

ISSN 1694-5050

НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК КЫРГЫЗСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

КЫРГЫЗСКАЯ АССОЦИАЦИЯ ПО
АВТОМАТИЧЕСКОМУ УПРАВЛЕНИЮ
И КОМПЬЮТЕРНЫМ СИСТЕМАМ

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

№ 2 (33)

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

Журнал издается с 1996 года.

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



БИШКЕК

2017

ИЛИМ

Проблемы автоматизации и управления: Научно-технический журнал
/ Национальная академия наук Кыргызской Республики.–
Бишкек: Илим, 2017.– №2(33).– 132 с.

Главный редактор
академик НАН КР Ж. ШАРШЕНАЛИЕВ

Ответственный секретарь
доктор технических наук А.Б. БАКАСОВА

Редакционная коллегия:

академик РАН Ю.Г. ЕВТУШЕНКО (Россия),
член-корр. НАН РК М.Н. КАЛИМОЛДАЕВ, (Казахстан),
член-корр. НАН КР Р.О. ОМОРОВ, (Кыргызстан),
доктор технических наук, профессор МАРАТ АХМЕТ, (Турция),
доктор технических наук, профессор Е.Л. ЕРЁМИН (Россия),
доктор технических наук, профессор С.А. АЙСАГАЛИЕВ (Казахстан),
доктор технических наук, профессор А. АБДУКАЮМОВ (Узбекистан),
доктор физ.-мат. наук, профессор М.Т. ЖЕНАЛИЕВ (Казахстан),
доктор технических наук, профессор Б.И. ИСМАИЛОВ, (Кыргызстан),
доктор физ.-мат. наук, профессор А.Д. САТЫБАЕВ, (Кыргызстан),
доктор технических наук И.В. БРЯКИН, (Кыргызстан),
доктор технических наук К.А. ПРЕСНЯКОВ, (Кыргызстан),
доктор технических наук Д.В. ЯНКО, (Кыргызстан),
доктор технических наук Б.Т. УКУЕВ (Кыргызстан)

В журнале публикуются статьи по системному анализу, управлению и обработке информации в технических системах, по математическому моделированию, численным методам и комплексам программ, а также результатам исследований по разработке элементов и систем управления.

Рецензенты:

доктор технических наук Н.М. ЛЫЧЕНКО
доктор технических наук Е.Л. МИРКИН

Контакты редакции:

720071, Бишкек, проспект Чуй, 265.

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

Телефон: +996 312 39-20-36.

E-mail: avtomatika_nankr@mail.ru

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

ISSN 1694-5050 © Институт автоматизации и информационных технологий
НАН КР, 2017

УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

УДК 519.3:62–50

Ж.Ш.Шариеналиев, Т.П.Самохвалова, Д.О.Макиенко
Институт автоматизации и информационных технологий
Национальной академии наук Кыргызской Республики, г.Бишкек
avtomatika_nankr@mail.ru, sam_tp@mail.ru

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ С ПЕРИОДИЧЕСКИМ КОНТРОЛЕМ СОСТОЯНИЯ ОБЪЕКТА

Построен упрощенный алгоритм управления нелинейной системой с сосредоточенными параметрами с имитацией погрешностей в моменты контроля. Алгоритм основан на методе динамического программирования Р. Беллмана и методе характеристик.

Ключевые слова: оптимальное управление; стабилизация; метод характеристик; скачки величины управления.

Введение. В работах [1–3 и др.] разработаны аналитические методы решения дифференциальных уравнений с частными производными первого порядка. На основе этих методов в [4–5] получены приближенное решение уравнения Беллмана и построены алгоритмы управления с обратной связью одно- и двумерными линейными системами с сосредоточенными параметрами с явной зависимостью от коэффициентов управляемого объекта и минимизируемого критерия качества.

В данной работе эти алгоритмы применяются для стабилизации нагрева с излучением тепла. Уменьшены или устранены резкие скачки величины управления при периодическом измерении реального состояния одномерного динамического объекта.

1. Выбор параметра для устранения резких скачков величины управления

Математическую модель нагрева управляемого объекта с излучением тепла запишем в виде

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

При отсутствии излучения ($\gamma = 0$) модель нагрева линейная:

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bp(t), \quad x(0) = x_0, \quad t \in [0; t_k]. \quad (1.1)$$

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

$$J = \gamma_1 \int_0^{t_k} (x(t) - g)^T Q (x(t) - g) dt + \gamma_2 (x(t_k) - g)^T F (x(t_k) - g) + \beta \int_0^{t_k} p^2(t) dt. \quad (1.2)$$

Здесь A, Q, F – известные $n \times n$ матрицы, B, x – вектор-столбцы размерности $n \times 1$; $\gamma, \gamma_1, \gamma_2, \sigma, t_k, \beta$ – известные постоянные; $p(t)$ – скалярная управляющая функция из множества допустимых управлений; $(^T)$ – символ транспонирования.

Задача 1.1. Найти синтезирующее управление $p(t, x(t))$ и соответствующее решение $x(t)$ уравнения (1.1), минимизирующие критерий качества (1.2).

Задачу 1.1 решаем методом динамического программирования Р. Беллмана.

Уравнение Беллмана с обращенным временем ($t = t_k - \tau$, $dt = -d\tau$) имеет вид

$$\frac{\partial S(t, x(t))}{\partial t} = (Ax)^T \frac{\partial S(t, x(t))}{\partial x} + \gamma_1(x-g)^T Q(x-g) - \frac{B^T B}{4\beta} \left(\frac{\partial S(t, x(t))}{\partial x} \right)^T \frac{\partial S(t, x(t))}{\partial x},$$

с условием

$$S(0, x) = \gamma_2(x(0) - g)^T F(x(0) - g).$$

Оптимальное синтезирующее управление равно

$$p^0(t, x(t)) = -\frac{1}{2\beta} B^T \frac{\partial S(t, x(t))}{\partial x}.$$

Линеаризованное уравнение Беллмана при $n = 1$, $a < 0$ запишем в виде

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

и применим методы [1–3]. Приближенное стабилизирующее управление, полученное по методу характеристик с линеаризацией уравнения Беллмана, имеет вид [4]

$$p(x(t)) = -\frac{b}{2a\beta} Mx(t) + \frac{bg}{a\beta} M, \quad M = \gamma_1 Q - \frac{b^2}{\beta} \gamma_2^2 F^2. \quad (1.3)$$

По технологическим требованиям часто достаточно, чтобы состояние объекта попадало в 5% зону от заданной желаемой величины $g(t)$.

Известно, что в численных расчетах на графиках часто возникает резкий скачок или «горб» величины управления в начале интервала времени. Для уменьшения величины скачка в [5] было предложено заданное состояние $g(t)$ в критерии качества выбирать в виде экспоненты с асимптотой

$$\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) \equiv konst.$$

Известно, что имеются расхождения в расчетном и измеренном состояниях объектов. В данной работе эти расхождения учтены с помощью моделирования. Введена функция $h(t)$, имитирующая погрешности модели и приборов измерения в моменты времени t_1, t_2 .

На рис. 1.1–1.4 приведены результаты расчетов нагрева по модели (1.1), (1.2) с управлением (1.3). Рассмотрены варианты $g(t) \equiv 1150$, $g(t) \equiv 830$, $g(t) = a + be^{\alpha t}$, где a, b, α – заданные числа.

В примере 1.1 управление в первой точке равно 3039.9.

В примерах 1.2, 1.3 приведен выбор параметра α . Показано, что максимальная величина (скачок) управления убывает от 2522.4 до 1537.1 при изменении параметра α от $\alpha = -15$ до $\alpha = -5$. При $\alpha = -1$ скачок отсутствует.

В примере 1.4 приведен периодический контроль температуры с управлением без скачка с пересчетом функции $g(t)$ в каждой точке измерения.

В примере 1.5 алгоритм управления линейной задачи с выбранным параметром $\alpha = -1$ использован в нелинейной задаче.

Выбор параметра α в функции $g(t)$ позволяет уменьшить скачок и получить стабилизирующее управление без скачка на данном интервале времени. Управление без скачка переводит температуру в заданную зону и удерживает её в зоне.

Пример 1.1. Вариант $g(t) \equiv 1150$. Максимальная величина управления $p_1(t)$ равна 3039.9. Стационарная величина управления равна 1537.1.

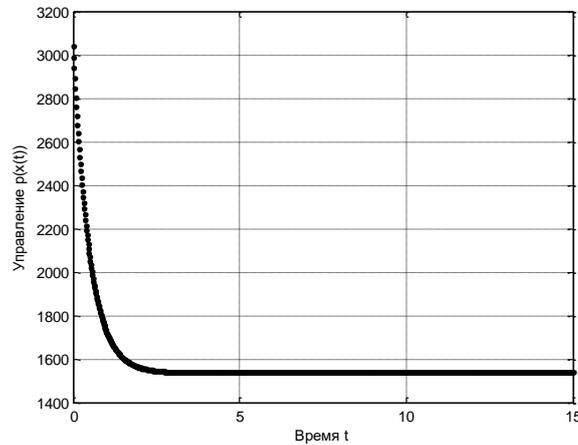


Рисунок 1.1. Управление $p_1(t)$, $g(t) \equiv 1150$

Пример 1.2. Вариант $g(t) = a + be^{\alpha t}$, $\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 1150$, $\alpha = -15$. Максимальные величины управлений $p_2(t)$, $p_3(t)$, $p_4(t)$ равны соответственно 2522.4; 2122.3; 1537.1. Стационарная величина управления равна 1537.1.

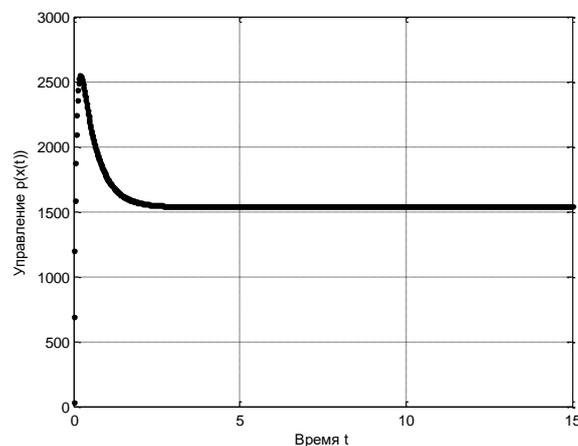
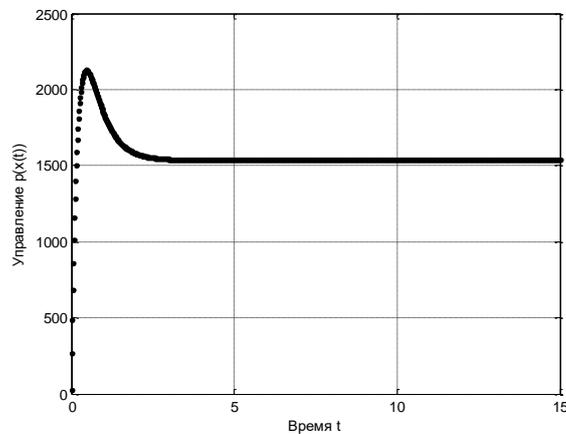


Рисунок 1.2. Управление $p_2(t)$, $g(t) = a + be^{\alpha t}$, $\alpha = -15$

Рисунок 1.3. Управление $p_3(t)$, $g(t) = a + be^{\alpha t}$, $\alpha = -5$

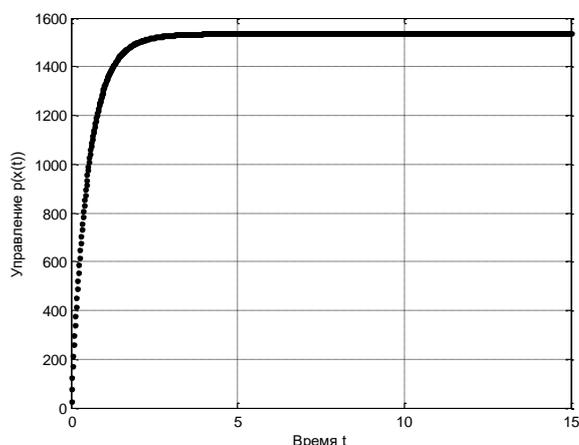


Рисунок 1.4. Управление $p_4(t)$, $g(t) = a + be^{\alpha t}$, $\alpha = -1$

Пример 1.3. Вариант $g(t) = a + be^{\alpha t}$, $\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 830$. В таблице 1.1 приведены результаты выбора параметра α .

Таблица 1.1 – Выбор α . Метод характеристик, квазилинеаризация, $n = 1$

N	$g(t)$	α	Величина скачка управления	Управление на интерв. стационарности	Норма управления $\ u(t)\ $	Температура стальн. изделия	Время достиж. 5% зоны
1	$g(t) \equiv 830$	—	2186.6	1105.6	4453.4	830.2 830.7	3.7 4.5
2	Экспонента $g(t) = a + be^{\alpha t}$	-10	1750	1106	4414.1	831	5
3	Экспонента	-5	1500	1106	4381.2	831	4
4	Экспонента	-2	1230	1105.6	4296.3	830.4 830.7	5 6.3
5	Экспонента	-1.0625	Визуально без скачка	1105.6	4185.9	830.2 830.7	7 10
6	Экспонента	-1	По расчетам без скачка	1105.6	4171.7	830.1 830.7	7.7 10
7	—	—	—	$u(t) \equiv 1105.6$	4285.5	830.1 830.7	7 9.4
8	—	—	—	$u(t) \equiv 1106$	4287.1	831	9.4

Данные табл. 1.1 показывают, что при уменьшении скачка норма управления убывает от 4453.4 до 4171.7; время попадания в 5% зону возрастает с 3.7 до 7.7. Стационарная величина управления для линейной модели равна $\bar{u} = 1105.6$.

Пример 1.4. Моделирование периодического контроля температуры в моменты времени t_1, t_2 с учетом погрешностей $h(t)$, вариант $g(t) = a + be^{\alpha t}$, $\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 830$, $\alpha = -1$. На рисунках 1.5, 1.6 функция $g(t)$ пересчитывается при измерении температуры в каждый момент времени t_1, t_2 , отмечена тонкой линией. Скачки управления отсутствуют.

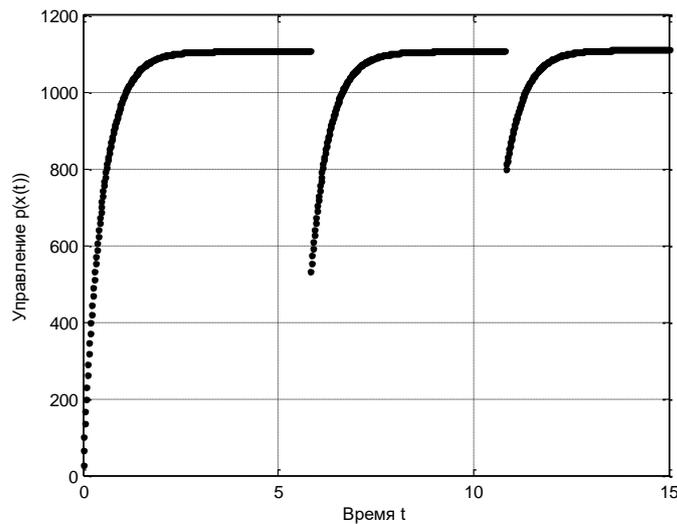
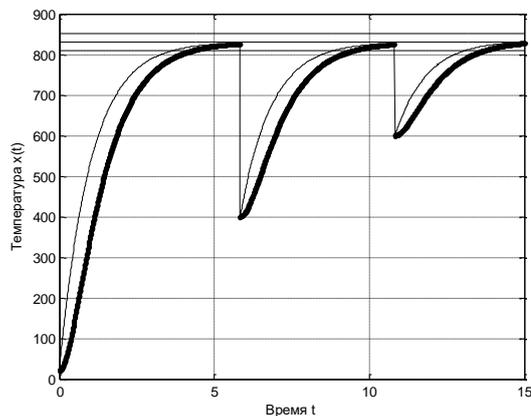


Рисунок 1.5. Управление при периодическом измерении, пересчет $g(t)$

Рисунок 1.6. Температура при периодическом измерении, пересчет $g(t)$

Пример 1.5. Нелинейная модель нагрева. Вариант $g(t) = a + be^{\alpha t}$, $\lim_{t \rightarrow \infty} g(t) = 830$.

Алгоритм управления (1.3), построенный для линейной модели (1.1), используем в нелинейной модели, когда излучение тепла присутствует ($\gamma = 1$). Графики управления и температуры идентичны графикам на рисунках 1.1–1.6. Стационарная величина управления для нелинейной модели равна $\bar{u} = 1106.6$.



