множество алгоритмов балансировки. В статье очень коротко рассматриваются лишь некоторые из алгоритмов балансировки нагрузки в облачных средах, особый интерес представляет алгоритм с использованием исчисления реального времени, информации о его тестировании еще нет в литературе. Представленный обзор проводился прежде всего с целью выбора алгоритмов, которые планируется реализовать и тестировать в создаваемой модели

облачной ИИС для разных типов балансировщиков. Рассмотрены вопросы построения модели облачной ИИС с учетом балансировки нагрузки и миграции ВМ и поставлены задачи развития создаваемой модели.

Литература

1. Q. Zhang, L. Cheng, R. Boutaba, "Cloud Computing: state of the art and research challenges", Journal of Internet Services and Applications. – Vol. 1, No. 1. –April 2010, p.7–18.
2. S.K.Mishra, B. Sahoo, P.P. Parida. Load balancing in cloud computing: A big picture., J. King Saud Univ. – Comput Inf. Sci.,32 (2) (2020), p.149–158, URL:10.1016/j.jksuci.2018.01.003(дата обращения: 10.06.2021)
3. S.K. Mishra, D. Puthal, B. Sahoo, S.K. Jena, M.S. Obaidat. An adaptive task allocation technique for green cloud computing., J. Supercomput. (2017), p. 1–16.
4. Дворников В.С., Долгов В.В., Венцов Н.Н. Обзор методов балансировки нагрузки в гетерогенных распределенных файловых системах // Фундаментальные исследования, 2017. – № 9–2. – С. 295–302; URL: <http://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=41743> (дата обращения: 10.06.2021).
5. Dalia Abdulkareem Shafiq, N.Z. Jhanjhi, Azween Abdullah. Load balancing techniques in cloud computing environment: A review. // Journal of King Saud University–Computer and Information Sciences, 2021; URL: [10.1016/j.jksuci.2021.02.007](https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.02.007) (дата обращения: 10.06.2021).
6. Thakur, M.S. Goraya. A taxonomic survey on load balancing in cloud. Netw. Comput. Appl., 98 (September) (2017), URL: [10.1016/j.jnca.2017.08.020](https://doi.org/10.1016/j.jnca.2017.08.020)(дата обращения: 10.06.2021).
7. S. Mishra, R. Tondon. A shared approach of dynamic load balancing in cloud computing.,Int. J. Sci. Res. Sci. Eng. Technol., 2(2) (2016), p.632– 638.
8. B. Khatavkar, P. Boopathy. Efficient WMaxMin static algorithm for load balancing in cloud computation. Int. Conf. Innov. Power Adv. Comput. Technol., i-PACT2017 (2017), p. 1–6, [10.1109/IPACT.2017.8245166](https://doi.org/10.1109/IPACT.2017.8245166).
9. S. Manaseer, M. Alzghoul, M. Mohmad. An advanced algorithm for load balancing in cloud computing using MEMA technique. Int. J. Innov. Technol. Explor. Eng., 8 (3) (2019), p. 36–41.
10. Arshad Ali, S., Member, S., Alam, M., 2019. Resource Aware Min-Min (RAMM) Algorithm for Resource Allocation in Cloud Computing Environment, 3, p. 1863–1870 doi: [10.35940/ijrte.C5197.098319](https://doi.org/10.35940/ijrte.C5197.098319).
11. URL: <https://www.ibm.com/docs/en/datapower-gateways/10.0.1?topic=groups-algorithms-making-load-balancing-decisions> (дата обращения: 06.06.2021).
12. Durgesh Patel, Mr. Anand S Rajawat, "Efficient Throttled Load Balancing Algorithm in Cloud Environment", International Journal of Modern Trends in Engineering and Research. – p. 463 – 480, 2015.

13. Десятирикова Е.Н., Хадж Али Муса, Ходар Алмосана, Алькади Усама, Раджаб Хаян. Балансировка нагрузки в облачных вычислениях. – Вестник ВГТУ, 2017. – №3. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razrabotka-modeli-dlya-uluchsheniya-planirovaniya-zadach-v-oblachnyh-vychisleniyah-na-osnove-optimizatsii-roya-chastits> (дата обращения: 06.07.2021).
14. R. Sachdeva, S.Kakkar. A Novel Approach in Cloud Computing for Load Balancing Using Composite Algorithms. Int. J. Adv. Res. Comput. Sci. Softw. Eng., 7(2) (2017). – p.51– 56, 10.23956/ijarcsse/v7i2/0119.
15. S. Subalakshmi, N. Malarvizhi. Enhanced hybrid approach for load balancing algorithms in cloud computing. Int. J. Sci. Res. Comput. Sci. Eng. Inf. Technol., 2 (2) (2017), p.136–142.
16. <https://wikiboard.ru/wiki/Metaheuristic>
17. B.Yuce, M.S.Packianather, E.Mastrocinque, D.T.Pham, A.Lambiase/ Honey bees inspired optimization method: the Bees algorithm // Insects, 4(4)(2013), p.646 – 662, URL:10.3390/insects4040646.
18. P.Verma, S.Shrivastava, R.K.Pateriya. Enhancing Load Balancing in Cloud Computing by Ant Colony Optimization Method // Int. J. Comput. Eng. Res. Trends, 4(6) (2017), p.277–284, 10.23883/ijrter.2018.4101.ss6y8(дата обращения: 11.06.2021).
19. Конников П. В., Кудинов В. А. Оптимизация методом муравьиной колонии как метаэвристика // Ученые записки. – Электронный научный журнал Курского государственного университета, 2008. – №4. URL:<https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-metodom-muravinoy-kolonii-kak-metaevristika> (дата обращения: 11.06.2021).
20. Kumar, R., Prashar, T., 2015. Performance Analysis of Load Balancing Algorithms in Cloud Computing, Int. J. Comput. Appl. (0975 – 8887), 120(7), p. 19–27.
21. Parmesivan, Y.A.P., Hasan, S., Muhammed, A., 2018. Performance Evaluation of Load Balancing Algorithm for Virtual Machine in Data Centre in Cloud Computing, Int. J. Eng. Technol., 7(4.31), p. 386–390.
22. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Генетический_алгоритм (дата обращения: 11.06.2021)
23. Gandhi, R., Genetic Algorithms – Data Driven Investor – Medium,” 12-May-2018. URL: <https://medium.com/datadriveninvestor/genetic-algorithms-9f920939f7cc>. (дата обращения: 11.06.2021).
24. Гарай Г.Р., Черных А., Дроздов А.Ю. Сравнительный анализ методов оценки производительности многоуровневых облачных приложений. Труды ИСП РАН. – Том 27.– Вып. 6, 2015 г. – Стр. 199–224. DOI: 10.15514/ISPRAS-2015-27(6)-14
25. URL: <http://www.cloudbus.org/cloudsim/>. (дата обращения: 11.06.2021).
26. Гайдамако В.В. Моделирование облачной информационно-измерительной системы с помощью библиотеки Simgrid // Проблемы автоматизации и управления. –Бишкек: Илим, №1 (36), 2019. – С.90–99.

УДК 004.89

Н.М. Лыченко, nlychenko@mail.ru

А.В. Сороковая nastusha24sh-g@yandex.com

Институт машиноведения и автоматизации НАН КР, Бишкек, Кыргызстан

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КЛАССОВ ИНДЕКСА КАЧЕСТВА ВОЗДУХА Г. БИШКЕКА С УЧЕТОМ НОВЫХ ДАННЫХ 2020 – 2021 ГГ. НА БАЗЕ LSTM-НЕЙРОСЕТЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА

Разработаны прогнозные модели индекса качества воздуха AQI г. Бишкека на основе классификаторов на базе LSTM-сети. Модели позволяют в зависимости от метеорологических условий и предшествующей истории значений AQI прогнозировать класс AQI из возможных четырех интегрированных классов: $AQI \leq 50$ / $50 < AQI \leq 100$ / $100 < AQI \leq 150$ / $AQI > 150$. Прогноз возможен до четырех суток вперед с точностью не менее 77%.