2. Двумерная задача

Рассмотрим две функции $x_1(t)$, $x_2(t)$ в линейном неоднородном уравнении в частных производных первого порядка с начальным условием

$$U_t(t, x_1, x_2) + a_1(t)x_1U_{x_1}(t, x_1, x_2) + a_2(t)x_2U_{x_2}(t, x_1, x_2) = f(x_1, x_2),$$

$$U(0, x_1, x_2) = \varphi(x_1, x_2). \quad (2.1)$$

Здесь $a_1(t)$, $a_2(t) \in C(0, t_k)$. Следуем процедуре [2, 3] с некоторыми модификациями. Составим соответствующее (2.1) однородное уравнение

$$u_t(t, x_1, x_2) + a_1(t)x_1u_{x_1}(t, x_1, x_2) + a_2(t)x_2u_{x_2}(t, x_1, x_2) = 0, \quad u(0, x_1, x_2) = \varphi(x_1, x_2). \quad (2.2)$$

Обозначим $P = 1$, $Q_1 = a_1(t)x_1$, $Q_2 = a_2(t)x_2$ и составим уравнения характеристик в параметрической форме: $\frac{dt}{d\tau} = P$, $\frac{dx_1}{d\tau} = Q_1$, $\frac{dx_2}{d\tau} = Q_2$. Запишем уравнения $\frac{dx_1}{dt} = \frac{Q_1}{P}$, $\frac{dx_2}{dt} = \frac{Q_2}{P}$ и решим их. Обозначим

$$y_1(t) = \int_0^t a_1(s)ds, \quad y_2(t) = \int_0^t a_2(s)ds,$$

получим $x_1 = c_1e^{y_1(t)}$, $x_2 = c_2e^{y_2(t)}$, где c_1, c_2 – постоянные интегрирования. Отсюда

$$c_1 = x_1e^{-y_1(t)}, \quad c_2 = x_2e^{-y_2(t)}.$$

Решение $u(t, x_1, x_2)$ однородного уравнения (2.2) равно

$$u(t, x_1, x_2) = \varphi(c_1, c_2) = \varphi(x_1e^{-y_1(t)}, x_2e^{-y_2(t)}). \quad (2.3)$$

Далее построим уравнения относительно вспомогательных функций $p_1(\tau, t, x_1)$, $p_2(\tau, t, x_2)$ с соответствующими условиями:

$$p_{1\tau}(\tau, t, x_1) + a_1(\tau)x_1p_{1x_1}(\tau, t, x_1) = 0, \quad p_1(t, t, x_1) = x_1;$$

$$p_{2\tau}(\tau, t, x_2) + a_2(\tau)x_2p_{2x_2}(\tau, t, x_2) = 0, \quad p_2(t, t, x_2) = x_2. \quad (2.4)$$

Построим функции

$$p_1(\tau, t, x_1) = x_1e^{-y_1(t-\tau)}, \quad p_2(\tau, t, x_2) = x_2e^{-y_2(t-\tau)}. \quad (2.5)$$

Функции (2.5) являются решениями уравнений (2.4) и аргументами для построения решения $U(t, x_1, x_2)$ неоднородного уравнения (2.1):

$$U(t, x_1, x_2) = \varphi(p_1(0, t, x_1), p_2(0, t, x_2)) + \int_0^t f(p_1(s, t, x_1), p_2(s, t, x_2))ds. \quad (2.6)$$

Из (2.5), (2.6) получаем решение $U(t, x_1, x_2)$ неоднородного уравнения (2.1):

$$U(t, x_1, x_2) = \varphi(x_1 e^{-y_1(t)}, x_2 e^{-y_2(t)}) + \int_0^t f(x_1 e^{-y_1(t-s)}, x_2 e^{-y_2(t-s)}) ds. \quad (2.7)$$

Формулы (2.3), (2.7) используем для приближенного решения задач синтеза оптимального управления в системах с сосредоточенными параметрами.

Заключение. Численные расчеты показали, что алгоритм управления на основе метода характеристик с квазилинеаризацией является работоспособным в рассмотренных примерах. Выбор параметра в желаемой траектории позволяет сгладить или устранить резкие скачки величины управления не только в начале интервала времени, но и в моменты периодического контроля состояния объекта. Норма управления уменьшается, время достижения заданной температуры несколько увеличивается.

Литература

1. Гюнтер Н.М. Интегрирование уравнений в частных производных первого порядка. – Л.-М.: ОНТИ, 1934.
2. Иманалиев М.И. Нелинейные интегро-дифференциальные уравнения с частными производными. – Бишкек: Илим, 1992. – 112 с.
3. Иманалиев М.И., Алексеенко С.Н. // Доклады АН СССР. 1992. Т. 323. № 3. С. 410–414; 1992. Т. 325. № 6. С. 111–115; 1993. Т. 329. № 5. С. 543–546.
4. Самохвалова Т.П. Приближенное решение уравнения Беллмана / Материалы Международной научной конф. «Механика твердых, жидких и газообразных сред», посвящ. 80-летию д.ф.-м.н., проф. Я.И. Рудаева, 2–3 декабря 2016 // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. – 2017. – Т. 17. № 1. – С. 52–54.
5. Шаршеналиев Ж.Ш., Самохвалова Т.П. Приближенные алгоритмы управления и стабилизации в системах с сосредоточенными и распределенными параметрами / Итоги науки. Том 2. Избранные труды Международного симпозиума по фундаментальным и прикладным проблемам науки. – М.: РАН, 2014. – С. 75–110.

Х.Ш. Джураев

Таджикский национальный университет, Таджикистан, Душанбе, hayrullo_58@mail.ru

СТАЦИОНАРНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛА С ПОМОЩЬЮ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

С помощью математической модели стационарной задачи теплопроводности при переопределенных исходных данных рассматривается проблема непрерывного распределения тепла. Построен класс приближенного решения в виде регуляризирующего оператора, обладающего свойством устойчивости к малым отклонениям исходных данных. При этом важную роль играют выбор сглаживающей функции и условия согласования параметра регуляризации с погрешностью.

Ключевые слова: сглаживающая функция; параметр регуляризации; устойчивость; семейство регуляризирующих операторов; некорректность температуры.

Введение. В многих конденсированных средах непосредственно узнать внутреннюю структуру зачастую невозможно без её разрушения или экономически неэффективно, в частности, по технике, геофизике, экологии и др. Если же в конденсированных средах протекает некоторый процесс, то на основе его математической модели, а также доступных для измерения физических характеристик этого процесса можно попытаться восстановить структуру среды и самого процесса методами решения прямых и обратных задач. В контексте математического моделирования речь идет о решении стационарной задачи теплопроводности, состоящей в определении гармонических функций, когда на одной части границы области граничные условия переопределены, а на остальной части эти условия не доопределены.

Одним из способов восстановления истинных физических решений может быть [1–4] привлечение, (когда это возможно практически) дополнительных, сверх необходимых, данных измерений для построения единственного решения задачи измерений. Были разработаны методы его регуляризации, модификации и аналоги [5–7], которые, помогли преодолеть вычислительные трудности при построении приближенных решений этих задач.

В настоящей работе обсуждается решение неустойчивой задачи определения гармонической в бесконечной полосе функции, рассматриваемое как решение стационарной задачи теплопроводности. Принимается, что на одной грани полосы известны значения температуры и теплового потока, а на другой – никакие граничные условия не заданы. Дополнительно заданы значения температуры в некоторых точках полосы. Предполагается, что значения температуры измерены абсолютно точно, а значения теплового потока – с некоторой погрешностью, поддающейся оценке. Изыскивается способ снижения влияния погрешности заданных граничных условий на решение задачи с использованием дополнительно заданных значений температуры.

Отсутствие непрерывной зависимости распространение тепла от значения температуры и теплового потока создает большие неудобства, особенно при численном решении практических задач. Поэтому были разработаны различные методы приближенного решения практических задач [8, 9]. Эти методы позволяют построить численные решения, непрерывно зависящие от значения температуры и теплового потока. Численные методы решения неустойчивых задач зачастую с трудом поддаются обоснованию. Они очень трудоемки в многомерных расчетах, результаты их применения не дают теоретических обобщений и должны рассматриваться как результаты экспериментов в области «вычислительной физики» [10]. В связи с этим широкое распространение получили аналитические методы, к которым относится и описываемый метод специальных рядов. Ниже мы обсуждаем отношение к искомому решению реальной физической задачи неустойчивых аналитических решений задач для гармонических уравнений с неклассическими граничными условиями и соответствующих им приближенных решений этих задач. В дальнейшем предполагаем, что заданные граничные значения функций таковы, что решения соответствующих задач существуют и единственные в классе $L_2(-\infty, \infty)$ функций и только отсутствует непрерывная зависимость решений от значения температуры и теплового потока.

1. Построение аналитических решений. Рассмотрим задачу определения стационарного распределения тепла в бесконечной полосе, описываемого гармоническими функциями. Пусть реальное распространение тепла в полосе

$D = \{(x, y) : -\infty < x < \infty, 0 \leq y \leq y_0\}$ точно описывается функцией $u(x, y)$:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

$$u(x, 0) = \varphi(x), \quad \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} = \psi(x), \quad (2)$$

где $\varphi(x)$ – заданная функция температуры; $\psi(x)$ – заданная функция теплового потока.

Пусть в (1)–(2) функции $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ удовлетворяют следующим условиям:

- 1) $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ – бесконечно дифференцируемые функции;
- 2) производные $\varphi^{(k)}(x)$ и $\psi^{(k)}(x)$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) стремятся к нулю при $|x| \rightarrow \infty$ быстрее любой отрицательной степени $|x|$.

В этом случае для нахождения приближенных решений уравнения (1) с условиями (2) можно применить аналитические методы.

В результате простых математических выкладок и описанного метода специальных рядов получим искомое решение задачи (1)–(2) в виде:

$$u(x, y) = \varphi(x) + y\psi(x) + \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^k \frac{y^{2k}}{(2k)!} \left[\frac{d^{2k}\varphi(x)}{dx^{2k}} + \frac{y}{2k+1} \frac{d^{2k}\psi(x)}{dx^{2k}} \right]. \quad (3)$$

Классическая теорема Коши-Ковалевской говорит о существовании решения (3), и его единственности в классе аналитических функций [11].

Очевидно, что для решения задачи (1)–(2) формальным построением конструкций специальных рядов с коэффициентами $\frac{d^{2k}\varphi(x)}{dx^{2k}}$ и $\frac{d^{2k}\psi(x)}{dx^{2k}}$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) в виде (3) харак-

терна лишь локальная сходимость. В такой интерпретации решения (3), где функции $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ известны из эксперимента с некоторой заданной погрешностью,

необходимо учитывать и тот факт, что вычисление операторов дифференцирования функций $\varphi(x)$ и $\psi(x)$, то есть $\frac{d^{2k}\varphi(x)}{dx^{2k}}$ и $\frac{d^{2k}\psi(x)}{dx^{2k}}$, неустойчиво к возмущениям в исходных данных [3, 4]. Поэтому для нахождения коэффициентов к бесконечным системам линейных уравнений, их приходится обрезать и получить из этих обрезанных систем приближенные значения коэффициентов.

Для обеспечения сформулированных требований желательно, чтобы коэффициенты рядов находились не путем последовательного дифференцирования (как в рядах Тейлора (3)), а с помощью интегрирования некоторых простых рекуррентных систем обыкновенных уравнений. Представленные ниже конструкции рядов позволяют до некоторой степени удовлетворить указанные требования.

2. Построение приближенных аналитических решений. В решении вида (3) сохраним конечное число слагаемых N .

Пусть

$$\begin{aligned} Z_0(x) &= \varphi(x), & R_0(x) &= \psi(x), \\ Z_1(x) &= \frac{d^2\varphi(x)}{dx^2}, & R_1(x) &= \frac{d^2\psi(x)}{dx^2}, \\ Z_2(x) &= \frac{d^4\varphi(x)}{dx^4}, & R_2(x) &= \frac{d^4\psi(x)}{dx^4}, \\ &\dots \dots \dots, & &\dots \dots \dots, \\ Z_N(x) &= \frac{d^{2N}\varphi(x)}{dx^{2N}}, & R_N(x) &= \frac{d^{2N}\psi(x)}{dx^{2N}}. \end{aligned} \quad (4)$$

Умножим систему (4) на $\exp(isx)$, проинтегрируем по x от $-\infty$ до ∞ , то есть используем прямое непрерывное преобразование Фурье. В результате имеем систему интегральных уравнений первого рода:

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} Z_0(x) \exp(isx) dx &= \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) \exp(isx) dx, & \int_{-\infty}^{\infty} R_0(x) \exp(isx) dx &= \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) \exp(isx) dx, \\ \dots \dots \dots, & \dots \dots \dots, & \dots \dots \dots, & \dots \dots \dots, \\ \int_{-\infty}^{\infty} Z_N(x) \exp(isx) dx &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d^{2N}\varphi(x)}{dx^{2N}} \exp(isx) dx, & \int_{-\infty}^{\infty} R_N(x) \exp(isx) dx &= \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d^{2N}\psi(x)}{dx^{2N}} \exp(isx) dx. \end{aligned} \quad (5)$$

Запишем прямым непрерывным преобразованием Фурье в виде:

$$\Phi_0(s) = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) \exp(isx) dx. \quad (6)$$

Умножим выражение (6) на $\exp(-ist)$ и проинтегрируем по t от $-\infty$ до ∞ .

В правой части полученных выражений изменим порядок интегрирования, в результате получим:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0(s) \exp(-ist) ds = \int_{-\infty}^{\infty} \varphi(x) \left[\int_{-\infty}^{\infty} \exp(is(x-t)) ds \right] dx.$$

Согласно [12], интеграл Фурье $\int_{-\infty}^{\infty} \exp(isx) dx$ связан с δ -функцией. Тогда из формулы

$$\int_{-\infty}^{\infty} \exp(isx) dx = 2\pi\delta(s) \quad \text{следует, что} \quad \int_{-\infty}^{\infty} \exp(is(x-t)) ds = 2\pi\delta(x-t).$$

Поэтому

$$\int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0(s) \exp(-ist) ds = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} \phi(x) \delta(x-t) dx = 2\pi\phi(t),$$

откуда получаем

$$\phi(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Phi_0(s) \exp(-ist) ds. \quad (7)$$

Формула прямого непрерывного преобразования Фурье и обращения функция $\varphi(x)$, аналогичная (6) и (7), имеет место для функции $\psi(x)$:

$$\Psi_0(s) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(x) \exp(isx) dx, \quad \psi(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \Psi_0(s) \exp(-isx) ds. \quad (8)$$

Итак, исходя из прямого преобразования Фурье (6) (8), мы получили выражение для обратного преобразования Фурье $\varphi(x)$, $\psi(x)$ и это можно рассматривать как результат аналитического решения интегрального уравнения Фредгольма первого рода (7)–(8). Задача вычисления преобразования Фурье является неустойчивой [4], так как связана с решением интегрального уравнения Фредгольма первого рода. Это уравнение (7)–(8) решается аналитически, поэтому степень некорректности в значительной степени снижается.

Условия на одной грани полосы известны значения температуры и теплового потока, восстанавливаются соотношением

$$u(x, y) = \varphi(x) + y\psi(x) + \sum_{k=1}^N (-1)^k \left[\frac{y^{2k}}{(2k)!} Z_k(x) + \frac{y^{2k+1}}{(2k+1)!} R_k(x) \right], \quad (9)$$

в котором функции $Z_k(x)$, $R_k(x)$ находятся из решения интегральных уравнений

$$AZ_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} Z_k(x) \exp(-isx) dx = U_1(s), \quad AR_k = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_k(x) \exp(-isx) dx = U_2(s). \quad (10)$$

Правая часть этого соотношения задаётся приближенно, то есть функции $U_1(s)$, $\varphi(x)$ и $U_2(s)$, $\psi(x)$ известны из эксперимента с некоторой заданной погрешностью, поэтому

вычисление операторов дифференцирования $\frac{d^{2k}\varphi(x)}{dx^{2k}}$ и $\frac{d^{2k}\psi(x)}{dx^{2k}}$ неустойчиво к возмущениям в исходных данных [4]:

$$U_1(s) = (-1)^k s^{2k} \Phi_0(s), \quad U_2(s) = (-1)^k s^{2k} \Psi_0(s).$$

Они характеризуют погрешность правой части (10), то есть $\Phi_0(s)$ и $\Psi_0(s)$ – преобразования Фурье функций $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ соответственно. Здесь уклонение $\Phi_0(s)$ и $\Psi_0(s)$ оценивается в пространстве $L_2(-\infty, \infty)$. (Так как для всякой функции $\eta(x) \in L_2(-\infty, \infty)$ по теореме Планшереля [11, 12], справедливо равенство Парсевале, то есть

$$\int_{-\infty}^{\infty} |\eta(x)|^2 dx = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} |\eta_0(s)|^2 ds, \text{ а уклонение решения } Z_k(x), R_k(x) \text{ (} k = 0, 1, 2, \dots, N \text{) в про-}$$

странстве $C(-\infty, \infty)$ ($L_1(-\infty, \infty)$).

В работе [4] рассмотрены способы построения широкого класса регуляризирующих операторов, получаемых с помощью классических интегральных преобразований. Следуя [13], с помощью интегрального преобразования Фурье для уравнения (10) построим класс регуляризирующих операторов. Все описанные выше случаи можно охарактеризовать как задача отыскания гладкой кривой $Z_k(x)$ ($k = 0, 1, 2, \dots, N$), удовлетворяющей минимум функционала А.Н.Тихонова:

$$M_\alpha[Z_k, U_1] = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} Z_k(x) \exp(-isx) dx - U_1(s) \right]^2 ds + \alpha \int_{-\infty}^{\infty} x^{2k} [Z_k(x) \exp(-isx)]^2 dx. \quad (11)$$

Легко видеть, что искомой функцией $Z_{\alpha k}(x)$ ($k = 0, 1, 2, \dots, N$), минимизирующей функционал $M_\alpha[Z_k, U_1]$, т. е. искомым приближенным решением уравнения (10) будет:

$$Z_{\alpha k}(x) = \frac{1}{1 + \alpha x^{2k}} Z_k(x) \quad (k = 0, 1, 2, \dots, N). \quad (12)$$

Аналогично можно найти функцию $R_{\alpha k}(x)$ ($k = 0, 1, 2, \dots, N$):

$$R_{\alpha k}(x) = \frac{1}{1 + \alpha x^{2k}} R_k(x) \quad (k = 0, 1, 2, \dots, N). \quad (13)$$

По так называемому принципу невязки выбрали следующий параметр регуляризации $\alpha = \alpha(\delta)$ таким образом: если $Z_{\alpha k}(x)$ ($k = 0, 1, 2, \dots, N$) какой-либо экстремал функционала (11), реализующий его глобальный минимум при заданном α и фиксированном δ , то числовой параметр α определяется из условия

$$\int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} Z_{\alpha k}(x) \exp(-isx) dx - U_1(s) \right]^2 ds = \delta^2.$$

Таким образом, в обсуждаемых случаях непрерывная зависимость построенного приближенного решения от значения температуры и теплового потока и точность решения рассматриваются относительно исходных данных (2) и решения (9), а не от истинных значений температуры и теплового потока и описания реального физического процесса.