Ключевые слова: классификация, индекс качества воздуха, LSTM-нейронная сеть, точность прогноза

Введение. Основываясь на данных об уровне загрязненности атмосферного воздуха города Бишкека, публикующихся на сайте «AirNow» [1] с февраля 2019 г., были разработаны различные модели прогноза уровня загрязненности воздуха, основные особенности и возможности которых представлены в [2]. Одна из этих моделей – модель среднесрочного прогноза класса индекса качества воздуха (Air Quality Index, AQI [3]) по метеорологическим данным и предшествующей истории значений AQI представлена в [4]. В этой работе задача прогноза AQI была сформулирована как задача прогноза класса AQI в соответствии с принятой международной классификацией [3], и были показаны возможности прогнозирования различных нейросетевых классификаторов, таких, как многослойный перцептрон, обычная рекуррентная сеть и LSTM-сеть (Long Short-Term Memory). Наилучшую точность в прогнозировании класса AQI показала LSTM-сеть. Объем располагаемых авторами данных позволил произвести классификацию AQI лишь по двум интегрированным классам, условно названных: «Хороший» ($AQI \leq 100$) и «Нездоровый» ($AQI > 100$). Представленные в [4] вычислительные эксперименты с LSTM-сетью показали, что «лучшую точность прогнозирования дал классификатор, учитывающий историю данных глубиной 12–16 шагов (1,5 – 2 дня), при этом прогноз AQI возможен до 4 дней вперед с точностью 88–90%» [2].

За время, прошедшее после написания работы [4], накопились новые данные, позволившие увеличить объем обучающей выборки, что в свою очередь дало возможность поставить задачу классификации AQI на большее число классов.

В настоящей работе изложены результаты прогнозирования AQI г. Бишкека на основе построенных классификаторов на базе LSTM-сети, позволяющих производить прогноз класса AQI из возможных трех и четырех интегрированных классов, а также обладающих улучшенными обучающими свойствами.

Модель LSTM-классификатора. В работе [4] для решения задачи прогнозирования была выбрана LSTM-сеть, которая учитывает исторические данные и оценивает их в зависимости от временного удаления вектора входа до прогнозируемого выхода [5].

Структура нейросетевого классификатора аналогична LSTM-сети, выбранной в [4]:

1. Входной слой, который принимает последовательность векторов признаков длиной S .
2. Первый скрытый слой – слой прямого распространения с числом нейронов 100 и тангенциальной функцией активации, отображает входные векторы в векторы большей длины, для дальнейшего внесения шума в данные.
3. Второй скрытый слой – слой регуляризации, который меняет некоторый процент значений выхода предыдущего слоя для предотвращения переобучения (вносит шумы).
4. Третий скрытый слой – LSTM-сеть с 50-нейронными модулями и тангенциальной функцией активации как основной классифицирующий слой.
5. Четвертый скрытый слой – слой прямого распространения с числом нейронов 10 и тангенциальной функцией активации.
6. Выходной слой – слой с количеством нейронов, соответствующим числу прогнозируемых классов и функцией активации *SOFTMAX*. Функция взвешивает входы и предсказывает вероятности активации каждого нейрона. При этом сумма выходов нейронов всегда равна 1.

Все слои сети полносвязные, т.е. каждый нейрон имеет связь с каждым предыдущим нейроном, а для рекуррентных слоев (LSTM-сеть) каждый вход слоя также связан с каждым выходом слоя [4].

Входной вектор классификатора включает в себя по меньшей мере 6 параметров – температуру воздуха, температуру точки росы, атмосферное давление на уровне станции, относительную влажность, скорость ветра, значение AQI. Входные данные обрабатываются и нормализуются перед подачей на вход нейронной сети.

Выходной вектор, к которому должен приближаться выход классификатора, определяется параметрами, характеризующими вероятность отнесения выхода классификатора к соответствующему классу.

Для остановки обучения классификатора используется порог изменения функции потерь: если на протяжении 20 эпох функция потерь меняется меньше чем на 0,01, обучение прекращается [6].

При проведении вычислительных экспериментов по прогнозированию класса AQI варьировались следующие параметры:

- S – длина последовательности векторов исторических данных входных векторов классификатора;
- P – глубина прогноза (на сколько шагов вперед прогнозируется AQI). Шаг прогноза – 3 часа.

Для каждого эксперимента подготовлены 2 файла с историческими наблюдениями AQI [1] и историческими наблюдениями погодных условий (температура воздуха,

температура точки росы, атмосферное давление на уровне станции, относительная влажность и скорость ветра [7]). Программная система считывает данные, соотнося их по времени, нормализует данные по заданной функции нормализации, по заданным S и P генерирует все возможные последовательности входных векторов длиной S и сопоставляет им значения AQI в моменты времени, удаленные на P шагов от момента последних значений этих последовательностей. Группы входных признаков сбалансированы: из выборки примеров каждого класса случайным образом выбрано такое же количество примеров, которое содержится в наименьшей выборке.

Для оценки точности классификатора (по сути точности прогнозирования), так же, как в [4], формируются матрицы ошибок, а затем вычисляются соответствующие метрики (1–3) [8]. Матрица ошибок A – матрица размера $n * n$, где n – количество классов, представленных в выборке. Элемент матрицы A_{ij} содержит значение, показывающее, сколько раз классификатор определил класс j как класс i .

На основе матрицы ошибок вычисляются:

- точность в пределах класса – доля объектов, действительно принадлежащих классу относительно числа объектов, которые классификатор определил к этому классу:

$$precision_c = \frac{A_{c,c}}{\sum_{i=1}^n A_{c,i}} \quad (1)$$

- полнота в пределах класса – доля объектов, определенных классификатором к классу, относительно всех документов, действительно принадлежащих этому классу:

$$recall_c = \frac{A_{c,c}}{\sum_{i=1}^n A_{i,c}} \quad (2)$$

Затем вычисляется метрика, объединяющая точность и полноту, так называемая F-мера, которая и характеризует точность классификации (точность прогнозирования):

$$F = \frac{2 * precision * recall}{precision + recall} \quad (3)$$

Анализ и нормализация данных. Для улучшения обучающих свойств сети были проанализированы метеорологические признаки (факторы) с 06.02.2019 до 31.03. 2020 года. Как оказалось, не все признаки распределены нормально. На рисунках 1-2 показаны распределения значений температуры и температуры точки росы в указанный период.

Как видно, распределения температуры и точки росы имеют по два явных пика, что указывает на биномиальное распределение, характеризующееся суперпозицией двух нормальных распределений. Предположительно эти распределения соответствуют двум сезонам – холодному (с ноября по март) и теплomu (с апреля по октябрь). Исходя из этого предположения, была проведена декомпозиция данных температуры и температуры точки росы по сезонам (рисунки 3,4,5,6). При визуальной оценке графиков можно считать, что указанные параметры распределены нормально внутри одного сезона. Это позволит применить Z-норму для нормализации данных при формировании соответствующих входных векторов классификатора.

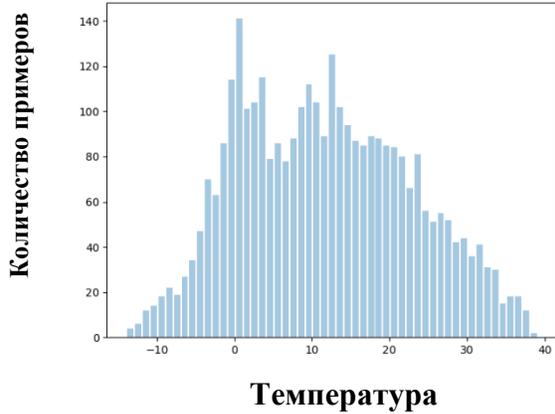


Рис. 1. Распределение значений температуры

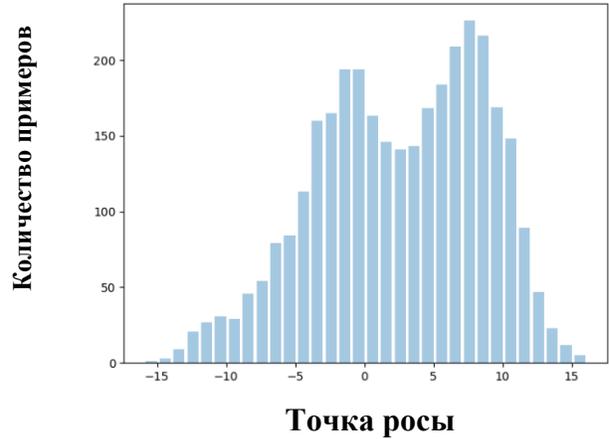


Рис. 2. Распределение значений температуры точки росы

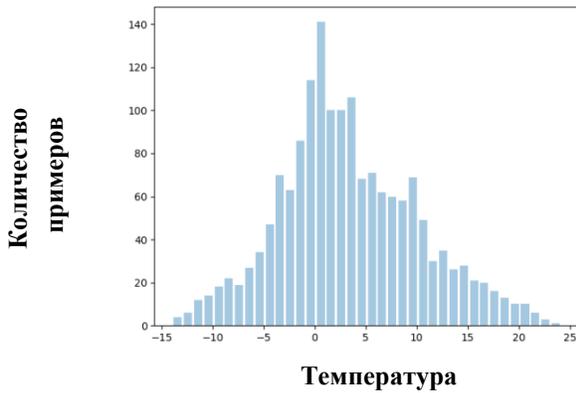


Рис. 3. Распределение значений температуры в холодный сезон года

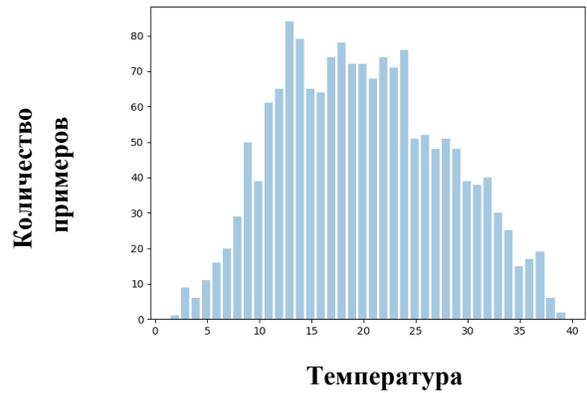


Рис. 4. Распределение значений температуры в теплый сезон года

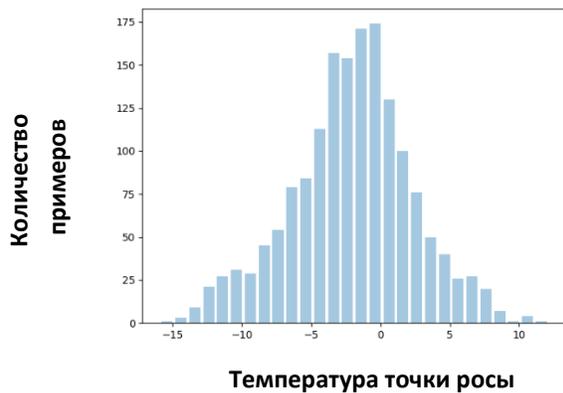


Рис. 5. Распределение значений температуры точки росы в холодный сезон года

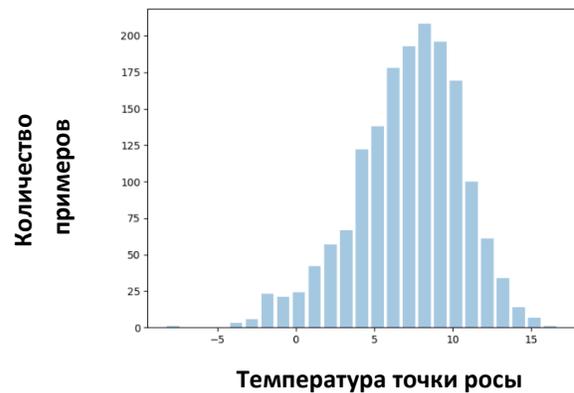


Рис.6. Распределение значений температуры точки росы в холодный сезон года

Распределение значений атмосферного давления на уровне станции весьма близко к нормальному. Этот признак также нормализуется с помощью Z-нормы. Для относительной влажности, которая принимает значения от 0 до 100 % (от 0 до 1 – в относительных единицах), нормализации не требуется. Скорость ветра принимает всего несколько дискретных значений, нормализовать их не имеет смысла.

Классификация AQI на три интегрированных класса. В связи с введением ЧП и карантина на территории г. Бишкека в период с конца марта 2020 года и напряженной обстановкой до августа 2020 года нагрузка на общественный транспорт была снижена, воздух был чище среднего в этот период года, что могло внести существенный шум в данные, используемые для обучения. Было решено не использовать для обучения данные за период с 1 апреля 2020 года до 30 июля 2020 года. Таким образом, классификация AQI на 3 интегрированных класса была выполнена для объединенного периода наблюдений, включающего периоды с 06/02/19 по 31/03/20 и с 01/08/20 по 22/11/20.

При анализе данных наблюдений AQI в указанный период было подсчитано количество наблюдений, указывающих на определенный класс AQI и их процентное соотношение (таблица 1 и рисунок 7(а)). Из анализа количества наблюдений следует,

Таблица 1. Распределение AQI по классам для объединенного периода наблюдений 06/02/19–31/03/20 + 01/08/20–22/11/20.

Класс AQI	Количество наблюдений	Относительная доля
Хороший	695	0,165
Умеренный	2406	0,572
Нездоровый для чувствительных групп	557	0,132
Нездоровый	456	0,108
Очень нездоровый	68	0,016
Опасный	23	0,005

что в подавляющем числе зафиксированы значения AQI класса “Умеренный”. Количества наблюдений для классов “Хороший”, “Нездоровый для чувствительных групп”, “Нездоровый”, “Очень нездоровый”, “Опасный” недостаточно для решения задачи классификации AQI по всем классам. Однако можно рассмотреть задачу классификации AQI на 3 объединенных класса: «Умеренный» (объединяет «Хороший» и «Умеренный»), «Нездоровый для чувствительных групп» и «Опасный» (объединяет «Нездоровый», «Очень нездоровый» и «Опасный») (рисунок 7(б)). При таком распределении данных, если всегда предсказывать “Умеренный” класс, то точность такого «наивного» прогноза составит примерно 74%. Значит, классификатор, прогнозирующий с точностью >74%, можно считать эффективным.

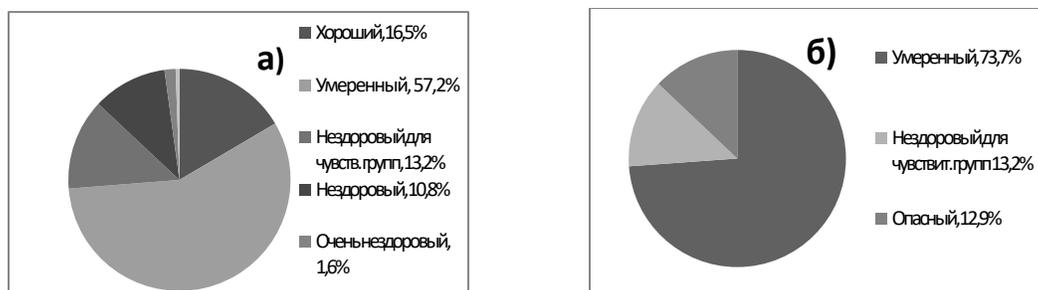


Рис. 7. Распределение наблюдений по классам AQI (а) и распределение наблюдений по трем интегрированным классам AQI (б) для объединенного периода 06/02/2019– 31/03/2020 и 01/08/2020 – 22/11/2020

За основу классификатора был взят представленный в [4] классификатор, в который был добавлен еще один выход, соответствующий добавленному классу. Таким образом, каждый выход указывает вероятностный прогноз для классов “Хороший”, “Нездоровый для чувствительных групп” и “Опасный” соответственно.

Для повышения точности прогноза и эффективности обучения сети учтена сезонность: каждый из входов температуры и точки росы расщепляется на 2 входа – в холодный период активируется один вход и на второй подается ноль, в теплый период – наоборот. При этом, поскольку границы сезонов примерно соответствуют моментам включения и выключения центрального отопления в городе Бишкека, за холодный период принят отопительный сезон, за теплый – неотопительный.

В таблице 2 представлены результаты классификации на 3 интегрированных класса. Из экспериментов видно, что только классификаторы, учитывающие историю данных глубиной 16 шагов (двое суток), дали точность прогноза более 74%.