3. Метод интегрального преобразования Фурье и его регуляризация. В работах [6, 7] с применением интегрального преобразования Фурье получено решение задачи (1)–(2) в виде:

$$u(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left(\Phi_0(s) Ch(ys) + \Psi_0(s) \frac{Sh(ys)}{s} \right) \exp(-isx) ds. \quad (14)$$

Если подставить (7) и (8) в (3) и применить математическое преобразование, то получим решение задачи (1)–(2) в виде (14).

Это решение существует согласно сделанным выше предположениям относительно поведения функций $\varphi(x)$ – температуры и $\psi(x)$ – теплового потока. Можно удостовериться, что при соответствующих граничных условиях (температуры и теплового потока) это решение согласно с решением с классическими граничными условиями.

Теперь рассмотрим, в каком отношении находятся регуляризованные решения с решениями реальной физической задачи.

В работе [7] построен класс устойчивых решений задачи (1)–(2) в виде:

$$u_\alpha(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(s, \alpha) \left(\Phi_0(s) Ch(ys) + \Psi_0(s) \frac{Sh(ys)}{s} \right) \exp(-isx) ds. \quad (15)$$

Здесь функция $g(s, \alpha)$ является стабилизирующим множителем и обладает свойствами:

- 1) $g(s, \alpha)$ определена в области $\{-\infty < s < \infty, \alpha \geq 0\}$;
- 2) $0 \leq g(s, \alpha) \leq 1$ для всех значений $\alpha \geq 0$ и $-\infty < s < \infty$;
- 3) $g(s, 0) \equiv 1$;
- 4) для всякого $\alpha > 0$ $g(s, \alpha)$ четная по s и $g(s, \alpha) \in L_2(-\infty, \infty)$;
- 5) для любого $\alpha > 0$ $g(s, \alpha) \rightarrow 0$ при $|s| \rightarrow \infty$;

- 6) при $\alpha \rightarrow 0$ $g(s, \alpha) \rightarrow 1$, не убывая, причем на всяком отрезке $|s| \leq s_1$, эта сходимость равномерная;
- 7) для любого $s \neq 0$ $g(s, \alpha) \rightarrow 0$ при $\alpha \rightarrow \infty$ и эта сходимость равномерная на каждом отрезке $[s_1, s_2]$;
- 8) для всякого $\alpha > 0$ $g(s, \alpha)Ch(sy)$, $g(s, \alpha) \frac{Sh(sy)}{s}$ принадлежат $L_2(-\infty, \infty)$ при любом фиксированном $y > 0$.

Этим условиям отвечает, например, стабилизирующий множитель (фактор)

$$g(s, \alpha) = \frac{1}{1 + \alpha s^{2n}}, \quad g(s, \alpha) = \exp(-(\alpha s)^{2n}), \quad g(s, \alpha) = \exp(-\alpha s^{2n}), \quad \alpha > 0, \quad n \geq 1.$$

Результаты ошибки измерений граничных условий заданы в виде функций $\varphi(x)$ – температуры и $\psi(x)$ – теплового потока, отличающихся от истинных физических значений (2) на малую величину δ , зависящую от точности измерений. Это показывает сильную зависимость точности решения (14) от расположения относительно рассматриваемой области точки с вычислением операторов дифференцирования $\frac{d^{2k}\varphi(x)}{dx^{2k}}$ и $\frac{d^{2k}\psi(x)}{dx^{2k}}$.

Непрерывная зависимость построенного решения (14) от исходных функций $\varphi(x)$ – температуры и $\psi(x)$ – теплового потока и точность решения рассматриваются относительно исходных данных (2) и решения (14), а не от истинных граничных данных функций $\varphi(x)$ и $\psi(x)$ и описания реального физического процесса (14). Отметим, что все сказанное остаётся в силе, если поменять местами ошибки измерений. Граничные условия заданы в виде функций $\varphi(x)$ и $\psi(x)$, отличающихся от истинных физических значений (2) на малую величину δ , и вычисление операторов дифференцирования

$$\frac{d^{2k}\varphi(x)}{dx^{2k}} \text{ и } \frac{d^{2k}\psi(x)}{dx^{2k}}.$$

При достаточно малом значении параметра регуляризации решение (15) задачи стремится к решению (14), а не к описанию реального физического процесса (1)–(2). Оно может стремиться к решению задачи (1)–(2) при стремлении ошибки измерений к нулю, что нереально.

Фактически решение $u_\alpha(x, y)$ (15), которое является регуляризованным решением задачи, есть аналитическое решение задачи (1)–(2). Ясно также, что, варьируя положением и количеством точек вычислений операторов дифференцирования $\frac{d^{2k}\varphi(x)}{dx^{2k}}$ и

$$\frac{d^{2k}\psi(x)}{dx^{2k}}, \text{ можно для истинной физической задачи (1)–(2) построить решения типа (15)}$$

в неограниченном количестве.

Таким образом, в обсуждаемых случаях (при существовании единственных решений) регуляризованные решения снимают трудности при реализации решения, но не решают проблему построения истинного физического решения и по сути своей равноценны «некорректным» по Адамару аналитическим решениям.

4. Результаты расчетов. Была построена программная реализация указанного метода решения задачи для стационарного распространения тепла в бесконечной полосе, описываемого гармоническими функциями на системе MatLab. Для реального физического распространения тепла в полосе $\{-\infty < x < \infty, \quad 0 < y < y_0\}$ точно описывается функцией $u(x, y)$ в виде (1)–(2).

Следуя [16], в качестве точного решения задача (1)–(2) была взята функция распространения тепла в виде:

$$u(x, y) = \frac{b - y}{(b - y)^2 + (a - x)^2} + \frac{b - y}{(b - y)^2 + (a + x)^2}. \quad (16)$$

В качестве исходного распространения тепла была взята функция

$$\varphi(x) = \frac{b}{b^2 + (a - x)^2} + \frac{b}{b^2 + (a + x)^2},$$

поток тепла функции

$$\psi(x) = \frac{b^2 - (a - x)^2}{b^2 + (a - x)^2} - \frac{b^2 - (a + x)^2}{b^2 + (a + x)^2}$$

и, возмущенный тепловой поток в виде функции

$$\tilde{\psi}(x) = \frac{b^2 - (a - x)^2}{b^2 + (a - x)^2} - \frac{b^2 - (a + x)^2}{b^2 + (a + x)^2} + \delta \frac{b^2 - (a_1 - x)^2}{b^2 + (a_1 - x)^2} - \frac{b^2 - (a_1 + x)^2}{b^2 + (a_1 + x)^2}.$$

Вычислены значения функций $u(x, y)$, $\tilde{u}(x, y)$, $u_\alpha(x, y)$ по формулам (9), (15), (16)

при следующих значениях, входящих в (16) постоянных параметров:

$$\{-a < x < a, \quad 0 < y < b\};$$

$$a = 2; \quad a_1 = 1.5; \quad b = 0.75 \quad (0.5; \quad 0.3),$$

$$\delta = 3.0e - 1; \quad (3.0e - 2; \quad 3.0e - 3).$$

На графиках (рис.1) приведены значения приближенного и точного решений.

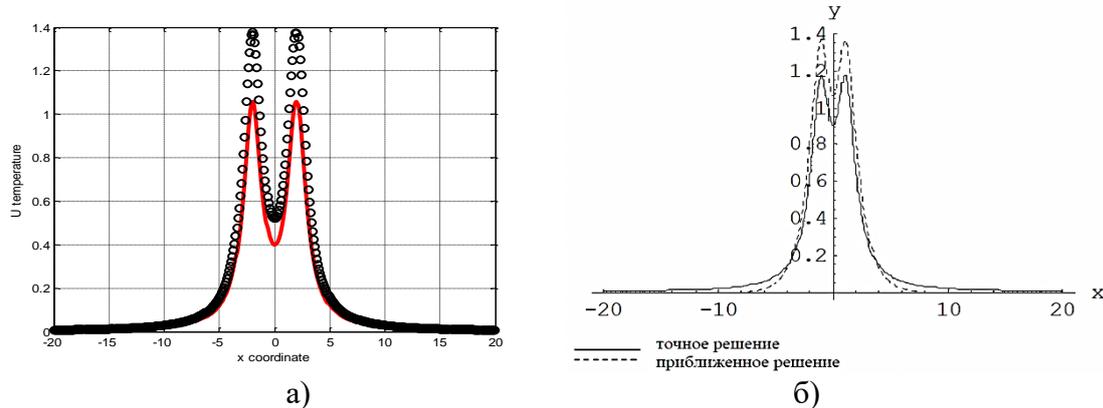


Рисунок 1. Точные и возмущенные решения задачи (1)–(2): а) _____ точное решение; **оооо** возмущенное решение в виде функции (16); б) результат работы [16].

На рис. 2 приведены значения точного и аналитического решений. Можно отметить, что приближенное решение заметно отличается от точного решения как на близких, так и на дальних расстояниях. Аналитическое решение близко к точному решению на близких (от расположения точек с дополнительными данными) расстояниях и отличается от точного решения на дальних расстояниях. Таким образом, коррекция решения произошла на близких к точке с дополнительным данным расстояниях. Это подтверждается данными, приведенными на рис 2.

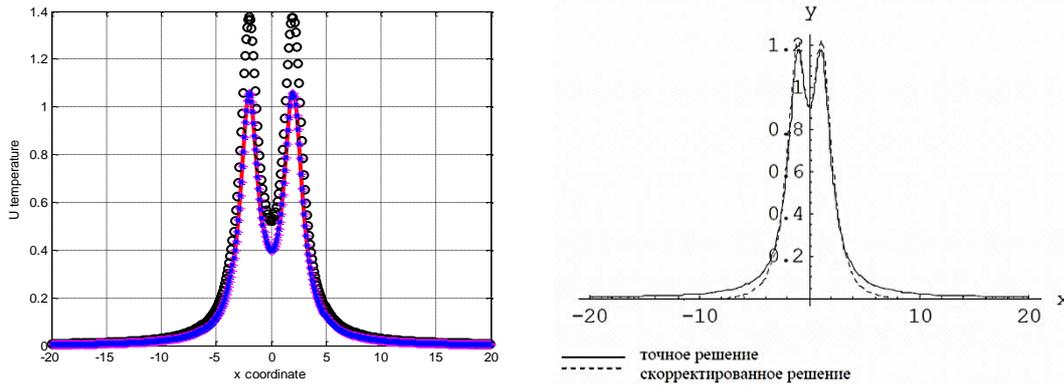


Рисунок 2. Стационарное распространение тепла: а) функции вида (3), $\bullet\bullet\bullet\bullet$ возмущенное решение; (9) --- регуляризации; (15) ++++ регуляризации с помощью интегрального преобразования Фурье; б) результат работы.

При расчетах варьировался параметр y , задающий свойства ширины полосы (рис. 1 а) при $y = 0.75$, б) при $y = 0.50$, в) при $y = 0.25$. На основе результатов решения перечисленных задач можно выделить основные закономерности проникновения и распространения тепла в полосе.

Для выявления эффектов (некорректность) рассматривались методы аналитических и специальных рядов. Для аналитических функций точных и возмущенных исходных данных функция распространения тепла непрерывно зависит от функции начального распространения тепла и теплового потока. На рис. 2 приведены графики распространения тепла для задачи (1)–(2). Аналогично для этого случая проведены сравнения методом регуляризации [16].

На график приведены значения аналитического, приближенного и точного решений (рис. 1 и 2). Можно отметить, что приближенное решение заметно отличается от точного решения, как на близких, так и на дальних расстояниях. Регуляризованное решение близко к точному решению на близких расстояниях и отличается от точного решения на дальних расстояниях от расположения точек $(x, y = 0)$. Приведенный численный пример показывает возможность эффективного использования аналитических решений для уточнения стационарного распространения тепла в бесконечной полосе. Приведенный численный пример показывает возможность эффективного использования дополнительных данных для уточнения приближенных решений. Однако вопрос, при каких условиях имеет место уточнение решения, остается открытым.

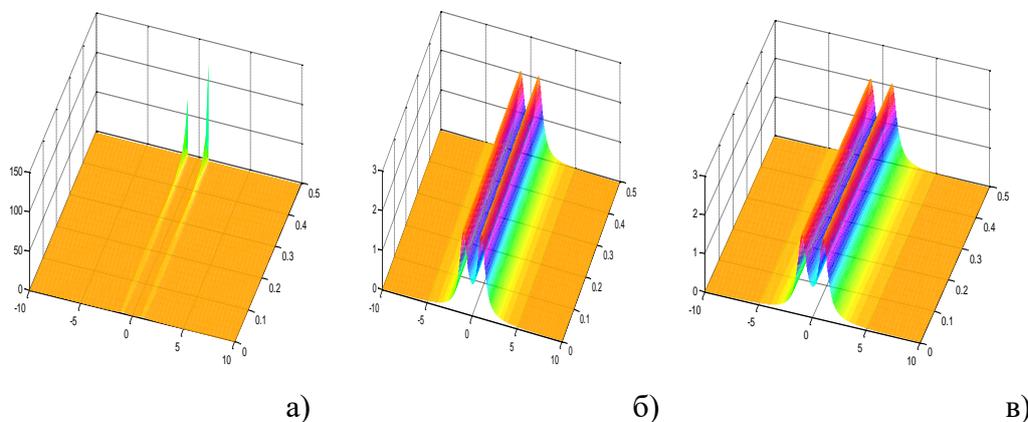


Рисунок 3. Стационарное распространение тепла в пространстве: а) функции вида (3) специальный ряд; б) регуляризация (9); в) регуляризация с помощью интегрального преобразования Фурье (15)

Заключение

Решая задачу непрерывной зависимости распространения тепла от значения температуры и теплового потока, мы можем построить аналитический регуляризованный алгоритм решения применительно к заданным граничным условиям (значениям температуры и теплового потока). Эти решения существуют и единственны по предположению, как в приведенные в п. 2, относительно функций температуры и теплового потока, в классе $L_2(-\infty, \infty)$ функций. Вычислительные трудности, связанные с наличием

операторов дифференцирования $\frac{d^{2k}\varphi(x)}{dx^{2k}}$ и $\frac{d^{2k}\psi(x)}{dx^{2k}}$ для решений, в принципе, преодо-

лены. В случае же аналитических решений считаем наличие особенностей возможных

операторов дифференцирований $\frac{d^{2k}\varphi(x)}{dx^{2k}}$ и $\frac{d^{2k}\psi(x)}{dx^{2k}}$, физически оправданными. Их

можно интерпретировать как источники, истоки (тепла, жидкости), сосредоточенные силы и моменты, сильные концентрации напряжений и т.п. По физическим сообра-

жениям, этих особенностей (операторов дифференцирований $\frac{d^{2k}\varphi(x)}{dx^{2k}}$ и $\frac{d^{2k}\psi(x)}{dx^{2k}}$) не

должно быть, и если они дают «вклад» в заданные граничные условия (температуры и теплового потока) в пределах «ошибки измерений», то они могут быть просто вычтены из решения, при этом температура и тепловой поток не должны выходить за пределы известной точности измерений. При аналитических решениях с выделенными операторами

дифференцирования $\frac{d^{2k}\varphi(x)}{dx^{2k}}$ и $\frac{d^{2k}\psi(x)}{dx^{2k}}$, – уточняется решение во всей области,

а не только в окрестности точки температуры и теплового потока.

Понятие регуляризованный алгоритм решения не является решением реальной физической задачи и приводит к попыткам ее изменений. Существует множество предложений этих изменений: отбрасывание больших (бесконечных) значений в малой окрестности точки температуры и теплового потока, предложение использовать физические соображения, предложение перерасчета данных на новый уровень (предложенный геофизиками для гравиметрической задачи).

Другие предложения изменений относятся к ограничению пространства непрерывности искомых функций. При этом возникают вопросы о существовании решений и согласованности исходных данных функций температуры и теплового потока.

Таким образом, можно считать, что аналитические решения типа приведенных специальных рядов в п. 2–п. 4 и регуляризованный алгоритм решения в физическом смысле равносильны. При этом ни один из них не гарантирует совпадение с реальным физическим решением. Каждой реализации или интерполяции дискретных данных физических измерений соответствует свое аналитическое решение и каждому алгоритму регуляризации соответствует свое решение. В обоих случаях мы можем иметь неограниченное множество разных решений.

Литература

1. Тихонов А.Н. К вопросу о методах определения температуры поверхности тела / А.Н. Тихонов, В.Б. Гласко // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1967. – Т.7. – №4. – С. 911–914.
2. Леттес Р. Метод квазиобращения и его приложения / Р. Леттес, Ж.Л. Лионс // – М.: Мир. – 1970. – 336 с.
3. Лаврентьев М.М. Некорректные задачи математической физики и анализа / М.М. Лаврентьев, В.Г. Романов, С.П. Шишатский. – М.: Наука, 1980. – 286 с.
4. Тихонов А.Н. Методы решения некорректных задач / А.Н. Тихонов, В.Я. Арсени.– М.: Наука, 1986. – 288 с.
5. Dinh Nho Hao Towards the Cauchy problem for the Laplace equation / Dinh Nho Hao, Tran Duc Van, Rudolf Gorenflo // Banach Center Publication. 1992. Vol. 27, Issue: 1. P. 111–128.
6. Лаврентьев М.М. О некоторых некорректных задачах математической физики. –Новосибирск: СО АН СССР, 1962. – 93 с.
7. Иванов В.К. Задача Коши для уравнений Лапласа в бесконечной полосе / В.К. Иванов // Дифференциальные уравнения, 1965. –Т.1. №1. –С.131–136.
8. Джураев Х.Ш. Некорректно поставленные задачи математической физики / Х.Ш. Джураев // Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. –156 с.
9. Джураев Х.Ш. Регуляризация граничных задач для гиперболического уравнения / Х.Ш. Джураев // Математические заметки. 2013. Вып. 2. №1. – С. 202–209.
10. Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости / С. Патанкар. – М.: Энергоатомиздат. 1984. –152 с.
11. Бек Дж. Некорректные обратные задачи теплопроводности. Пер. с англ. / Дж.Бек, Б.Блакуэлл, Ч. Сент–Клэр мл. // – М.: Мир. 1989. – 312 с.
12. Самарский А.А. Вычислительная теплопередача / А.А. Самарский, П.Н. Вабищевич. – М.: Эдиториал. 2003. – 748 с.
13. Михайлов В.П. Дифференциальные уравнения в частных производных / В.П. Михайлов // – М.: Наука, 1976. – 392 с.
14. Сизиков В.С. Устойчивые методы обработки результатов измерений / В.С. Сизиков – Санкт-Петербург (СПб): Специальная литература. 1999. – 239 с.
15. Арсенин В.Я. Об одном способе приближенных решений интегральных уравнений первого рода типа сверток // Математическая логика, теория алгоритмов и теория множеств. – Труды МИ АН СССР. – М.: Наука, 1973. –Т. 133. – С. 33–51.
16. Саргсян В.Г. О решении некорректной задачи теплопроводности с переопределенными исходными данными / В.Г.Саргсян, А.С. Хачикян // Изв. НАН Армении. Механика. 2008. Т. 61. №3.– С. 58–63.

К.А. Пресняков, Г.О. Аскалиева
Институт автоматизации и информационных технологий
Национальной академии наук Кыргызской Республики, г.Бишкек.
87guzya@mail.ru

О МЕТОДЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРНОГО КИНЕМАТИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА НА ОСНОВЕ НОВОЙ ИНФОРМАТИВНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ

Разработан метод определения поверхностной скорости воды на основе нового информативного параметра, учитывающего влияние пульсации скорости (или уровня) воды на колебания поплавкового датчика, позволяющий упростить измерения и повысить их надежность.

Ключевые слова: поплавковый датчик – инклинометр, угол отклонения, поверхностная скорость воды.

Постановка задачи исследований. В литературе существует большое количество разнообразных методов измерения кинематических характеристик потоков воды (см., например [1, 2]). Среди них можно, в частности, выделить контактные и бесконтактные методы измерений. Бесконтактные методы характерны тем, что на поток воды воздействуют какими-либо видами физических излучений (лазерное, радиоактивное), или химического, механического вторжения в поток воды и т.д. При этом целостность потока не нарушается или если нарушается, то незначительным образом (радиоактивные метки, химические реагенты или механические включения), когда содержание подобных индикаторов в потоке воды достаточно мало. Контактные методы основаны на непосредственном контакте измерительных датчиков с потоком воды.

Известен метод определения средней (по сечению потока) скорости воды [3], заключающийся в том, что измерительный датчик размещают в точке потока воды с относительной вертикальной координатой 0,4 от дна водотока, измеряют упомянутым датчиком скорость воды, которую отождествляют со средней (по сечению потока) скоростью воды.

Недостаток известного метода – в зависимости координаты точки наблюдения средней (по сечению потока) скорости воды от коэффициента Шези [4].

Наиболее близким к предлагаемому является корреляционный способ измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке [2], включающий выделение на поверхности воды двух контрольных участков, отстоящих друг от друга по направлению движения потока воды на фиксированном расстоянии; измерение флуктуации случайно изменяющихся параметров потока одного и того же рода на каждом из контрольных участков посредством соответствующих измерительных преобразователей; определение абсциссы максимальной ординаты взаимной корреляционной функции двух электрических сигналов от соответствующих измерительных преобразователей, – в котором в качестве информативных параметров движения воды используют пульсации скорости на фиксированных контрольных участках поверхности потока воды; измерение флуктуации скорости на фиксированных контрольных участках осуществляют поплавковыми акселерометрами; поплавковыми акселерометрами на каждом из фиксированных контрольных участков одновременно регистрируют соответствующие флуктуации трех компонент скорости по трем координатным направлениям; определяют дифференциальные тензоры скоростей для каждого контрольного участка, компонентами которых

служат соответствующие девять скалярных производных от трех компонент скоростей по трем координатным направлениям; информационные электрические сигналы преобразуют в цифровой телеметрический радиосигнал в соответствии с протоколом технологии беспроводных сенсорных сетей ZigBee и посредством трансиверов поплавковых акселерометров передают по соответствующим радиоканалам в информационно-вычислительную систему для последующей дистанционной обработки.

Недостаток известного метода – излишне большой объем измеряемой и обрабатываемой информации, что затрудняет применение указанного метода.

При разработке упомянутых методов измерений формируют определенное число информативных параметров, отображающих взаимодействие измерительных датчиков с потоком воды, в результате которого получают искомую кинематическую характеристику.

При этом необходимо выделение ведущего информативного параметра, отображающего результат указанного взаимодействия.

В описанных выше примерах наблюдаем совокупность двух параметров (координата наблюдения средней скорости воды; коэффициент Шези) или девяти скалярных составляющих тензора турбулентности (без ярко выраженного ведущего информативного параметра).

При необходимости упрощения упомянутых методов явно напрашивается стремление или к сокращению упомянутой совокупности, или к выделению ведущего информативного параметра.

Задача исследования: разработать метод определения характерного кинематического параметра на основе новой информативной характеристики с целью упрощения и повышения надежности указанного метода.

Решение поставленной задачи. Под характерным кинематическим параметром потока воды будем подразумевать поверхностную скорость воды.

В качестве нового информативного параметра, как будет указано ниже, назначим угол отклонения поплавкового датчика от вертикали в вертикальной плоскости динамической оси потока.

В гидравлике [5] известна формула расхода воды

$$Q = u \cdot H \cdot B, \quad (1)$$

где Q ($\text{м}^3/\text{с}$), u ($\text{м}/\text{с}$), H (м) – средние значения расхода и скорости воды, глубины наполнения водотока соответственно; B (м) – ширина водотока.

Очевидно, что

$$\begin{aligned} Q &= Q_i - Q' \\ u &= u_i - u' \\ H &= H_i - H', \end{aligned} \quad (2)$$

где Q_i , u_i , H_i – текущие значения указанных величин; Q' , u' , H' – пульсации этих величин.

Подставим выражения (2) в формулу (1)

$$Q_i - Q' = (u_i - u') \cdot (H_i - H') \cdot B. \quad (3)$$

Вынесем из круглых скобок Q_i , u_i , H_i , получим

$$Q_i \left(1 - \frac{Q'}{Q_i} \right) = u_i \left\{ 1 - \frac{u'}{u_i} \right\} \cdot H_i \left\{ 1 - \frac{H'}{H_i} \right\} \cdot B. \quad (4)$$

Очевидно, что

$$Q_i = u_i \cdot H_i \cdot B. \quad (5)$$

С учетом формулы (5) выражение (4) примет вид

$$1 - \frac{Q'}{Q_i} = \left\{ 1 - \frac{u'}{u_i} \right\} \cdot \left\{ 1 - \frac{H'}{H_i} \right\}. \quad (6)$$

Из формулы (6) выразим $\frac{H'}{H_i}$:

$$\begin{aligned} \frac{H'}{H_i} &= 1 - \frac{1 - \frac{Q'}{Q_i}}{1 - \frac{u'}{u_i}}, \\ \frac{H'}{H_i} &= \frac{1 - \frac{u'}{u_i} - \left(1 - \frac{Q'}{Q_i} \right)}{1 - \frac{u'}{u_i}}, \\ \frac{H'}{H_i} &= \frac{\frac{Q'}{Q_i} - \frac{u'}{u_i}}{1 - \frac{u'}{u_i}}. \end{aligned} \quad (7)$$

Разложим выражение $\frac{1}{1 - \frac{u'}{u_i}}$ с точностью до моментов второго порядка

$$\frac{1}{1 - \frac{u'}{u_i}} \approx 1 + \frac{u'}{u_i} + \left(\frac{u'}{u_i} \right)^2. \quad (8)$$

Подставим (8) в (7)

$$\begin{aligned} \frac{H'}{H_i} &= \left(\frac{Q'}{Q_i} - \frac{u'}{u_i} \right) \cdot \left(1 + \frac{u'}{u_i} + \left(\frac{u'}{u_i} \right)^2 \right), \\ \frac{H'}{H_i} &= \frac{Q'}{Q_i} + \frac{Q'}{Q_i} \cdot \frac{u'}{u_i} + \frac{Q'}{Q_i} \cdot \left(\frac{u'}{u_i} \right)^2 - \frac{u'}{u_i} - \left(\frac{u'}{u_i} \right)^2 - \left(\frac{u'}{u_i} \right)^3. \end{aligned}$$

Ограничимся членами порядка второго момента

$$\frac{H'}{H_i} = \frac{Q'}{Q_i} + \frac{Q'}{Q_i} \cdot \frac{u'}{u_i} - \frac{u'}{u_i} - \left(\frac{u'}{u_i} \right)^2.$$

Окончательно искомое выражение запишется в виде

$$\frac{H'}{H_i} = \frac{Q'}{Q_i} + \frac{u'}{u_i} \cdot \left(\frac{Q'}{Q_i} - 1 - \frac{u'}{u_i} \right). \quad (9)$$

Так как глубина наполнения водотока и средняя скорость воды входят в формулу (1) равноправным образом, то выражение для относительных пульсаций скорости воды запишется в виде, аналогичном формуле (9)

$$\frac{u'}{u_i} = \frac{Q'}{Q_i} + \frac{H'}{H_i} \cdot \left(\frac{Q'}{Q_i} - 1 - \frac{H'}{H_i} \right). \quad (10)$$

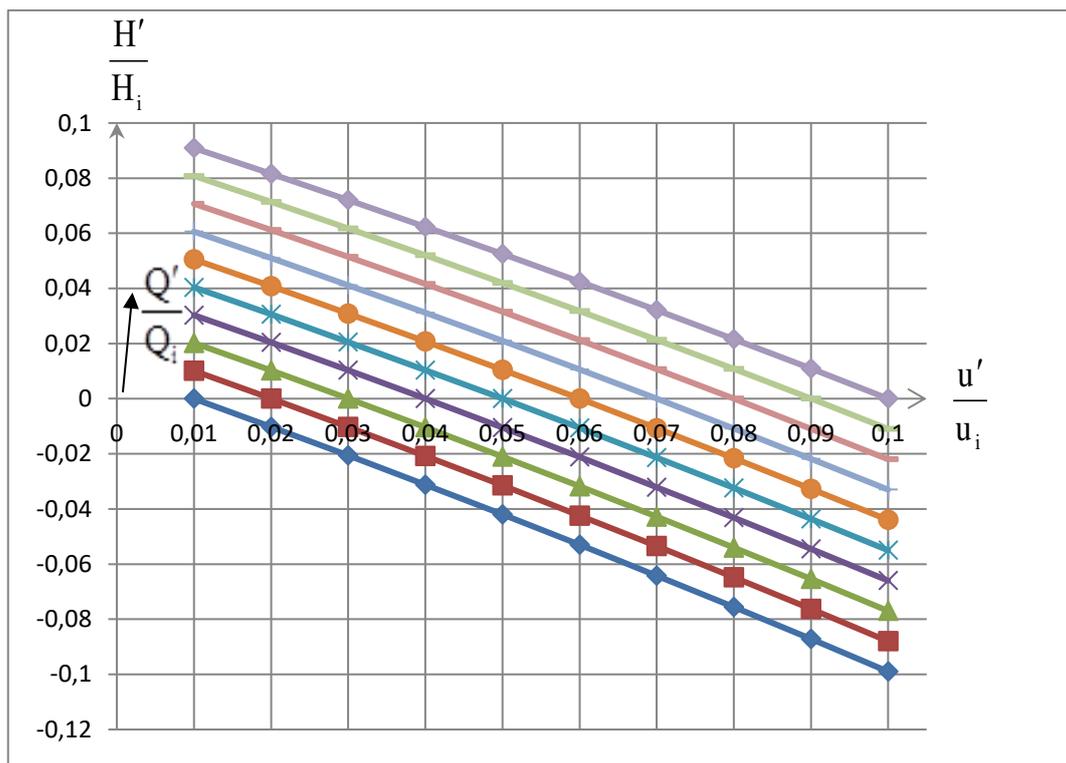


Рисунок 1. Связь между $\frac{H'}{H_i}$ и $\frac{u'}{u_i}$, $\frac{Q'}{Q_i}$

Следовательно, в качестве нового информативного параметра в упомянутом методе можно назначить угол отклонения α (поплавкового датчика) от вертикали в вертикальной плоскости динамической оси потока, причем

$$\frac{\alpha'}{\alpha_i} \sim \frac{u'}{u_i} \left(\text{или} \frac{\alpha'}{\alpha_i} \sim \frac{H'}{H_i} \right).$$

Техническая реализация метода. Техническую реализацию метода определения поверхностной скорости воды иллюстрируют чертежом (см. рисунок 2).

На берегу 3 водотока установлена неподвижная опора 7, к которой упруго 4 подвешен базирующий стержень 5, на свободном конце которого размещен в приповерхностном слое 2 потока 1 воды поплавковый датчик – инклинометр 6, в который встроен трансивер (не указан) для передачи измеряемой информации в информационно-вычислительную систему ИИС8, расположенную на водомерном посту (не указан).

Метод определения поверхностной скорости воды осуществляют следующим образом.

Поток 1 воды вместе с его приповерхностным слоем 2 направляют на поплавковый датчик – инклинометр 6, который благодаря упругому подвесу 4 (к неподвижной опоре 7 на берегу 3 водотока) базирующего стержня 5 находится в полупогруженном состоянии (в приповерхностном слое 2 потока 1 воды) и благодаря воздействию на поплавковый датчик – инклинометр 6 пульсаций скорости (или уровня) воды в приповерхностном слое 2 потока 1 воды – поплавковый датчик – инклинометр 6 совершает колебания около своей горизонтальной оси в вертикальной плоскости динамической оси потока 1.

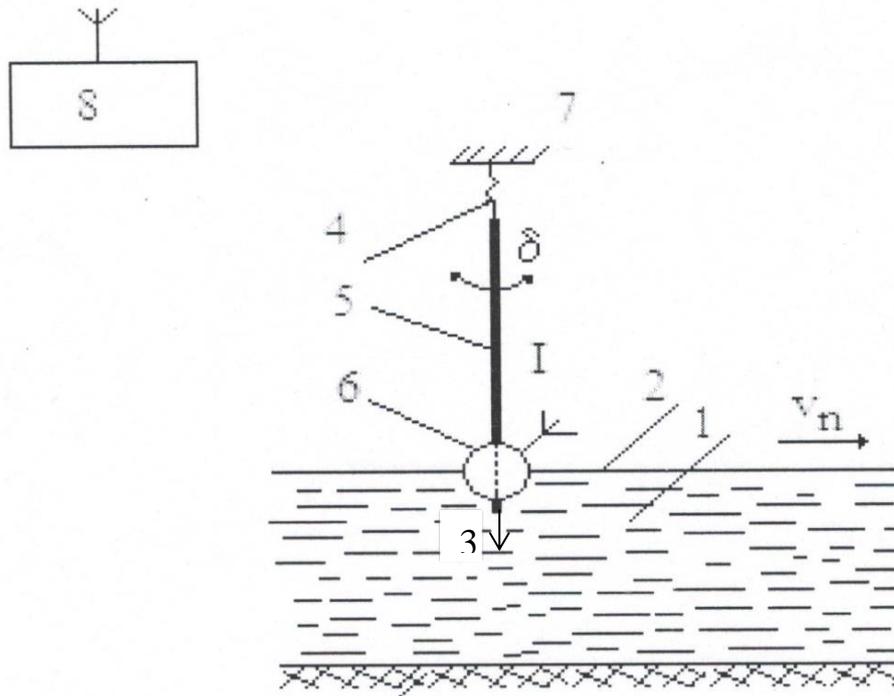


Рисунок 2. Схема технической реализации метода определения поверхностной скорости воды: 1 – поток воды; 2 – поверхность потока воды; 3 – берег водотока; 4 – упругий подвес; 5 – базирующий стержень; 6 – поплавковый инклинометр со встроенным трансивером; 7 – неподвижная опора; 8 – информационно-вычислительная система (ИИС), расположенная на водомерных постах; δ – угловые колебания поплавкового инклинометра в вертикальной плоскости по направлению потока воды

Обработка результатов измерений. На изученном открытом водотоке проводят в пределах промежутка времени Δt измерения поплавковым датчиком – инклинометром 6:

➤ пульсаций угла отклонения поплавкового датчика – инклинометра 6 от вертикали в вертикальной плоскости динамической оси потока 1 и получают следующий ряд их значений

$$\alpha'_1, \dots, \alpha'_i, \dots, \alpha'_n, \quad \text{где } n \text{ – число измерений;} \quad (11)$$

➤ пульсаций скорости воды в течение того же промежутка времени и получают следующий ряд их значений

$$u'_1, \dots, u'_i, \dots, u'_n. \quad (12)$$

Результаты измерений (11), (12) посредством трансивера поплавкового датчика – инклинометра 6 передают в ИИС 8, где их обрабатывают и определяют среднеквадратичные значения пульсаций угла отклонения $\sqrt{\alpha'_{\text{ИБ}}'^2}$ и скорости воды $\sqrt{u'_{\text{ИБ}}'^2}$, а также тарировочный коэффициент по формуле

$$k_r = \left\{ \frac{\sqrt{\alpha'_{\text{ИБ}}'^2 / \alpha_m}}{\sqrt{u'_{\text{ИБ}}'^2 / u_m}} \right\}_{\text{ИБ}}, \quad (13)$$

где индекс «ИБ» означает принадлежность результатов измерений к изученному открытому водотоку.