Также в таблице 2 представлены результаты классификации для двух классов в сравнении с результатами, полученными ранее [4], а также с учетом сезонов и без их учета. Как следует из анализа таблицы, точность классификации на два класса с добавлением фактора «сезонность» несколько повысилась.

Матрица ошибок для одного из экспериментов $S=16$, $P=8$ представлена в таблице 3. Из таблицы 3 видно, например, что модель классифицировала как «Умеренный» класс: 83 случая AQI, в действительности принадлежащих «Умеренному» классу, 15 случаев AQI, принадлежащих классу «Нездоровый для чувствительных групп», 2 случая AQI, принадлежащих «Опасному» классу.

Таблица 2. F-мера точности моделей классификации на 2 и 3 класса в зависимости от длины последовательности входных векторов (S) и глубины прогноза (P).

S	P	2 класса F-мера	2 класса F-мера	2 класса F-мера	3 класса F-мера
		06/02/2019-31/03/2020 (без сезонов) [4]	06/02/2019-31/03/2020 (с сезонами)	06/02/2019-31/03/2020 01/08/2020-31/10/2020 (с сезонами)	06/02/2019-31/03/2020 01/08/2020-31/10/2020 (с сезонами)
2	2	0.8842	-	-	-
2	4	0.8696	0.8842	0.8823	0.6558
2	8	0.8617	0.8752	0.8715	0.6307
2	16	0.8408	0.8589	0.8530	0.5983
2	24	0.8615	0.8655	0.8636	0.6136
2	32	0.8387	0.8480	0.8511	0.6115
4	2	0.8748	-	-	-
4	4	0.8787	0.8953	0.8897	0.6939
4	8	0.8753	0.8890	0.8942	0.6620
4	16	0.8684	0.8828	0.8808	0.6521
4	24	0.8585	0.8899	0.8943	0.6435
4	32	0.8552	0.8816	0.8739	0.6466
8	2	0.8976	-	-	-
8	4	0.8924	0.9272	0.9147	0.7196
8	8	0.9011	0.9234	0.9206	0.7212
8	16	0.8955	0.9284	0.9303	0.6964
8	24	0.8889	0.9318	0.9265	0.7152
8	32	0.8824	0.9251	0.9163	0.6948
12	2	0.9018	-	-	-
12	4	0.9021	0.9317	0.9281	0.7302
12	8	0.9093	0.9284	0.9324	0.7176
12	16	0.8972	0.9261	0.9316	0.7239
12	24	0.8958	0.9331	0.9367	0.7387
12	32	0.8998	0.9375	0.9343	0.7553
16	2	0.9120	-	-	-
16	4	0.8885	0.9385	0.9320	0.7444
16	8	0.9085	0.9323	0.9389	0.7605
16	16	0.9051	0.9335	0.9344	0.7407
16	24	0.9083	0.9356	0.9396	0.7538
16	32	0.9115	0.9270	0.9332	0.7493

Таблица 3. Матрица ошибок модели с параметрами S=16, P=8.

		Ожидаемый класс		
		Умеренный	Нездоровый для чувств.	Опасный
Спрогнозированный класс	Умеренный	83	15	2
	Нездоровый для чувств.	10	56	16
	Опасный	2	42	75

В качестве визуализации процесса обучения на рисунке 8 представлены графики изменения точности (Accuracy) и функции потерь (Loss) в зависимости от номера эпохи обучения (epoch) сети с параметрами S=4, P=4 для обучающей (train) и тестовой (validation) выборки (пример классификации на 2 класса с сезонами).

Из графика видно, что процесс обучения плавно приближается к ожидаемому выходу, для достижения условия “функция потерь не изменяется более чем на 0,01 на протяжении 20 эпох” [6] потребовалось 35 эпох. Минимальная функция потерь на обучающих данных – 0,025. Максимальная точность на обучающих данных примерно

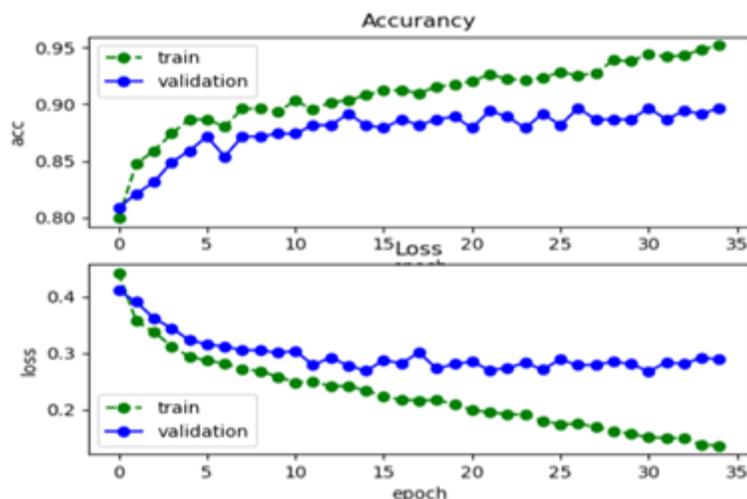


Рис. 8. Процесс обучения LSTM-сети с введенным режимом сезонности с параметрами S=4 и P=4

95%. Сравнивая эти показатели с полученными ранее [4], следует признать, что изменения в обработке данных показали свою эффективность.

Классификация AQI на 4 интегрированных класса. Дополнение наблюдений AQI за период с 23 ноября 2020 года по 31 марта 2021 (таблица 4, рисунок 9(a)) позволило рассмотреть задачу прогноза AQI как задачу классификации на 4 класса. Из анализа количества наблюдений следует, что по-прежнему недостаточно наблюдений для прогноза классов “Очень нездоровый” и “Опасный”. Поэтому эти классы интегрированы с классом «Нездоровый» в один класс «Опасный» (рисунок 9(б)). При таком распределении данных, если

всегда предсказывать “Умеренный” класс, то точность такого «наивного» прогноза составит примерно 49,4%. Значит, классификатор, прогнозирующий с точностью >50%, можно считать эффективным. У этого классификатора 4 выхода: вероятности классов «Хороший», “Умеренный”, “Нездоровый для чувствительных групп” и “Опасный”.

Таблица 4. Распределение AQI по классам для объединенного периода наблюдений 06/02/19–31/03/20 + 01/08/20–31/03/21.

Класс AQI	Количество наблюдений	Относительная доля
Хороший	865	0,151
Умеренный	2825	0,494
Нездоровый для чувствительных групп	762	0,133
Нездоровый	844	0,148
Очень нездоровый	275	0,048
Опасный	151	0,026

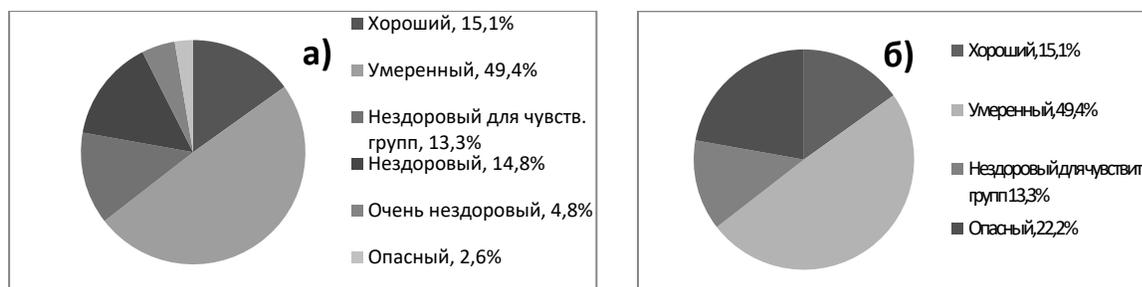


Рис. 9. Распределение наблюдений по классам AQI (а) и распределение наблюдений по трем интегрированным классам AQI (б) для объединенного периода 06/02/2019– 31/03/2020 и 01/08/2020 – 31/03/2021

В таблице 5 представлены результаты классификации AQI на 4 класса. Классификатор демонстрирует вполне приемлемую точность прогноза. Наилучшая точность $F=0,8$ соответствует глубине прогноза $P=8$ (то есть на одни сутки вперед), при этом необходимая «история» наблюдений $S=16$ (двое суток назад). Также в таблице приведены результаты классификации на 3 класса, соответствующих описанному в предыдущем параграфе, но на новой выборке данных. Как видно, наилучшую точность $F=0,777$ при этом показал вариант прогноза с глубиной $P=4$ (12 часов вперед) при истории наблюдений $S=12$ (36 часов назад). Повышение точности прогноза по сравнению с результатами, представленными в таблице 2, вполне объяснимо увеличением выборки наблюдений. Оба классификатора (и на 3 и на 4 класса) позволяют выполнять прогноз AQI на 4 суток вперед с точностью $F \cong 0.77$.