Затем на исследуемом объекте в гидравлических условиях, подобных гидравлическим условиям изученного открытого водотока, проводят поплавковым датчиком – инклинометром 6 измерения типа (11), (12) и используя значения тарировочного коэффициента k_T (13), поверхностную скорость воды вычисляют по формуле

$$u_m = k_T \cdot \frac{\sqrt{u'^2}}{\sqrt{\alpha'^2 / \alpha_m}}, \quad (14)$$

где u_m – поверхностная скорость воды, м/с; $\sqrt{u'^2}$ – среднеквадратичная пульсация скорости воды, м/с; $\sqrt{\alpha'^2 / \alpha_m}$ – относительное среднеквадратичное значение пульсации угла отклонения; k_T – тарировочный коэффициент определяют на основе гидрометрических измерений в изученном открытом водотоке при подобных (предлагаемым) гидравлических условиях, определяют в ИИС 8 поверхностную скорость воды.

Оценим значение тарировочного коэффициента k_T для водотока с единичными гидравлическими условиями: $Q=1$ м³/с, $\bar{u}=1$ м/с, $H=1$ м, $B=1$ м, $i=0,01$ (граничное значение уклона дна водотоков между реками равнинной и горно-предгорной зон). Для этого проведем следующие вычисления:

- коэффициента Шези

$$C = \frac{\bar{u}}{\sqrt{H \cdot i}} = \frac{1}{\sqrt{1 \cdot 0,01}} = 10 \text{ м}^{1/2}/\text{с}; \quad (15)$$

- параметра показательного профиля скорости воды

$$m = 1,5 + \frac{0,314 \cdot C}{\sqrt{g}} = 1,5 + \frac{0,314 \cdot 10}{\sqrt{9,81}} = 2; \quad (16)$$

- значения максимальной скорости воды

$$u_m = \frac{\bar{u}}{\tilde{y}^{1/m}} = \frac{1}{0,4^{0,5}} = 1,59 \text{ м/с}; \quad (17)$$

- значения динамической скорости воды

$$u_* = \sqrt{g \cdot H \cdot i} = \sqrt{9,81 \cdot 1 \cdot 0,01} = 0,31 \text{ м/с}; \quad (18)$$

- среднего (по сечению потока) значения среднеквадратичной пульсации продольной скорости воды [6, с. 91, т.2]

$$\sqrt{u'^2} = 1,20 \cdot u_* = 1,20 \cdot 0,31 = 0,37 \text{ м/с}. \quad (19)$$

Оценим относительное среднеквадратичное значение пульсаций угла отклонения поплавкового датчика – инклинометра 6, полагая, что максимальной угол отклонения α_m составляет $\pi/2$ рад, а среднее значение его пульсаций – $\pi/4$ рад.

Тогда тарировочный коэффициент будет равен

$$k_T = \left\{ \frac{0,5}{0,37/1,59} \right\} = \frac{0,50}{0,23} = 2,17. \quad (20)$$

Для условий других изученных открытых водотоков значения коэффициента k_T могут отличаться от (20).

Указанное выше исполнение метода определения поверхностной скорости воды позволяет по сравнению с прототипом: во-первых, использовать новый информативный параметр – угол отклонения поплавкового датчика (от вертикали) в вертикальной плоскости динамической оси потока; во-вторых, уменьшить количество измерительных точек с двух до одной; в-третьих, существенно сократить объем измеряемой и обрабатываемой информации, что позволяет повысить надежность предлагаемого метода.

Эффективность метода определения поверхностной скорости воды заключается в существенном упрощении и повышении его надежности.

Литература

1. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ / Кремлевский П.П. // Кн.2. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с.
2. Брякин И.В., Пресняков К.А., Керимкулова Г.К. Корреляционный способ измерения поверхностной скорости воды в открытом водотоке / Патент КР №1964. – Бишкек: Кыргызпатент.– Бюллетень патентов и товарных знаков КР.–№ 6.– 30.06.2017. – 20 с.
3. Пресняков К.А. О координатах характерных точек во взвесенесущем потоке воды // Проблемы автоматизации и управления.– 2003. –№1.– С. 92–97.
4. Железняков Г.В. Теория гидрометрии. Л.:Гидрометеиздат, 1976., 2-е изд., 334 с.
5. Чугаев Р.Р. Гидравлика. –Л.: Энергия (Лен.отделение), 1976.
6. Пресняков К.А. Ведущее условие применимости модели двухфазного дисперсоида к взвесенесущему потоку воды // Проблемы автоматизации и управления. – 2002. – № 1 – С. 84–89.

Х.Ш. Джураев, А.М. Наджмиддинов, С. Хасанов

Таджикский национальный университет, Таджикистан, Душанбе

hayrullo_58@mail.ru

ПРИБЛИЖЕННЫЕ АНАЛИТИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ СТАЦИОНАРНОЙ ЗАДАЧИ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПРИ НАГРЕВЕ ВНУТРЕННИМИ ИСТОЧНИКАМИ, ЗАВИСЯЩИМИ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Материальная среда распространения тепла всегда связана с тепловым сигналом структурных единиц. Если процесс теплообмена является сложным, тогда для его исследования используются методы, обобщающие результаты различных простых методов. Одним из таких методов является метод фазовой плоскости. Поэтому, предложено стационарное распределение теплового потока в зависимости от температуры в конденсированных средах. Такой анализ необходим на этапах алгоритмизации нелинейных краевых задач и верификации моделей.

Ключевые слова: уравнения теплопроводности, стационарное состояния, фазовая плоскость, критические условия, тепловой поток; температура.

В настоящее время в целях тепловой защиты всё чаще применяются материалы с низкими коэффициентами теплопроводности, которые, как правило, растут с повышением температуры. Проблемы, связанные с нелинейным нагревом в конденсированных средах конструкций от действия внутренних источников теплоты, имеют важный научный и практический интерес [1-4]. При решении этих проблем важнейшей задачей является определение зависимости теплового потока от температуры, при которой количество получаемой от источника теплоты не может быть полностью отведено от конструкции при заданных граничных условиях теплообмена. Такие режимы нагрева приводят к неограниченному возрастанию температуры в конструкции и в конечном итоге – к её тепловому разрушению. Для определения зависимости теплового потока от температуры необходимо иметь приближенное решение соответствующей краевой задачи [5, 6].

Эффективным методом решения задач теплопроводности для нелинейного нагрева конденсированных сред конструкций является метод, основанный на применении некоторых пробных математических параметров (регуляризации, релаксации теплового потока) [7, 8].

Рассмотрим конденсированную среду, в которой на поверхности $x = x_0 = 0$ заданы нулевыми градиент температуры и плотность теплового потока, а на поверхности $x = x_n = h$ – некоторые, отличные от нуля, значения градиента температуры и плотности теплового потока. Процесс распространения тепла – в положительную половину конденсированных сред переменных (q, T) , поскольку параметры поверхности одинаковы. Поэтому граничные условия для температуры и плотности теплового потока можно записать в виде:

$$\left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=0} = 0 \quad \text{и} \quad q|_{x=0} = 0; \tag{1}$$

$$-\lambda \left. \frac{dT}{dx} \right|_{x=h} = \alpha(T_1 - T_2) \quad \text{и} \quad q|_{x=h} = \alpha(T_1 - T_2),$$

где T_1 и T_2 – соответственно, температура в начале и конце образца; α – коэффициент теплоотдачи $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} \right)$; h – длина образца, м.

Математическое моделирование теплопроводности для определения стационарной температуры конденсированных сред в конструкции с нелинейными внутренними источниками теплоты с учётом (1) в этом случае будет иметь вид [7, 8]:

$$\begin{cases} \frac{dT}{dx} = -\frac{q}{\lambda} - \eta_1 T, \\ \frac{dq}{dx} = \varphi(T) - \eta_2 q, \end{cases} \tag{2}$$

где $T = T(x)$ – температура в точке x , (K), $q = q(x)$ – плотность теплового потока в точке x $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} \right)$; $\eta_1 = \frac{\mu - 1}{x + \varepsilon - (\mu - 1)(x + \varepsilon)^\mu}$, $\left(\frac{1}{\text{м}} \right)$; $\eta_2 = \frac{1 - \mu(\mu - 1)(x + \varepsilon)^{\mu-1}}{x + \varepsilon - (\mu - 1)(x + \varepsilon)^\mu}$, $\left(\frac{1}{\text{м}} \right)$, число компоненты, характеризующей коэффициенты уравнения теплопроводности в конденсированной среде. При $\eta_1 + \eta_2 = 0$, то есть когда $\mu = 0$, среда имеет форму плоского сосуда, а когда $\eta_1 + \eta_2 = \frac{1}{x + \varepsilon}$, то есть $\mu = 1$, сосуд имеет цилиндрическую форму, а при $\eta_1 + \eta_2 = \frac{2}{x + \varepsilon}$, то есть $\mu = 2$ сосуд принимает сферическую форму, а ε малый параметр ($0 \leq \varepsilon < 1$). Функция $\varphi(T)$ описывает нелинейный теплообмен между телом и окружающей средой.

Будем рассматривать состояние равновесия и устойчивости системы. Приравнивая левые части уравнения (2) нулю, получим:

$$\begin{cases} -\frac{q}{\lambda} - \eta_1 T = 0, \\ \varphi(T) - \eta_2 q = 0. \end{cases} \tag{3}$$

Решение системы уравнений (3) позволяет определить особую точку в фазовой плоскости (T, q) . В зависимости от значения функции $\varphi(T)$, могут иметь бесконечное число равновесных состояний, то есть уравнения (3) может иметь бесконечное множество решений, которые могут быть устойчивыми или неустойчивыми. Таким образом, состояние равновесия является особой точкой, в которой плотность теплового потока сливается с потоком энергии, то есть $T(x_*) = q(x_*)$.

Характер состояния равновесия определяется корнями характеристического уравнения (2). В зависимости от направления теплообмена между телом и окружающей средой будем иметь один из случаев состояния равновесия. Крутизна функции $\varphi(T)$ определяет состояние равновесия.

Однако, зачастую найти аналитическое решение системы уравнений (3) невозможно. В этом случае применяем известные методы из теории дифференциальных уравнений, которые позволяют, не решая в явном виде уравнения (2), определить характер стационарного состояния, устойчивость или неустойчивость её решения. При этом используем некоторые свойства правых частей уравнения (2), а также

особенности переходных процессов вблизи стационарного состояния $\varphi(T)$. Подчеркнем, что такого рода общие характеристики сложных систем уравнений представляют, как правило, наибольший интерес.

Сложная система может обладать несколькими стационарными состояниями, что соответствует наличию нескольких корней в алгебраических уравнениях (3) для определения координат стационарной точки. В случае одной переменной кривая пересекает ось абсцисс в нескольких точках, в каждой из которых функция $\varphi(T)$ обращается в нуль. Любая из этих точек $(\bar{T}_1, \bar{T}_2, \dots)$, в которой функция $\varphi(T)$ обращается в нуль, является состоянием равновесия. В зависимости от значений тех или иных параметров системы или констант, а также теплового потока изменяется состояние равновесия и, кроме того, в системе могут реализоваться различные стационарные структуры. При дальнейшем нагревании вещества плотность теплового потока изменяется в пространстве. Поэтому для исследования характера изменения величины q в пространстве с изменением температуры, определим, используя уравнения (2), отношения $\frac{dq}{dT}$. В результате получим следующее уравнение:

$$\frac{dq}{dT} = \frac{-\lambda\varphi(T) + \lambda\eta_2q}{q + \lambda\eta_1T} = F_1(T, q). \quad (4)$$

Здесь правая часть уравнения (4) обозначена через $F_1(T, q)$. Это означает, что нас будет интересовать характер и число состояний равновесия в системе в зависимости от величины q . Стационарные точки $T = \bar{T}$ определяются из уравнения

$$F_1(T, q) = 0 \text{ или } \varphi(\bar{T}) - \eta_2q = 0. \quad (5)$$

Используя уравнение (5) исследуем, как будет двигаться изображающая точка по интегральным кривым на фазовой плоскости. Так как q представляет плотность теплового потока $q > \eta_1T$, в этом случае в верхней фазовой полуплоскости изображающая точка движется так, что температура T возрастает, а при $q < \eta_1T$ в нижней полуплоскости T уменьшается. Таким путем определяется направление движения температуры по фазовым траекториям.

Из уравнения (5) вытекает уже отмеченное нами обстоятельство, что во всякой точке фазовой плоскости изображающая точка имеет конечный и отличный от нуля градиент, за исключением состояний равновесия, в которых

$$q = -\lambda\eta_1T \text{ и } \varphi(T) = \eta_2q.$$

В силу этих условий все состояния равновесия расположены в фазовой плоскости, на оси T , причем их абсциссы удовлетворяют уравнению $\varphi(T) = \eta_2q$.

Теперь исследуем кривые на фазовой плоскости (q, T) , в которых касательные к фазовым траекториям имеют один и тот же наклон. Если динамическая система описывается уравнением (4), касательные к фазовым траекториям определяются выражением

$$\frac{\lambda(\eta_2q - \varphi(T))}{q + \lambda\eta_1T} = k, \quad (6)$$

где k – является коэффициентом теплопередачи $\left(\frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}\right)$.

Придавая k различные значения, получаем семейство касательных к фазовой траектории. На фазовой плоскости построим определенное число касательных, необходимых для построения фазовой траектории. Чем ближе друг к другу расположены касательные, тем точнее можно будет провести фазовую траекторию.

Уравнение касательной к фазовой траектории можно получить из выражения (6):

$$q = \frac{\lambda(\eta_1 k T + \varphi(T))}{\lambda \eta_2 - k}, \text{ при } \lambda \eta_2 \neq k. \quad (7)$$

Для наглядной интерпретации полученных результатов, используя выражение (7), проведем численный расчёт зависимости плотности теплового потока от изменения температуры. При проведении численных расчётов функцию $\varphi(T)$ принимаем в следующем виде: $\varphi(T) = \alpha_1 T - \alpha_2 T^3$, где α_1, α_2 – коэффициенты пропорциональности. Значения коэффициентов α_1 и α_2 , λ и x взяты из работ [9, 10].

В алгоритм решения задачи построим на фазовой плоскости структуры, определяющие поведение решения краевой задачи. Задавая температуры T и решая уравнения (6) относительно переменной q , получим координаты ветвей сепаратрис. На рис. 1 представлены изображения нелинейных задач на плоскостях (T, q) . Анализ рис. 1 а) показывает, что нелинейность источника тепла приводит к росту теплового потока на порядок практически во всем диапазоне температур от 293 до 700 К на фазовой плоскости.

На фазовой плоскости (T, q) распределение температур в среде будет представлять собой небольшой отрезок вертикальной прямой, расположенный вблизи оси абсцисс. Численное решение задачи распределения температуры в среде [9] позволяет вычислить градиент температуры в оболочке. Он приблизительно равен 10^3 K/м (см. рис. 1 б)). Фактически, решение задачи на плоскости (T, q) находится на оси абсцисс. На рис. 1 а) это решение будет непрерывным, представляющим практически вертикальную линию, проходящую через точку на оси абсцисс с координатой температуры между 300 и 350 К.

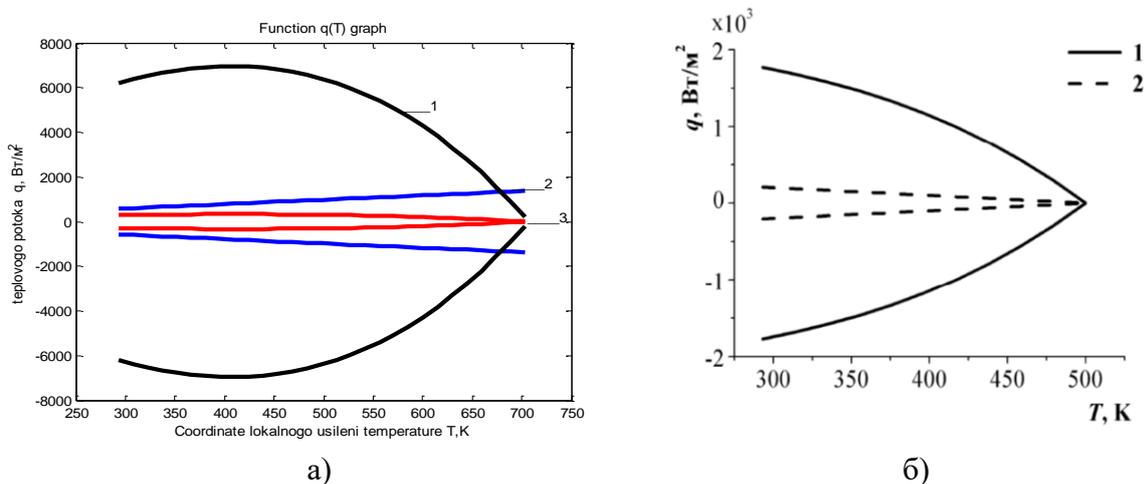


Рисунок. 1. Зависимость теплового потока от изменения температуры на фазовой плоскости ($\mu = 0$; 1; 2): а) кривая __1 представляют сепаратрисы $q(T)$ от T ; __2 граничные условия; __3 теплообмен с учетом источника; б) результаты работы [9].

Таким образом, на фазовой плоскости (T, q) имеем только одно стационарное состояние: $T = -\frac{1}{\eta_1 k} \varphi(T)$. Это стационарное состояние равномерного температурного поля реагирующей массы при нагревании. Причем стационарное состояние достигается выделением теплового самовозгорания в системе при нагревании вещества.

Литература

1. Зельдович Я.Б. Математическая теория горения и взрыва [Текст] / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махвиладзе – М.: Наука, 1980. – 478 с.
2. Курдюмов С.П. Сложные многомерные структуры горения нелинейной среды [Текст] / С.П. Курдюмов, Е.С. Куркина, А.Б. Потапов, А.А. Самарский // Журн. вычисл. математики и мат. физики. – 1986. – Т.26. № 8. – С.1189–1205.
3. Мержанов А.Г. Закономерности теплового взрыва в условиях нагрева с постоянной скоростью [Текст] / А.Г. Мержанов, А.Г. Струнина // Науч.-техн. проблемы горения и взрыва (Физика горения и взрыва). – 1965. – Т. 1. № 1. – С. 59–69.
4. Быстрой Г.П. Термодинамика необратимых процессов в открытых системах [Текст] / Г.П. Быстрой. – Москва; Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2011. – 264 с.
5. Jomaas G. Spiral waves in expanding hydrogen–air flames: Experiment and theory [Text] / G. Jomaas, J.K. Bechtold, C.K. Law // Proceedings of the Combustion Institute. – 2007. – Vol. 31. № 1. – P. 1039–1046.
6. Vychkov V. Dynamics and stability of premixed flames [Text] / V. Vychkov, M.A. Liberman // Physics reports. – 2000. – Vol. 325, no. 4. – P. 115–237.
7. Джураев Х.Ш. Распространение тепла в твердом теле при независимости источников от температуры, содержащих параметр [Текст] / Х.Ш. Джураев, А.М. Наджмиддинов // Вестн. Тадж. нац. ун-та. Сер. естеств. наук. – 2012. – № 1(52). – С. 22–24.
8. Джураев Х.Ш. Исследование зависимости стационарного распределения теплового потока от температуры в конденсированных средах [Текст] / Х.Ш. Джураев, К. Комилов, А.М. Наджмиддинов // Вестн. Тадж. нац. ун-та. Сер. естеств. наук. – 2016. №1/1 (192). – С. 114–120.
9. Зимин В. П. Изображение и анализ граничных условий для уравнения теплопроводности на фазовых плоскостях [Текст] / В.П. Зимин // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2011. – Т. 318. № 4. – С. 29–33.
10. Зимин В. П. Развитие метода фазовой плоскости для анализа решений краевых задач [Текст] / В.П. Зимин // Изв. Том. политехн. ун-та. – 2012. – Т. 321. № 2. – С.17–21

А.Ю. Волков

Кыргызско-Российский Славянский университет, г.Бишкек

luckyAleshka@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ЭНКОДЕРА В СИСТЕМЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ PROTEUS

В статье рассматриваются различные системы автоматизированного проектирования в области электроники, корректировка параметров схемы и моделирование электронной схемы устройства с применением инкрементального энкодера в системе автоматизированного проектирования Proteus.

Ключевые слова: инкрементальный энкодер, датчик углового перемещения, приборостроение, САПР.

Введение. Применение различных датчиков при разработке измерительно – диагностических устройств связано с различного рода трудностями в проведении инженерных расчетов. Использование виртуальной модели при создании схемы в аналитической форме позволит значительно упростить процесс ее разработки. Сегодня процесс проектирования электронных схем заключается в применении систем автоматизированного проектирования (САПР). Благодаря достаточной памяти современных компьютеров и высокому быстродействию, разработчик принципиальной схемы может выбирать, моделировать многократно используемые модели электронных компонентов, датчиков и т.п.. Для моделирования электрической схемы разработчик может, объединяя модели датчиков в схему будущего измерительного устройства, виртуально наблюдать за ее работой, провести топологию и смоделировать внешний вид будущей печатной платы (ПП). Затем перевести проверенную схему в элемент практической реализации (ПП) и создать рабочий образец разработанного устройства.

Обзор предлагаемого программного обеспечения. Результативность аналитической модели в значительной степени зависит от качества используемого программного обеспечения (ПО). Главные требования, предъявляемые к ПО, – простота ввода, поиска элементов моделирования, корректировки исходных данных и расширенный в настоящее время процесс обзора полученного результата с применением технологии визуализации, разработанной ПП в виде 3D – модели.

Современное ПО САПР можно разделить на три группы:

- архитектурно – строительные САПР (CAD/AEC – Architectural, Engineering and Construction);
- машиностроительные САПР (MCAD – Mechanical Computer Aided Design);
- САПР по электронике, которые представлены двумя разновидностями:

ПО, предназначенное для создания электронных схем и их моделирования, и ПО, специализирующееся на разработке печатных плат.

К последней группе САПР можно отнести следующие программы, в которых реализуются удобные графические пользовательские возможности: MicroCap, ELECTRONICS WORKBENCH (EW), PCAD, Proteus и др.

Специалисты многих областей науки и техники используют методы компьютерного моделирования, позволяющие моделировать приборы с заданными параметрами и имитировать их работу. Это в значительной мере упрощает и ускоряет процесс проведения эксперимента.

Рассмотрим программу САПР EW (рис.1), обеспечивающую ввод электрических схем для их дальнейшего моделирования и позволяющую создавать текстовое описание цифровых устройств на языках VHDL и Verilog для синтеза ПЛИС (программируемых логических интегральных схем). Программные продукты EW относятся к средствам EDA (Electronic Design Automation), которые используют конструкторы и схемотехники при компьютерном моделировании электронной аппаратуры [1].

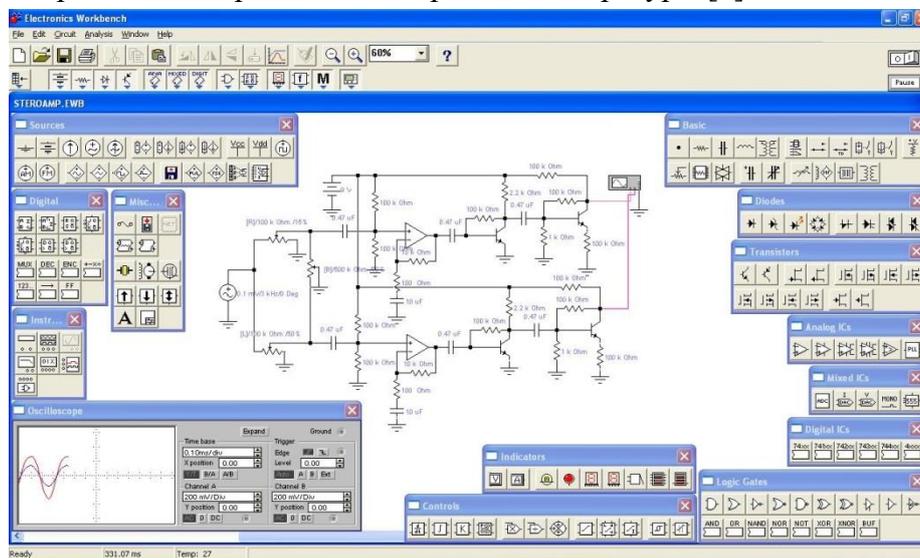


Рисунок 1. Главное окно программы EW

Если в САПР высокого уровня наблюдается узкая специализация, то в программе EW, предназначенной для самостоятельного изучения, а также для обучения студентов технических специальностей, такой направленности нет.

САПР прошли несколько этапов развития, которые во многом определялись характеристиками имеющихся на тот момент электронно – вычислительных машин (ЭВМ). Одной из первых САПР по электронике является программа MicroCap[2] (рис.2) – система компьютерного моделирования аналоговых и цифровых схем, в основе которой лежит технология SPICE.

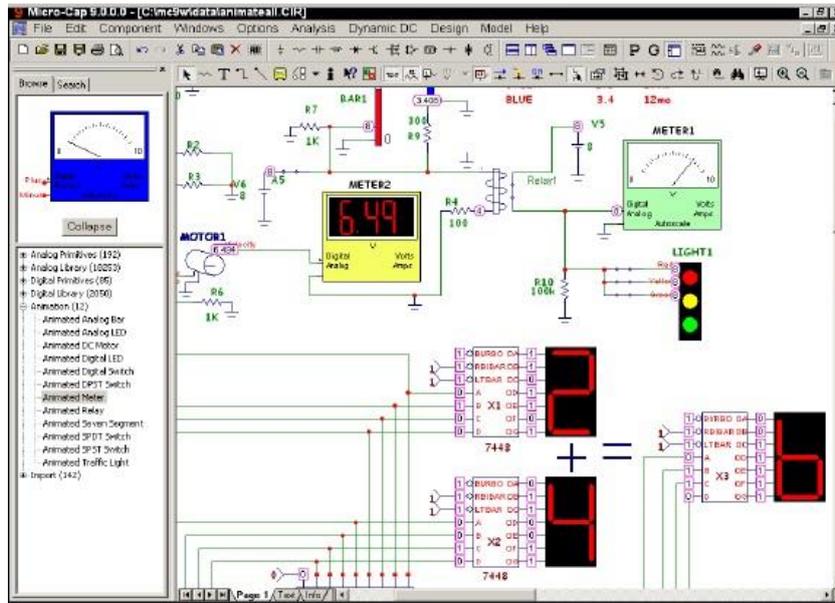


Рисунок 2. Главное окно программы MicroCap

Снижение стоимости аппаратных средств и ПО привело к появлению САПР широкого применения для создания схем и разводки ПП – программы PCAD [3] (рис. 3).

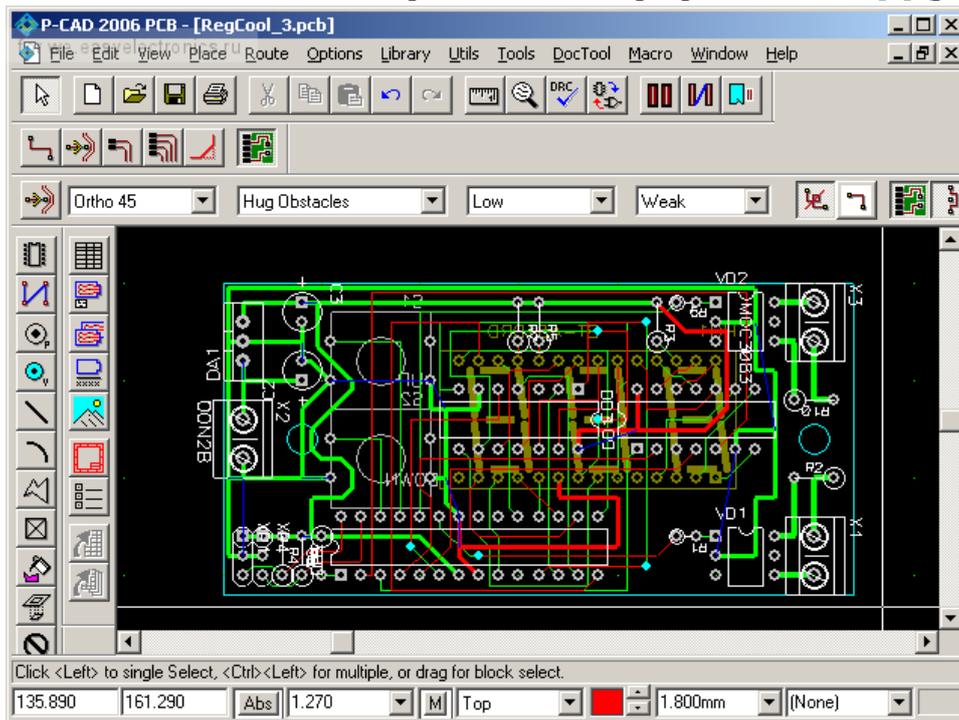


Рисунок 3. Главное окно программы PCAD

Бурное развитие микропроцессоров создало предпосылки использования рабочих станций на персональных ЭВМ, что заметно снизило стоимость внедрения САПР на предприятиях. Постоянно продолжают их совершенствование и расширение функциональности. Примером может служить ПО Proteus [4] (рис. 4), которое состоит из двух частей: ISIS – программы синтеза и моделирования непосредственно электронных схем и ARES – программы разработки ПП.

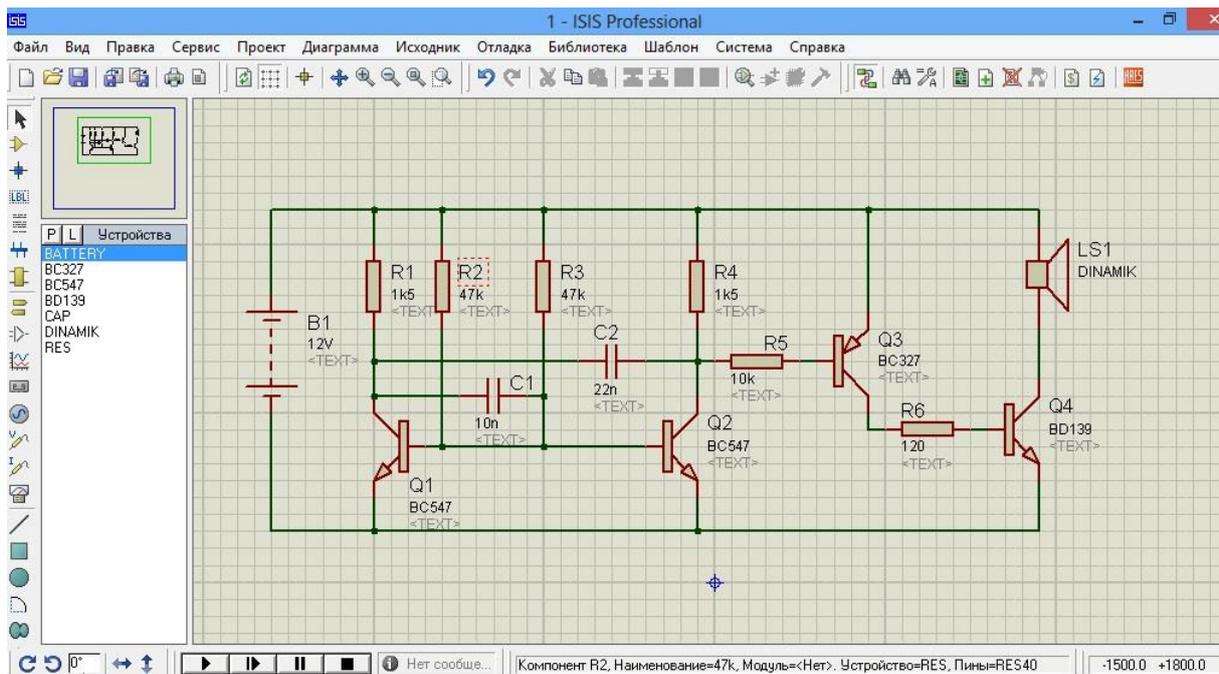


Рисунок 4. Главное окно системы Proteus

После моделирования схемы в разделе ISIS при создании ПП в разделе ARES программа Proteus позволяет разработать топологию будущего устройства и его 3D – модель (рис. 5).

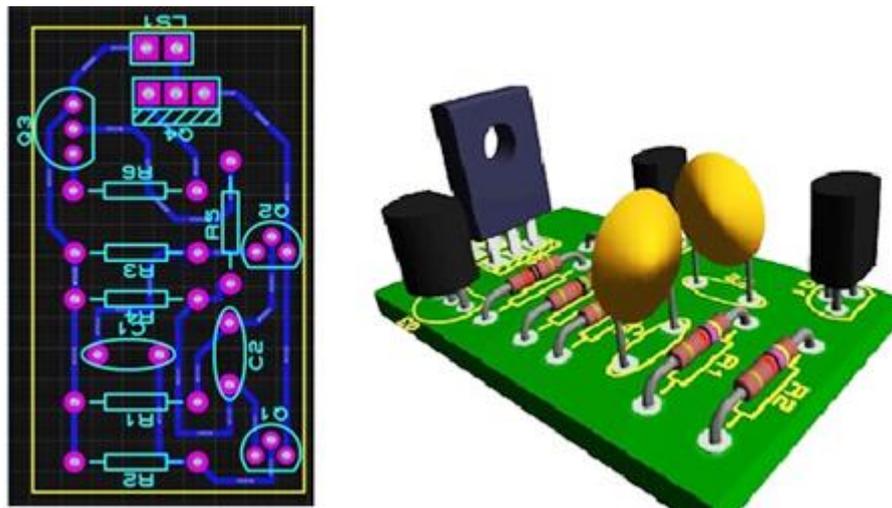


Рисунок 5. 3D – модель в программе Proteus

Proteus может соперничать с ПО, разработчики которого интегрируют в нем модули различного назначения, например P – CAD предназначен для разработки ПП, OrCAD 9.2 [5] – для моделирования электронных устройств и разработки ПП, программа Max+Plus II – для синтеза ПЛИС, выпускаемых фирмой Altera, и такой пакет программ, как MicroCap и др.

Применение САПР дает возможность инженерам многократно использовать и заменять радиокомпоненты, ускоряет процесс проектирования ПП, что в итоге позволяет перейти к безмакетной технологии производства ПП. Это создает условия для автоматизации разработки конструкторской и технологической документации, проведения инженерных расчётов и исследований.

Применяемые вышеперечисленные программы берут на себя рутинную часть разработки электронной аппаратуры, проведения необходимых расчетов, предоставления справочной информации, моделирования созданной схемы, построения ее топологии, оставляя инженеру творческую работу по поиску оптимального технического решения.

Постановка задачи. При разработке различных измерительно – диагностических устройств используют датчики, которые преобразуют угол передвижения или перемещения вдоль оси координат в значение напряжения, позволяющее вычислить величину перемещения относительно начального положения [6]. Для моделирования в САПР важно знать характеристики этих сигналов: период, длительности высокого и низкого уровней.