Таблица 5. F-мера точности модели прогнозирования четырех и трех классов AQI в зависимости от длины последовательности входных векторов (S) и глубины прогноза (P) для выборки наблюдений 06/02/2019–31/03/2020+01/08/2020–31/03/2021.

S	P	F-мера 3 класса	F-мера 4 класса
		06/02/2019- 31/03/2020+ 01/08/2020- 31/03/2021	06/02/2019- 31/03/2020+ 01/08/2020- 31/03/2021
8	4	0.7596	0.7641
8	8	0.7359	0.7449
8	16	0.7110	0.7286
8	24	0.7341	0.7270
8	32	0.7317	0.7139
12	4	0.7771	0.7669
12	8	0.7591	0.7728
12	16	0.7460	0.7571
12	24	0.7628	0.7556
12	32	0.7591	0.7456
16	4	0.7733	0.7895
16	8	0.7685	0.8007
16	16	0.7601	0.7773
16	24	0.7530	0.7772
16	32	0.7684	0.7733

Классификатор на 4 класса демонстрирует также приемлемые обучающие свойства. На рисунке 10 представлены графики изменения точности (Accuracy) и функции потерь (Loss) сети с параметрами S=16, P= 8. Заметим, что процесс обучения вполне отвечает рекомендациям, приведенным в [6].

Заключение. Таким образом, в работе показаны результаты разработки классификатора на 3 класса AQI (“Умеренный”/“Нездоровый для чувствительных групп” /“Опасный” (AQI≤100 / 100<AQI≤150/ AQI>150)) и классификатора на 4 класса AQI (“Хороший”/“Умеренный”/“Нездоровый для чувствительных групп” /“Опасный” (AQI≤50/ 50<AQI≤100 / 100<AQI≤150/ AQI>150)). Используемая при разработке выборка данных объединяет два периода наблюдений: 06/02/19–31/03/20 и 01/08/20–31/03/21. Прогноз AQI на 3 и 4 класса

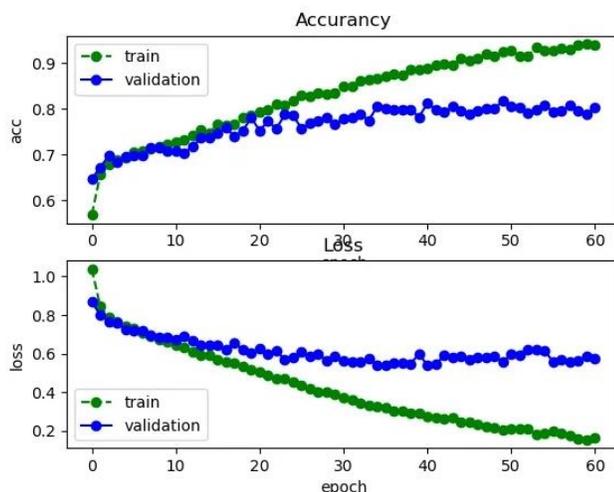


Рис.10. Процесс обучения LSTM-сети с параметрами S=16 и P=8, классифицирующей AQI на 4 класса

возможен до 4 дней вперед с точностью $\cong 77\%$. Дальнейшее увеличение истории наблюдений позволит прогнозировать классы с AQI >150.

Литература

1. AirNow Department of State // [https://airnow.gov/index.cfm?action=airnow_global_summary#U.S._Department_of_State_\\$Bishkek](https://airnow.gov/index.cfm?action=airnow_global_summary#U.S._Department_of_State_$Bishkek), (дата обращения: 30.04.2021).
2. Лыченко Н.М., Великанова Л.И., Верзунов С.Н., Сороковая А.В. Модели прогноза уровня загрязнения атмосферного воздуха г. Бишкека // Вестник КРСУ. – Т.24. – №4. – 2021. – С.87–95.
3. [Air Quality Index \(AQI\) - A Guide to Air Quality and Your Health](#). US EPA. 9 December 2011.
4. Лыченко Н.М., Сороковая А.В. Применение LSTM-нейронных сетей для классификации индекса качества воздуха г. Бишкека // Проблемы автоматизации и управления. 2020. – № 1 (38). – С. 70–80. DOI: 10.5281/zenodo.3904130
5. Understanding LSTM Networks. – URL: <http://colah.github.io/posts/2015-08-Understanding-LSTMs/>. (дата обращения 14.09.2020)
6. Курс CS231n: Convolutional Neural Networks for Visual Recognition. - URL: <https://cs231n.github.io/neural-networks-3/#baby> (дата обращения 01.09.2020)
7. Сайт «Расписание погоды rp5.ru» [Архив погоды в Бишкеке](#) https://rp5.ru/%D0%90%D1%80%D1%85%D0%B8%D0%B2_%D0%BF%D0%BE%D0%B3%D0%BE%D0%B4%D1%8B_%D0%B2_%D0%91%D0%B8%D1%88%D0%BA%D0%B5%D0%BA%D0%B5 (дата обращения: 30.04.2021)
8. Оценка классификатора (точность, полнота, F-мера). - URL: <http://bazhenov.me/blog/2012/07/21/classification-performance-evaluation.html>. (дата обращения 29.05.2020).

ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА СИСТЕМ КОНТРОЛЯ, ДИАГНОСТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

УДК:621.039.514.25:681.5.017

Г.Ш. Эралиева, eralieva.gulmira@mail.ru

Ж.К. Абдыбаева, Асан уулу Аскат, Н.А. Суюнтбекова

*Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
Бишкек, Кыргызстан*

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В НЕОДНОРОДНЫХ ЦЕПНЫХ СХЕМАХ НА ОСНОВЕ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В статье проанализированы режимы работы как однородных, так и неоднородных цепных схем (НЦС), которые представляют собой универсальные математические и физические модели многих устройств, в том числе модели воздушных линий электропередачи, протянутых в высокогорных условиях со сложным рельефом и динамично изменяющимися погодными условиями. Схемы их замещений представлены как неоднородные цепные. Предполагается, что параметры всех звеньев НЦС могут быть зависимы от их номера и от времени. С учетом вышесказанного в работе поставлена задача анализа переходных процессов в неоднородных цепных схемах на основе их компьютерных моделей с целью выявления неоднородностей в распределённых параметрах воздушных линий электропередачи, представленных неоднородной цепной схемой. Такая задача решена на основе разработанной в среде Simulink блок-схемы. Приведены результаты численного эксперимента.

Ключевые слова: цепная схема; переходный процесс; компьютерное моделирование; Simulink; схема замещения; воздушные и кабельные линии

Введение

Анализ установившихся и переходных режимов в цепях с распределёнными параметрами (ЦРП) и в цепных схемах (ЦС) – один из важных и сложных разделов теоретической электротехники. Они представляют собой универсальные математические и физические модели многих устройств [1].

В электроэнергетике подобные модели используются при изучении переходных процессов (ПП) в воздушных линиях электропередачи и силовых кабелях.

Такие элементы электрических сетей, как изоляторы высоковольтных линий в виде гирлянд, обмотки электрических машин, вследствие их естественной периодичности в конструкции, в схемах замещения представляются как ЦС [1].

Воздушные линии электропередачи протянуты в высокогорных условиях со сложным рельефом и динамично изменяющимися погодными условиями, при анализе режимов их работы мы предлагаем представлять их в схемах замещения как неоднородные цепные схемы (НЦС), так как с изменением рельефа и климатических условий изменяются и параметры цепной схемы. Например, в процессе эксплуатации высоковольтные линии, особенно протянутые в высокогорных условиях, подвержены различным климатическим воздействиям, при этом на различных участках они могут существенно различаться как по температурам, атмосферному давлению и влажности.