Датчик углового перемещения – устройство, преобразующее угол поворота вращающегося объекта (вала) в электрические сигналы, позволяющие определить этот угол. Датчики разделяются на два типа [7]:

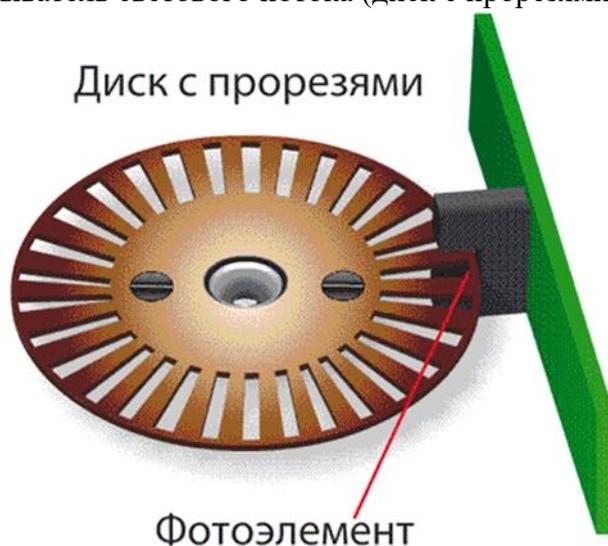
I. Абсолютный – датчик возвращает своё абсолютное положение.

II. Инкрементальный – датчик выдаёт импульсы, означающие изменение его положения.

Кроме того, датчики различаются по принципу действия:

1. резисторные (потенциометры);
2. с щеточными контактами;
3. оптические;
4. магнитные (датчик Холла);
5. индуктивные;
6. емкостные.

Рассмотрим возможность САПР Proteus для проектирования инкрементального энкодера (далее ИЭН) на примере разработки схемы измерительного устройства оптического принципа действия, состоящего из светоизлучателя лампы накаливания или светодиода (СД) и фотоприемника – фотодиода (ФД) или фототранзистора, между которыми находится прерыватель светового потока (диск с прорезями – рис. 6).



На рис. 7 изображена электрическая принципиальная схема ИЭН, где светодиод Vd1 при прохождении через него прямого тока излучает световой поток, попадающий на фотодиод Vd2. Предельно допустимое значение тока для светодиода, применяемого в схеме (TSAL4400), составляет $I_{пр} = 100$ мА, при этом максимально допустимая мощность излучателя равна $P_0 = 160$ мВт [8]. Построим передаточную характеристику датчика – зависимость выходного напряжения U от мощности излучения светодиода, для чего воспользуемся линейной зависимостью излучаемой мощности от прямого тока. Задавая значения тока реостатом R1 (рис. 7), изменяем мощность светового потока P . В результате моделирования была построена передаточная характеристика ИЭН (рис. 8). На графике по оси X отложена мощность в относительных единицах P/P_0 , где P_0 – значение мощности при максимальном токе светодиода. На рис. 8 приведены две передаточные характеристики ИЭН, линейные участки которых будут использованы в работе.

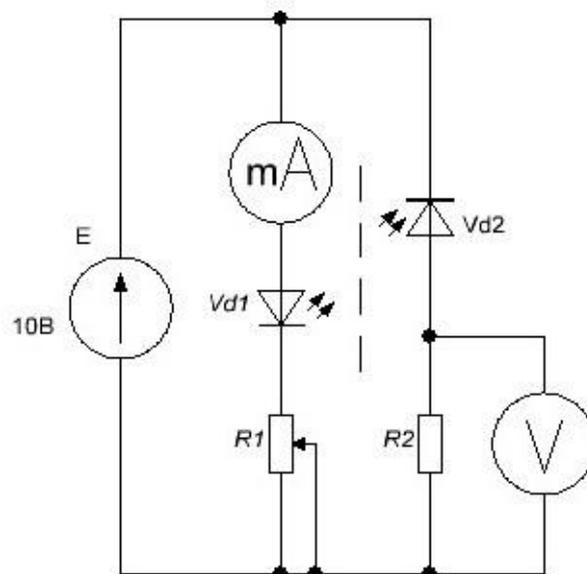


Рисунок 7. Схема ИЭН

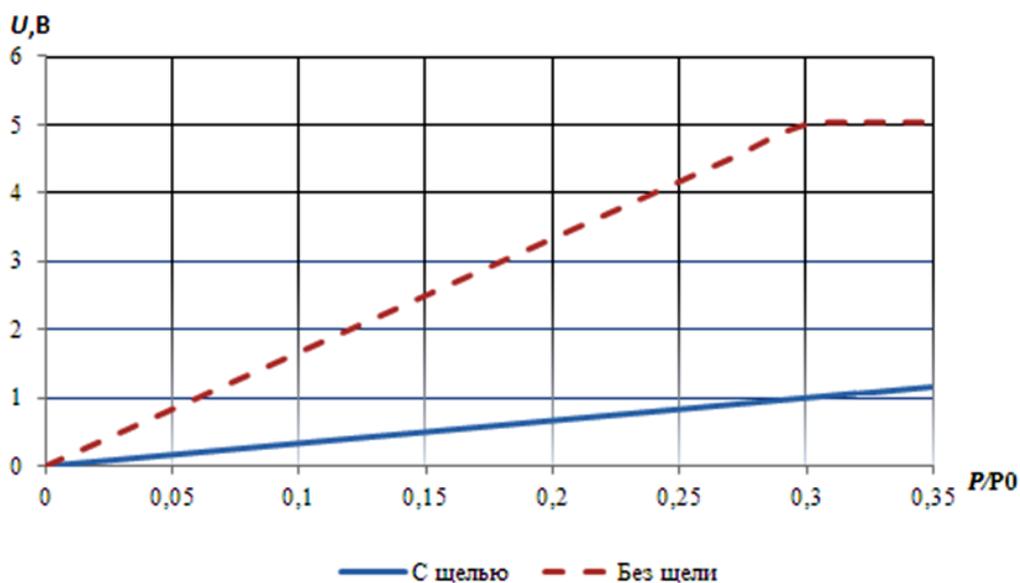


Рисунок 8. Передаточная характеристика ИЭН, построенная в программе Proteus

Рассмотрим работу ИЭН. Светочувствительный фотоприемник выполняется из полупроводникового материала, сопротивление которого изменяется обратно пропорционально освещенности. Падающий на него световой поток вызывает ионизацию в полупроводнике, изменяя его проводимость. В качестве фотоприемника чаще всего применяют фотодиоды. При обратном включении фотодиода фотоэлектрический ток пропорционален освещенности. Присутствие других источников света создаёт помехи, влияющие на результат эксперимента. Чтобы этого не происходило, ИЭН размещается в светонепроницаемом корпусе.

Если для усиления тока добавить к предыдущей схеме каскад на транзисторе (рис. 9), то передаточная характеристика принимает вид, показанный на рис. 10.

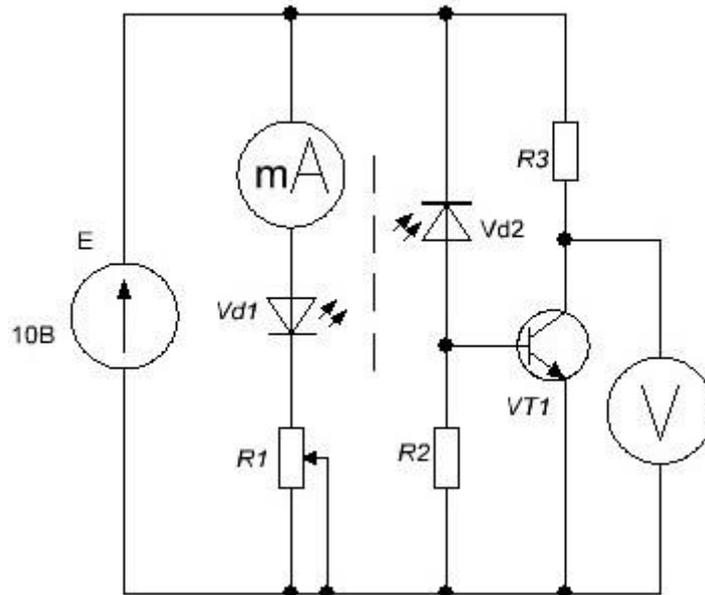


Рисунок 9. Схема ИЭН с однокаскадным усилителем

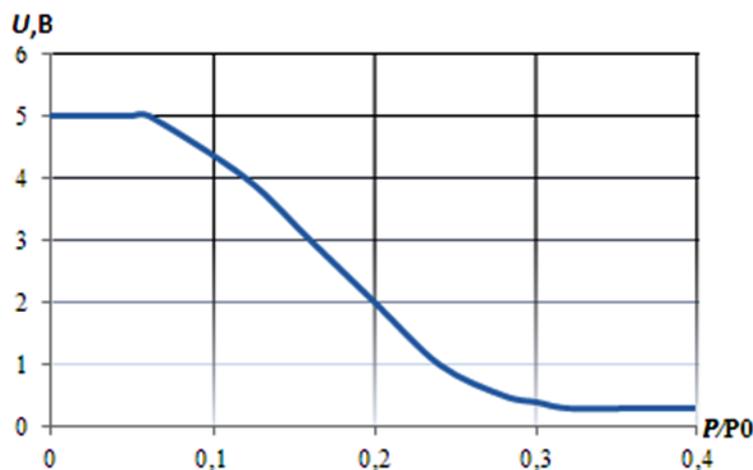


Рисунок 10. Передаточная характеристика ИЭН с однокаскадным усилителем, построенная в программе Proteus

На графике (рис. 10) наблюдаются три участка – сигнал слабый (транзистор закрыт), линейный участок усиления (при увеличении входного сигнала транзистор открывается), входной сигнал (световой поток) достаточно велик (транзистор полностью открыт).

Для передачи аналогового сигнала используется линейный участок передаточной характеристики. Для передачи цифрового сигнала этот участок не используется во избежание неопределенностей.

Для передачи дискретного сигнала добавим еще один каскад линейного усиления (рис. 11). Полученная передаточная характеристика (рис. 12) инверсна по отношению к предыдущей (рис. 10). Кроме того, линейный участок передаточной характеристики на рис. 12 сократился.

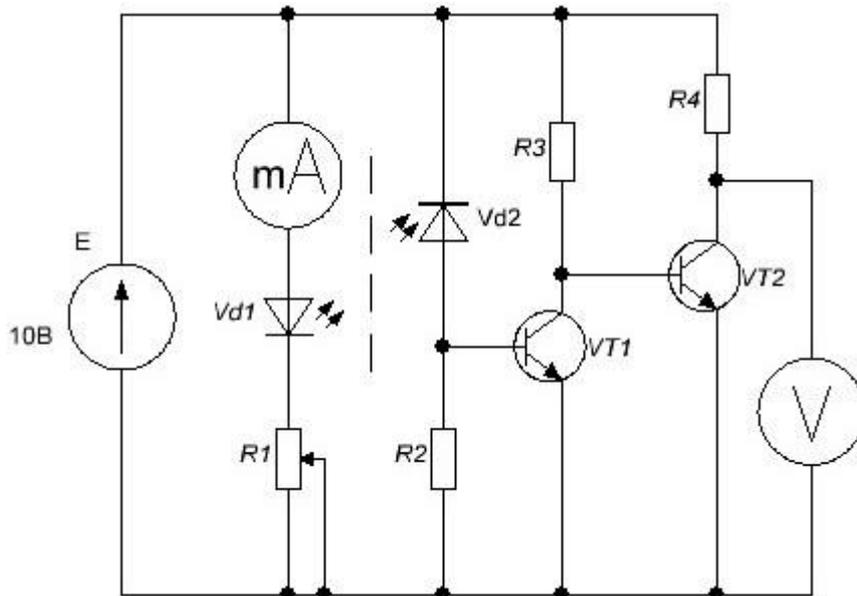


Рисунок 11. Схема ИЭН с двухкаскадным усилителем

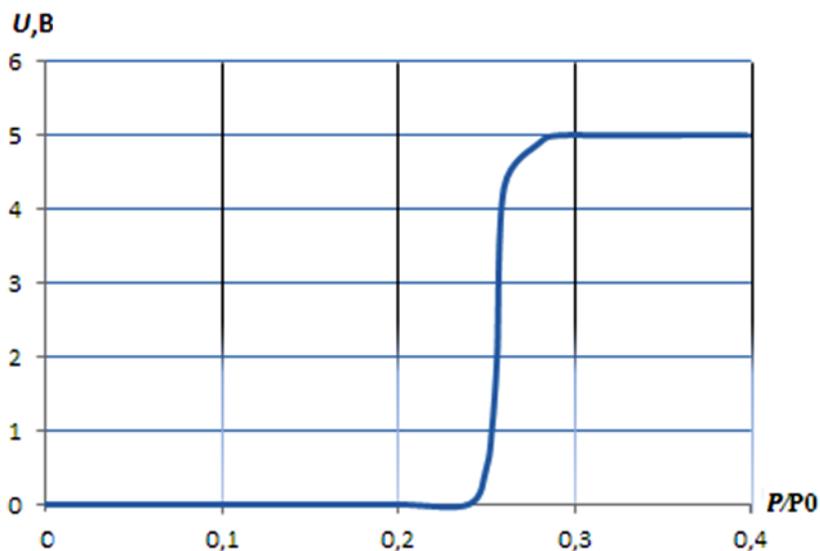


Рисунок 12. Передаточная характеристика ИЭН с двухкаскадным усилителем, построенная в программе Proteus

Если ввести в схему положительную обратную связь (рис. 13), то передаточная характеристика примет вид, показанный на рис. 14.

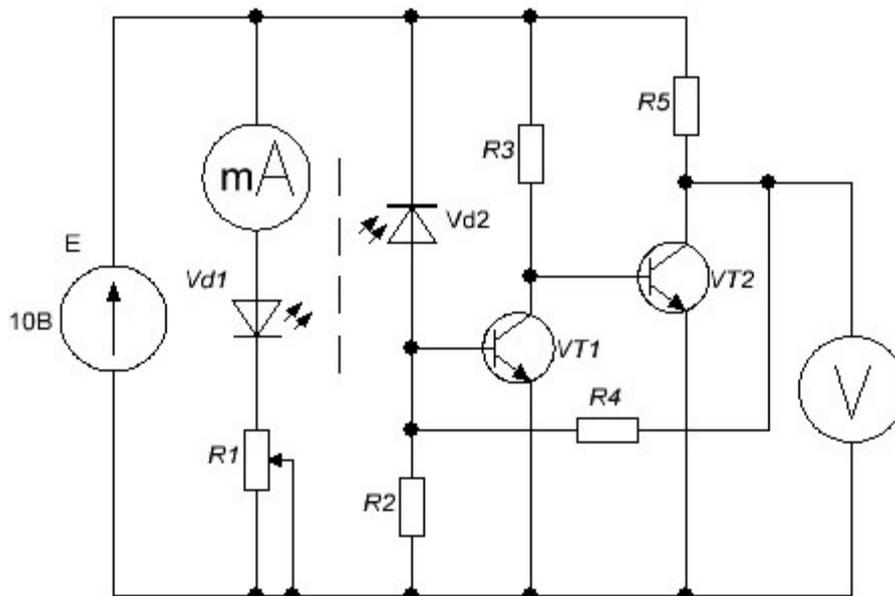


Рисунок 13. Схема ИЭН с двухкаскадным усилителем и ПОС

Введение ПОС приводит к ликвидации линейного участка передаточной характеристики и появлению петли гистерезиса, которая характеризуется различием участков повышения и понижения входного сигнала. Такая схема называется триггером Шмитта.

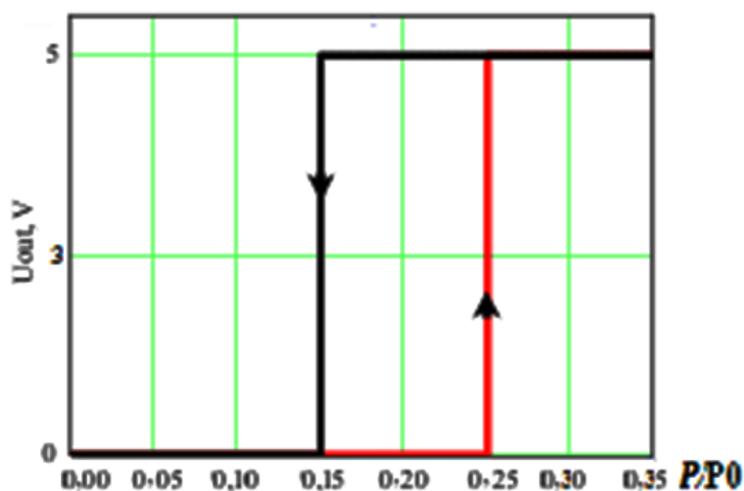


Рисунок 14. Передаточная характеристика ИЭН с двухкаскадным усилителем и ПОС, построенная в программе Proteus

На рис.14 видно, что переключение выходного транзистора происходит скачкообразно: при увеличении светового потока – при значении $0,25P/P_0$, при уменьшении светового потока – при значении $0,15P/P_0$, что удобно для передачи цифрового сигнала. В частности, при подсчете количества оборотов диска с прорезями (рис. 6) ИЭН с триггером Шмитта формирует один дискретный импульс при прохождении каждой прорези между источником и приемником света. По количеству импульсов, подсчитанных счетчиком, и известному числу прорезей на диске можно рассчитать число оборотов (угол поворота), на которые повернулся диск.

Заключение

Возможность построения виртуальных моделей в аналитической форме (построение передаточных характеристик) в программе Proteus позволяет получить оптимальный вариант схемы измерительного устройства с применением ИЭН с выходным сигналом, близким к цифровому. Виртуальное моделирование схем в реальном времени значительно сокращает затраты на проведение экспериментов.