В местах прохождения ВЛ они могут подвержены резким изменениям метеорологической обстановки, например, на одном участке погода может быть хорошей, на другом – снегопад или дождь с повышенной влажностью и туманом. Описанные изменения

климатической (метеорологической) обстановки приводит к изменениям диэлектрических параметров изоляции, например, из-за повышенной влажности воздуха, особенно при ливневых дождях, сопровождающихся высокой влажностью, значительно повышается его диэлектрическая проницаемость, а следовательно, изменяются электрические емкости между элементами ВЛ и поверхностью земли. Увеличивается и поверхностная электропроводимость изоляционных конструкций, например, у подвесных изоляторов.

Все вышеописанные ситуации должны отражаться и на параметрах схем замещения ВЛ, при котором они представляются в виде неоднородных цепных схем.

Одним из важных элементов ВЛ, особенно 500 кВ и выше, являются подвесные изоляторы, от которых в значительной степени зависит их эксплуатационная надежность. Поэтому, основываясь на [2, 3], рассмотрим влияющие на эти конструкции процессы, а также проанализируем, какие дополнительные факторы приводят к изменениям их состояний. Эти изменения должны учитываться в параметрах схем замещения ВЛ (рис.1).

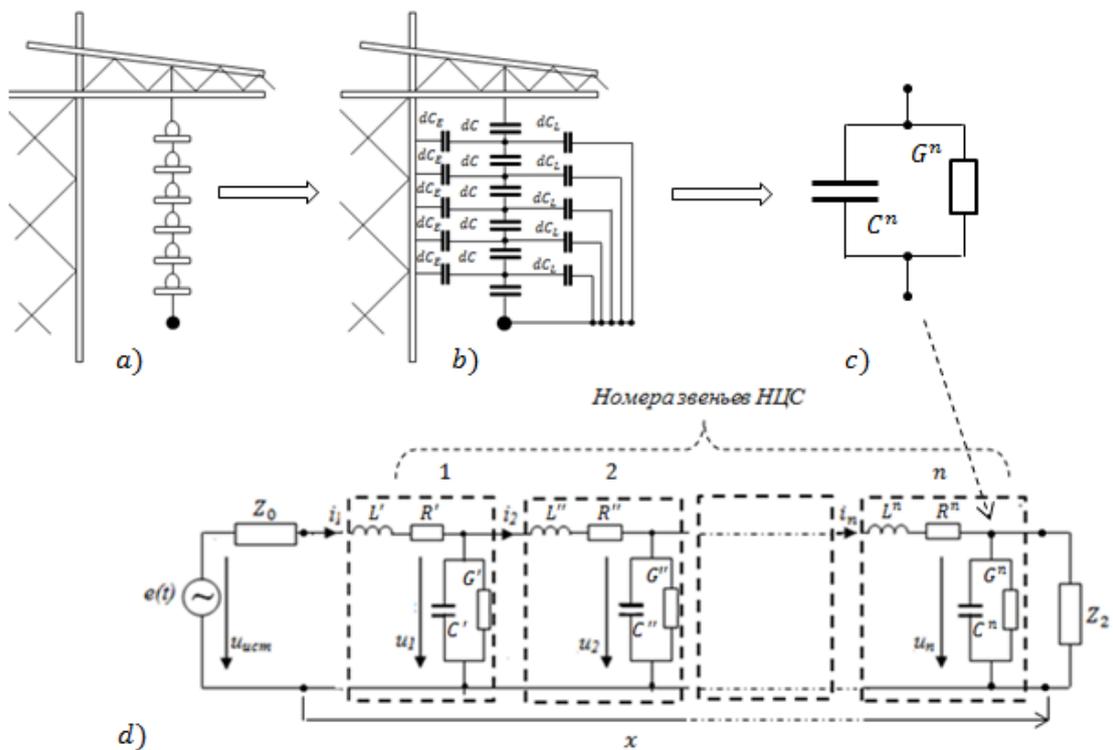


Рис.1. а) – подвесная гирлянда на решетчатой опоре; б) – схема замещения гирлянды; в) – обобщенная схема замещения гирлянды с учетом поверхностной проводимости диэлектрика, из которой изготовлены изолятор гирлянды; д) - нагруженная в начале и в конце НЦС, представляющая схему замещения двухпроводной неоднородной воздушной линии электропередачи

Подвесные гирлянды, составленные из тарельчатых изоляторов (рис.1а), в схемах замещения представляются относительно земли и провода высокого напряжения в виде частных емкостей dC и паразитных емкостей dC_E и dC_L (рис.1, б) [2].

При воздействии на изоляторы линии электропередачи атмосферных перенапряжений на них действует электрическая дуга, связанная с токами короткого замыкания на землю.

При этом из-за термического действия электрическая дуга вызывает ожог изолятора, а возникающие температурные механические напряжения могут привести к его

растрескиванию.

Изоляторы на открытом воздухе загрязняются пылью и солевыми отложениями. Увлажнения загрязненных изоляторов создают на их поверхности пленки повышенной проводимости, по которым протекает повышенный электрический ток утечки [3]. На рис.1с этот факт учтен введением элемента G^n схемы замещения гирлянды (n – номер звена НЦС).

Постановка задачи

В работе объектами исследования являются нагруженная двухпроводная линия, схема замещения которой представлена в виде НЦС, а нагрузочные элементы – в начале линии (Z_0) и в конце (Z_2) – считаются сосредоточенными (рис.1d).

На рис.1d показана нагруженная в начале и в конце НЦС, представляющая схему замещения двухпроводной воздушной линии электропередачи, протянутой в высокогорных условиях со сложным рельефом и динамично изменяющимися погодными условиями. Поэтому параметры всех звеньев НЦС могут быть зависимы от длины линии x и от времени t .

С учетом вышесказанного с целью оценки и выявления неоднородностей в распределённых параметрах линий электропередачи следует разработать способ анализа ПП в неоднородных цепных схемах на основе их компьютерных моделей, составленных в среде Simulink.

Методы решения

Анализ переходных процессов в однородных цепных схемах (ОЦС) возможен аналитическим методом с использованием соответствующих операторных выражений [1].

Однако задачи, поставленные в работе, в силу неоднородностей ЦС и непостоянства первичных параметров объекта исследования на данный момент не имеют аналитического решения. Они могут быть решены численными методами путем компьютерного моделирования на основе их математических моделей, построенных для каждого звена НЦС. Компьютерное моделирование реализовано в среде Simulink.

В научных публикациях по компьютерному моделированию динамических систем (линейных, нелинейных) в среде Simulink [4, 5, 6] математические выражения $Y = f(x_1, x_2, \dots, x_n, const)$, связывающие параметры объектов исследований, представляются графически в виде блока (рис.2) со входом, куда поступают переменные и константы, и выходом, где формируется результат вычислений,

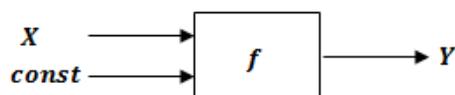


Рис. 2. Представление формулы в виде блока

где $X = x_1, x_2, \dots, x_n$ – переменные параметры и исходные данные; $const$ – физические величины, недоступные для варьирования; f – совокупность математических операций над переменными и константами; Y – результат вычислений.

Совокупность графических изображений блоков и линий связи образует блок-схему математической модели (ММ) объекта исследования.

От стандартного алгоритма блок-схема отличается тем, что она показывает не только последовательность математических операций, но и все связи между блоками и путь движения всех переменных и констант, значит, более информативна и наглядна. Для построения блок-схемы и предназначен пакет Simulink MATLAB (Simulation-моделирование). С помощью этого пакета можно смоделировать нелинейные динамические системы по первичной математической модели без её решения, она обладает таким

Анализ результатов численного эксперимента (ЧЭ)

Моделирующие возможности разработанной блок-схемы (рис.3) продемонстрированы на примере расчета режимов работы как для ОЦС, так и для НЦС при включении их на единичный скачок напряжения. Целью проведения анализа ЧЭ является сравнение характера протекания переходных процессов в ОЦС и НЦС. Причем НЦС получается из ОЦС варьированием некоторых из параметров, изменения которых связаны с климатическими (метеорологическими) воздействиями особенно на изоляторы подвесных гирлянд (этот вопрос рассмотрен во введении этой статьи). Если эти сравнения покажут количественное, так и качественное различие характера ПП, то можно прийти к заключению, что есть возможность в оценке характера неоднородностей в распределённых параметрах воздушных линий электропередачи, представленных неоднородной цепной схемой. С этой целью сначала рассмотрим режимы на входах ОЦС (пример 1), затем режимы для НЦС (пример 2), полученный из ОЦС изменением параметров третьего звена.

Пример 1. Рассчитать режимы на входах ОЦС, состоящей из шести звеньев, при включении её на единичный скачок напряжения (начальные условия нулевые). Параметры звеньев $R = 0.7 \text{ Ом}$, $L = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$, $G = 5 \cdot 10^{-6} \text{ См}$, $C = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$, $Z_0 = 0$, $Z_2 = R_2 = 15 \text{ Ом}$.

На рис. 4 и 5 соответственно показаны зависимости от времени напряжений и токов в каждом звене ОЦС при его включении на единичный скачок напряжения, смоделированный на ЭВМ.

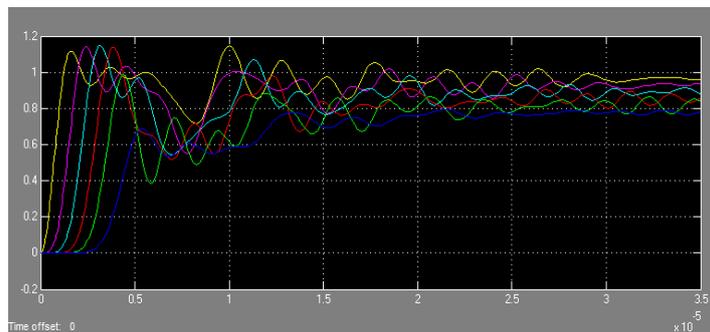


Рис.4. Зависимость от времени напряжений $u(n, t)$ во всех шести звеньях ОЦС

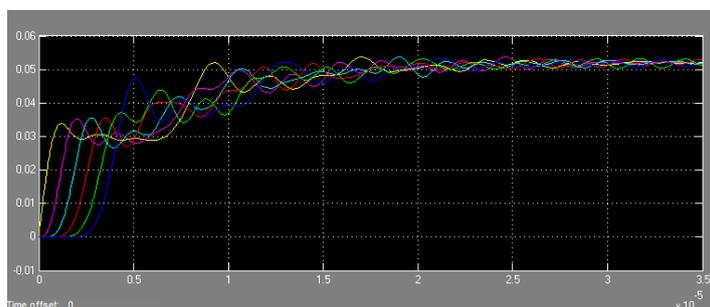


Рис.5. Зависимость от времени токов $i(n, t)$ во всех шести звеньях ОЦС

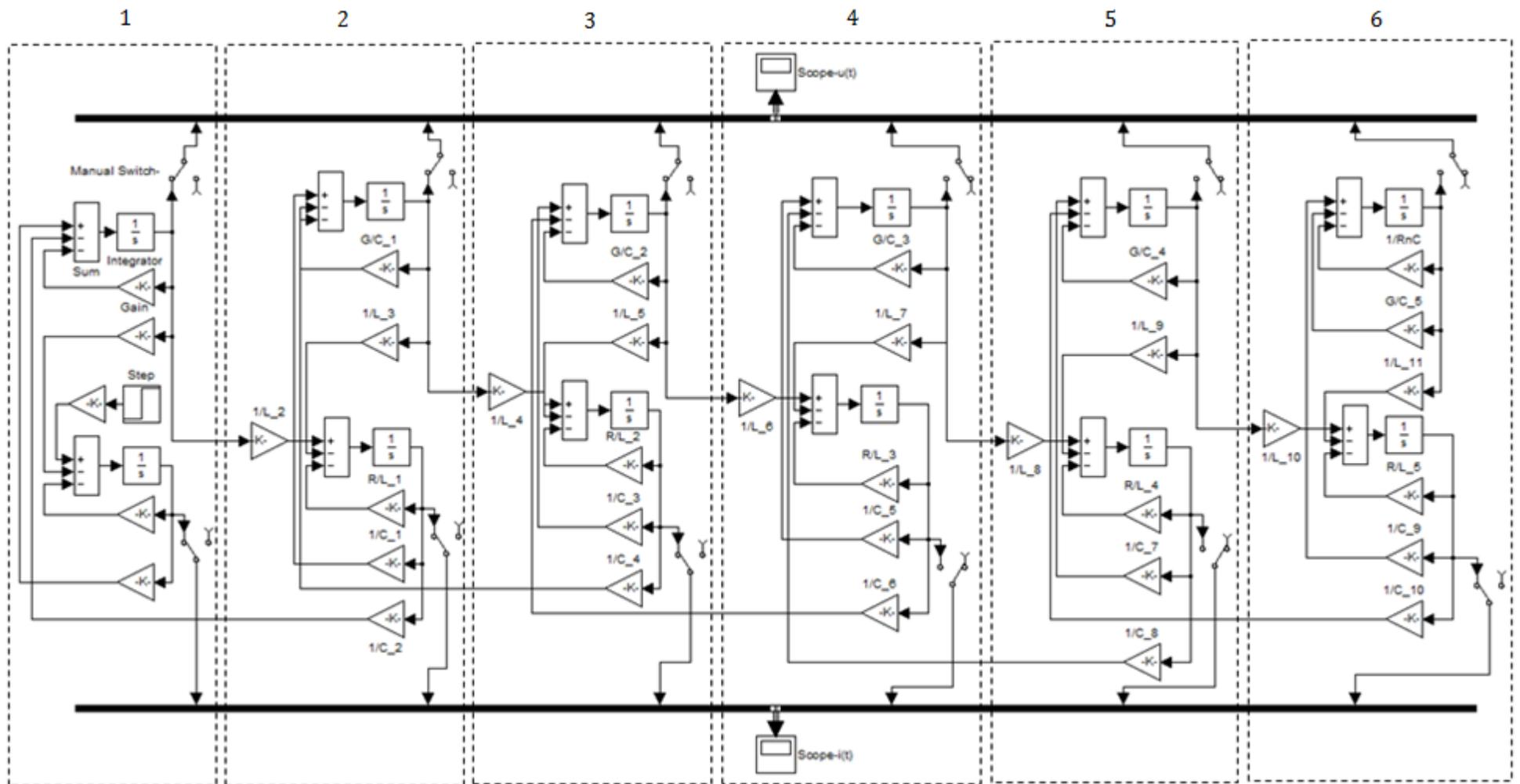


Рис.3. Компьютерный аналог системы ДУ (1) в виде блок - схемы

Пример 2. Рассчитать режимы на входах НЦС, состоящей из шести звеньев, при включении её на единичный скачок напряжения (начальные условия нулевые). Параметры, кроме третьего звена, равны: $R = 0.7 \text{ Ом}$, $L = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$, $G = 5 \cdot 10^{-6} \text{ См}$, $C = 2 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$; третьего - $R = 2.728 \text{ Ом}$, $L = 4.3762 \cdot 10^{-5} \text{ Гн}$, $G = 2.273 \cdot 10^{-2} \text{ См}$, $C = 16.482 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$, $R_H = 15 \text{ Ом}$.

Результаты расчета режимов на входах НЦС для примера 2 представлены на рис.6, 7

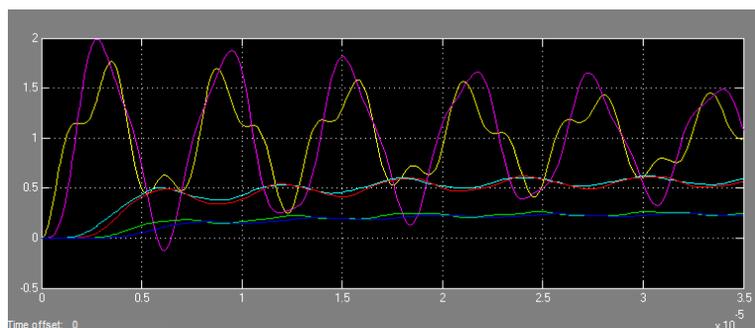


Рис.6. Зависимость от времени напряжений $u(n, t)$ во всех шести звеньях НЦС

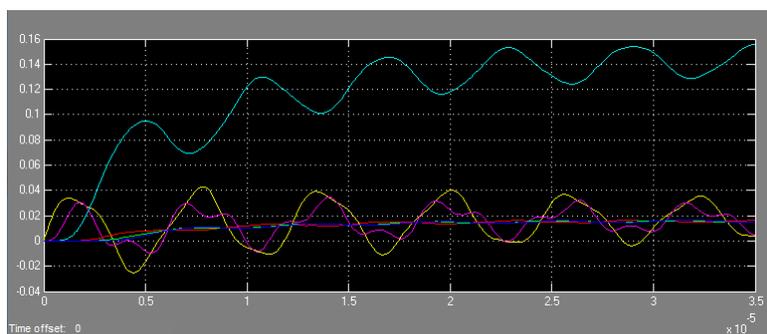


Рис.7. Зависимость от времени токов $i(n, t)$ во всех шести звеньях НЦС

Сравнения полученных результатов ЧЭ показывают, что произошли как качественные, так и количественные изменения в характере ПП (рис.4 и рис.6) для $u(n, t)$, а (рис.5 и рис.7) для $i(n, t)$. Отсюда делаем выводы о возможности в оценке характера неоднородностей в распределённых параметрах воздушных линий электропередачи.

Теперь рассмотрим, как влияет динамическое изменение некоторых параметров третьего звена на характер протекания ПП в процессе моделирования (пример 3).

Пример 3. Рассчитать режимы на входах НЦС при включении её на единичный скачок напряжения (начальные условия нулевые) для случая динамического изменения параметров третьего звена. Исходные данные звеньев совпадают с исходными данными **примера 2**, но в процессе моделирования, согласно рис.10, с шагом в 1 мкс отношение параметров третьего звена G/C со значением, равным 137900 скачкам, возрастает до значения 1379000. Такое возможно за счет резкого увеличения поверхностной электропроводимости изоляции гирлянды. Механизм такого роста затронут во введении статьи. Результаты расчета режимов на входах НЦС для примера 3 представлены на рис.8, 9.

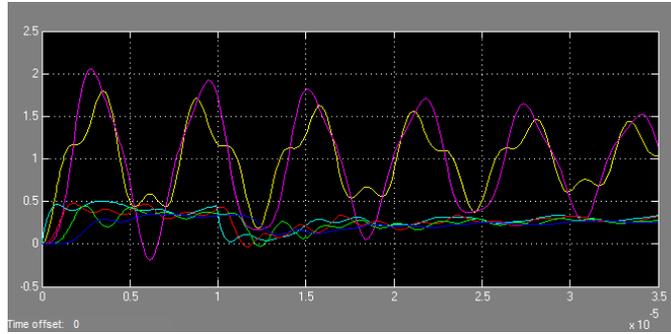


Рис8. Зависимость от времени напряжений $u(n, t)$ во всех шести звеньях НЦС

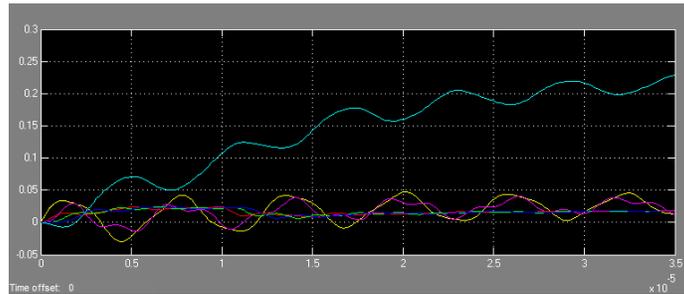


Рис.9. Зависимость от времени токов $i(n, t)$ во всех шести звеньях НЦС

Сопоставления результатов ЧЭ (рис.6, рис.8) для $u(n, t)$ и (рис.7, рис.9) для $i(n, t)$ показывают, что действительно через 1 мкс наблюдаются изменения в ходе ПП.

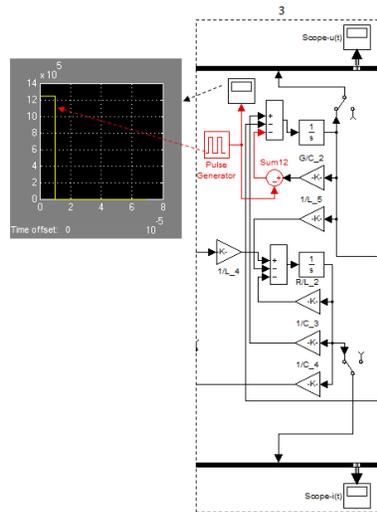


Рис. 10. Фрагмент блок-схемы звена №3 НЦС с расширенными функциональными возможностями

Реализация условия задачи в примере 3, когда после начала моделирования через 1 мкс в третьем звене НЦС происходит скачкообразное возрастание параметра G/C , осуществлена добавлением в блок-схему третьего звена блоков Pulse Generator и Sum12 (рис10).

Заключение

Вместо реальных высоковольтных воздушных линий, эксплуатируемых в высокогорных условиях с неустойчивыми климатическими условиями при теоретических исследованиях электромагнитных переходных процессов, протекающих в них, необходимо пользоваться схемами замещения, представляющими неоднородные ЦС.

В настоящее время анализ переходных процессов аналитическим методом возможен только для ОЦС, поэтому процессы в НЦС необходимо анализировать численными методами.

В работе для анализа электромагнитных переходных процессов в НЦС разработана блок-схема с широкими функциональными возможностями в среде Simulink. Эти возможности проиллюстрированы решением конкретных примеров. Особенно следует отметить возможность моделирования процессов в НЦС при динамическом изменении параметров НЦС в процессе моделирования (пример 3).

На основе проведенного анализа результатов ЧЭ можно заключить, что в принципе возможно выявление неоднородностей в распределённых параметрах воздушных линий электропередачи, представленных неоднородной цепной схемой.

Литература

1. Каганов З.Г. Электрические цепи с распределенными параметрами и цепные схемы. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 248 с.: ил.
2. Техника высоких напряжений: теоретические и практические основы применения: Пер. с нем. / М. Бейер, В. Бёк, К. Мёллер, В. Цаенгль; Под ред. В.П. Ларионова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 555 с.: ил.
3. Дмитриевский В.С. Расчет и конструирование электрической изоляции: Учеб. пособие для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 392 с., ил.
4. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие. – СПб.: КОРОНА принт, 2001. – 320 с.
5. Лазарев Ю. Моделирование процессов и систем в MATLAB. Учебный курс. – СПб.: Питер; Киев: Издательская группа ВНУ, 2005. – 512 с.: ил.
6. Бенькович Е.С. Практическое моделирование динамических систем/ Е.С. Бенькович, Ю.Б. Колесов, Ю.Б. Сениченков. – СПб.: БХВ-Петербург, 2002. – 464 с.
7. Братищев А.В. Математические функции пакета MATLAB: Метод. указания./ А.В. Братищев. - Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 2009. – 12 с.
8. Бакалов В.П., Воробийенко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей: Учебник для вузов; Под ред. В.П. Бакалова. – М.: Радио и связь, 1998. – 444 с.: ил.
9. Асанова С.М., Ниязова Г.Н., Сатаркулов К. Моделирование электромагнитных взаимодействий смежных ЛЭП на основе метода переменных состояний // Проблемы автоматики и управления. – 2015. – № 1 (28). – С. 231–236.
10. Асанова С.М., Айдарова А.Р., Сатаркулов К.А. Исследование диагностических возможностей параметров переходных процессов в цепях с распределенными параметрами // Известия КГТУ им. И. Раззакова. – 2012. – № 26. – С. 105–111.

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Научно-технический журнал

Литературный редактор Е.В. Комарова

Компьютерная верстка С.Н. Верзунов

Подписано к печати 09.07.2021 г. Формат 70/108 1/8

Печать офсетная. Объем 12.59 усл. п.л. Тираж 200 экз.

Издательство «ИМА»

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265