Литература

1. Electronics Workbench The Global Standard in Electronics Education. USA: EWC, 2005.
2. **Micro – Cap 11 Electronic Circuit Analysis Program User's Guide. USA, 2016.**
3. **PCAD to Allegro Translation: Steps and Procedures. USA, 2014.**
4. **Proteus The Complete Electronics Design System Component Library Documentation. USA, 2003. Issue 1.**
5. Davis J.H. Electronic Design Project 2 Cadence OrCAD PCB Designer 16.6. USA, 2014.
6. Sensors and transducers / Keith Brindley; London : Heinemann Professional Publishing, 1988. 153 p.
7. Волков А.Ю. О состоянии и перспективах развития средств измерения углового перемещения // Проблемы автоматизации и управления – 2014. – № 1(26). – С. 160 – 168.
8. Infrared Emitters and Detectors Data Book / VISHAY SEMICONDUCTORS. – Germany: Vishay Semiconductor GmbH. – 2008. – 550 p.

Г.Н. Ниязова

Институт автоматизации и информационных технологий Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, gulmira-n.86@mail.ru

К. Сатаркулов

Институт автоматизации и информационных технологий Национальной академии наук Кыргызской Республики, г. Бишкек, satarkulov46k@mail.ru

З.С. Кыдырмаева

ККТФ КГТУ им. И.Раззакова, г. Кара-Куль, Кыргызстан

E-mail: zoza74_74@mail.ru

А.М. Яблочников

КГТУ им. И.Раззакова, г. Бишкек, Кыргызстан

E-mail: art.kazccp@mail.ru

РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ СТАБИЛИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЯ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ ТУРБИНЫ МИКРОГЭС НОВОГО ТИПА

Разработана компьютерная модель микроГЭС нового типа и выполнено ее исследование в программной среде MatLAB с расширением Simulink. Результаты моделирования показали высокую эффективность функционирования маховика с регулируемой массой и моментом инерции, которая обеспечивает устойчивую работу микроГЭС нового типа.

Ключевые слова: микроГЭС, гидротурбина, напорный трубопровод, стабилизация частоты вращения, момент инерции гидротурбины, маховик с автоматически регулируемой массой и моментом инерции

Обеспечение устойчивого энергоснабжения децентрализованных потребителей в энергодефицитных регионах может быть достигнуто использованием гидроэнергетического потенциала малых рек и ручьев и созданием высокоэффективного гидроэнергетического оборудования для малых и микроГЭС в этих регионах. В главе 10 «Развитие стратегических отраслей экономики» Национальной стратегии устойчивого развития Кыргызской Республики на период 2013 – 2017 гг. отмечено, что важными целями стратегии являются «...обеспечение энергетической безопасности Кыргызской Республики, развитие экспортного потенциала, энергосбережение, продвижение возобновляемых источников малой энергетики через создание благоприятных условий для инвестирования в данный сектор...» [1]. Несмотря на высокую потенциальную мощность гидроэнергии основных водотоков Кыргызской Республики, на сегодняшний день освоено лишь 3 % гидроресурсов малых рек. Общемировые тенденции перехода к устойчивому экологически чистому энергообеспечению, а также изменение макроэкономической ситуации в Кыргызской Республике, связанной с дефицитом и подорожанием энергоносителей, обуславливают целесообразность и высокую экономическую эффективность строительства больших и малых гидроэлектростанций, а также получения электроэнергии за счет эффективных конструкций гидроагрегатов малой мощности (микроГЭС).

Важной задачей, решаемой при создании микроГЭС, является обеспечение требуемой равномерности вращения вала гидротурбины. Неравномерность вращения связана с изменением в процессе работы движущих сил и сил сопротивления. Эти изменения вызваны как периодическим характером рабочего процесса, так и внешними изменениями. Эти процессы вызывают неравномерность вращения, которая изменяется с

периодичностью включения или отключения электроприемников. Для борьбы с этой неравномерностью при значительных колебаниях нагрузки использован новый способ стабилизации, основанный на изменении значения момента инерции гидротурбины, путем использования маховика с автоматически регулируемой массой и моментом инерции и регулирования энергии потока воды, поступающей на выходы напорного трубопровода [2]. В работе [2] проведен сравнительный анализ существующих способов стабилизации частоты микроГЭС и предложены новый способ стабилизации частоты микроГЭС и их конструктивные исполнения (КИ1, КИ2), на которые получены соответствующие патенты Кыргызской Республики [3, 6]. Получен патент и на способ стабилизации [4, 5], на основе которого функционируют микроГЭС КИ1 и КИ2. Рассмотрим способ стабилизации частоты микроГЭС КИ2, изложенный в работе [2].

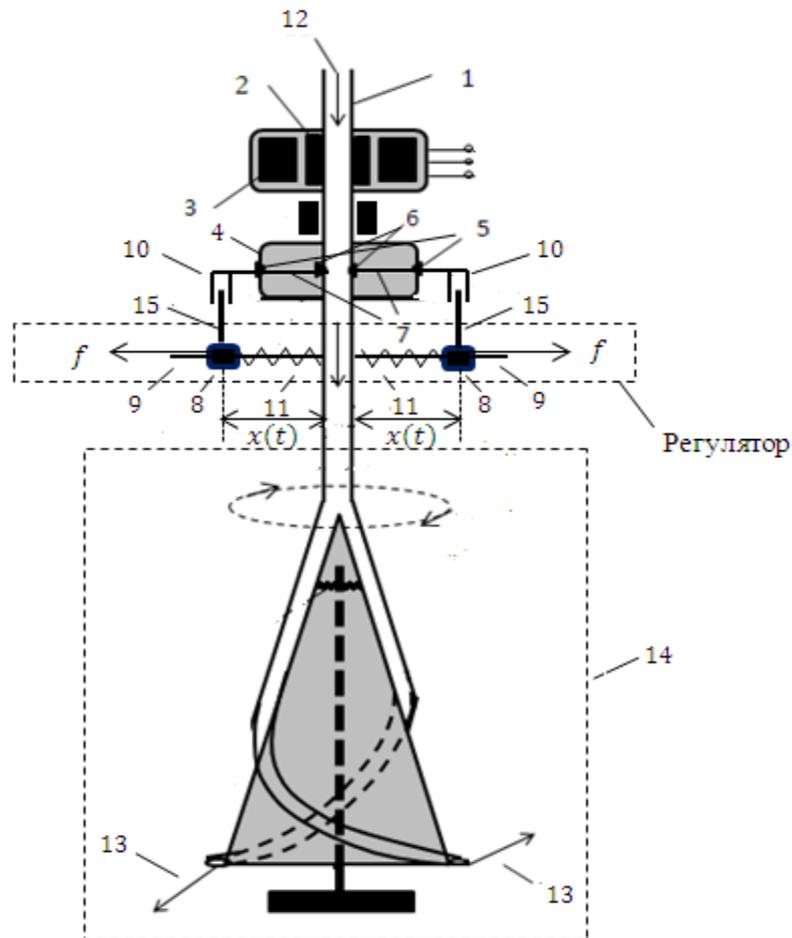


Рисунок 1. Конструкция микроГЭС

Конструктивное исполнение микроГЭС (рис.1): 1 - напорный трубопровод (НТ), одновременно выполняющий функцию вала гидротурбины (ГТ) 14; 2 – ротор генератора, жестко прикрепленный к валу ГТ; 3 – статор генератора; 4 – полый маховик для заполнения жидкостью, разделённый на две части перегородкой и жестко прикрепленный к валу ГТ. Маховик состоит из следующих элементов: 5, 6 – внешние и внутренние клапаны; 7 – спицы, к которым с одного конца жестко прикреплены цилиндрические трубки (закрытые сверху) 10, а с другой стороны клапаны 5 и 6, 9 – стержни, жестко закрепленные к валу 1, на которые насажены грузики 8 с массой m , притянутые пружинами 11; 12 – поток воды, поступающий в напорный трубопровод ГТ; 13 – поток воды, выходящий из ГТ.

Способ стабилизации частоты микроГЭС реализуется следующим образом. Поток воды 12 проходит через НТ1 и преобразуется в поток воды 13 на выходе из ГТ, образуя реактивную отдачу. В результате ротор генератора 2 и маховик 4 жестко связанные с НТ, приводятся во вращательное движение. На металлические грузики 8 воздействует центробежная сила f , заставляющая их в момент времени t двигаться вдоль стержня, отклоняя массы на величину $x(t)$ от ненапряженного состояния пружины.

Пружины 11, жестко соединенные с грузиками 8, растягиваются, появляется обратная (центростремительная) сила натяжения, действующая на грузики 8, направленная вдоль стержня 9 к центру вращения. При превышении частоты вращения вала выше номинального из-за уменьшения нагрузки генератора, центробежная сила, действующая на грузики 8, превышает центростремительную и грузики 8 начинают движение вдоль стержня 9 от центра вращения. При этом выступы 15 грузиков 8 передают силу на цилиндрические трубки 10, приводя их в движение. Так как цилиндрические трубки 10 находятся на концах спиц 7, то клапаны 6, жестко соединенные с этими спицами, открываются. При открытых клапанах 6 клапаны 5 закрываются, а полость маховика наполняется водой. При этом, во-первых, момент инерции вращающейся части микроГЭС увеличивается, во-вторых, сила напора воды 13 уменьшается. В итоге угловая скорость $\omega(t)$ вала начинает уменьшаться.

Следует отметить, что между величинами x (перемещение грузиков) и u (перемещение спиц) существует некоторая функциональная зависимость $u(x)$.

Если угловая скорость $\omega(t)$ вала уменьшается, то центробежная сила, действующая на грузики, уменьшается, и пружины подтягивают грузики ближе к центру вращения вала. Спицы 7 перемещаясь, закрывают клапаны 6, а клапаны 5 открываются. Следовательно, вода не поступает в полость маховика, а находящаяся в ней до этого вода выбрасывается центробежной силой через открытые клапаны 5, уменьшая момент инерции маховика, тем самым увеличиваются сила напора 13 и угловая скорость $\omega(t)$.

Переходим к этапам построения математической модели микроГЭС [2].

Математическая модель системы «машина-регулятор». Если обозначить через $\omega(t)$ угловую скорость вращения вала 1 (рис. 1), то можно записать уравнение, связывающее силовой момент $(F - G)$ и угловую скорость $\omega(t)$ следующим образом [7]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = F - G, \quad J \frac{d^2\theta}{dt^2} = F - G, \quad (1)$$

где F – механический момент, развиваемый ГТ; G – момент сопротивления генератора (электрический момент), $[Н \cdot м]$, действующий на вал; J – момент инерции вращающихся частей, $[кг \cdot м^2]$; θ – угол между валом и неподвижной осью, $[рад]$. Поскольку рассматриваемая синхронная машина является генератором, механический момент F является ускоряющим, а электрический момент G – тормозящим.

Предположим, что из некоторого количества автономных микроГЭС организована распределительная электрическая сеть на генераторном напряжении, тогда угол можно отсчитывать относительно синхронно вращающейся оси [8] с постоянной угловой скоростью. $\omega_{ном} (\omega_0)$, тогда

$$\theta = (\omega_0 t + \alpha) + \delta_{мех}, \quad (2)$$

где α – постоянный угол, определяемый сдвигом в пространстве синхронно вращающейся оси.

Из (2) видно, что в (1) $\frac{d^2\theta}{dt^2}$ можно заменить на $\frac{d^2\delta_{мех}}{dt^2}$, в результате чего это выражение принимает вид:

$$J \frac{d^2\delta_{мех}}{dt^2} = F - G, \quad (3)$$

где $\delta_{\text{мех}}$ – механический угол по отношению к синхронно вращающейся оси, [рад].

Умножив обе части выражения (3) на $\omega_{\text{мех}}$, получим:

$$J\omega_{\text{мех}} \frac{d^2\delta_{\text{мех}}}{dt^2} = F - G. \quad (4)$$

Из курса переходных процессов в электрических системах [9] известно, что можно записать (4) через электрический угол и в относительных единицах:

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = \omega_0(F_* - G_*),$$

где T_J – в секундах; δ – в радианах; ω_0 – синхронная скорость 1/сек; t – в секундах; F_* и G_* – в относительных единицах.

Обозначив F_* через P_0 и учитывая, что $G_* = P_M \sin \delta$, получим:

$$T_J \frac{d^2\delta}{dt^2} = \omega_0(P_0 - P_M \sin \delta). \quad (5)$$

Прделаем некоторые преобразования над параметром T_J в уравнении (5), чтобы учесть его зависимость от угла δ и времени t в математической модели микроГЭС с новым способом управления и стабилизации частоты.

$$T_J = T_{J_1} + T_{J_2}(\delta(t), t), \quad (6)$$

где T_{J_1} – неизменная составляющая механической постоянной маховика и остальных элементов конструкции микроГЭС, которые находятся во вращательном движении, когда полость маховика не заполнена водой; $T_{J_2}(\delta(t), t)$ – переменная составляющая, зависящая от угла $\delta(t)$ и времени t . Значение $T_{J_2}(\delta(t), t)$ изменяется от нуля, когда полость маховика пуста и до максимального значения связанная с объемом полости маховика.

Качественное изменение G , δ , T_{J_2} , F от времени t можно схематично показать в виде диаграммы (рис. 2).

Подставляя (6) в выражение (5), получим:

$$(T_{J_1} + T_{J_2}(\delta(t), t)) \frac{d^2\delta(t)}{dt^2} = \omega_0(P_0 - P_M \sin \delta(t)). \quad (7)$$

Конкретный вид функции $T_{J_2}(\delta)$ зависит от конструкции маховика.

Из курса механики известно, что величины $x(t)$ и f (рис.2) связаны следующими соотношениями [10]:

$$f = \beta m(x + r)\omega^2, \quad (8)$$

$$m\ddot{x} + \alpha\dot{x} + \gamma x = f. \quad (9)$$

Здесь α, β, γ, r – некоторые положительные числа. Величина γx соответствует упругой восстанавливающей силе пружины (закон Гука), величина $\alpha\dot{x}$ соответствует силе трения. Здесь мы принимаем, что справедлив закон вязкого трения: сила трения пропорциональна скорости $\dot{x}(t)$ и число α является коэффициентом пропорциональности. Другими видами трения, кроме вязкого, мы здесь пренебрегаем. Числу r соответствует длина пружины в ненапряженном состоянии.

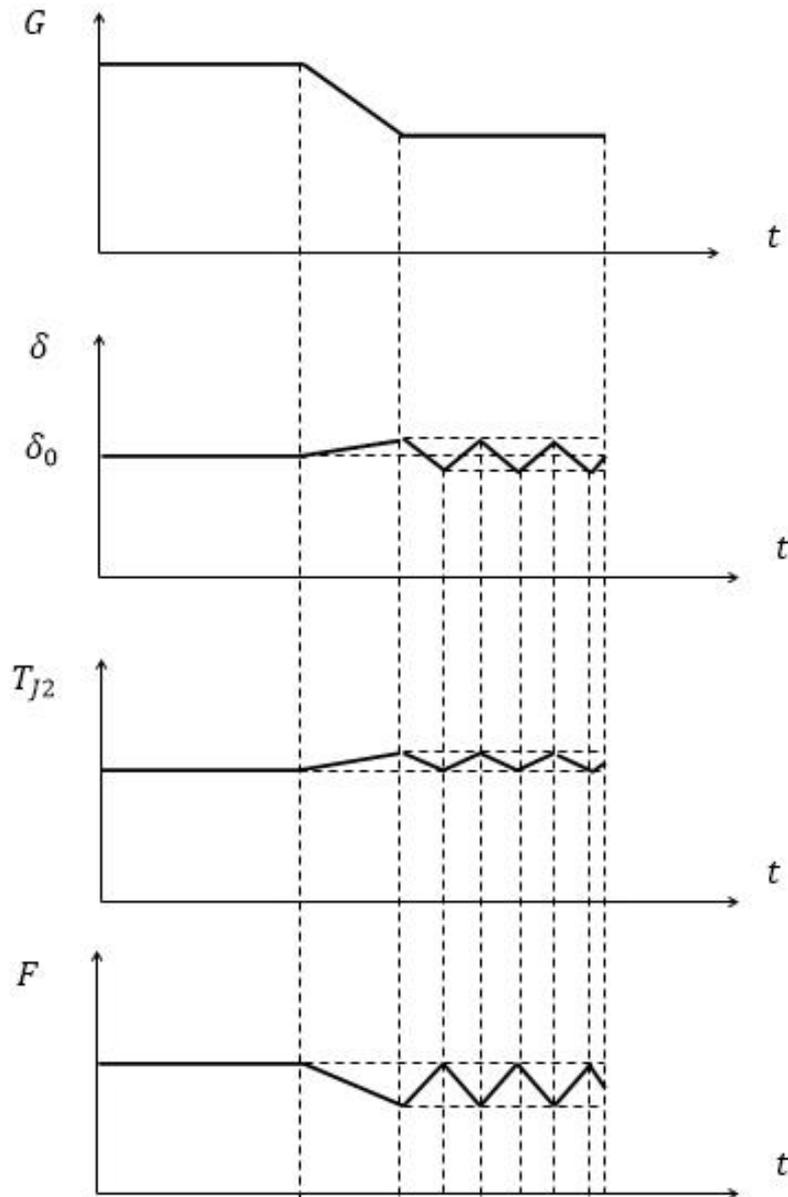


Рисунок 2. Качественные изменения G , δ , T_{J2} , F от времени t , где G – момент сопротивления генератора (электрический момент); δ – угол ротора; T_{J2} – переменная составляющая механической постоянной маховика; F – механический момент, развиваемый гидротурбиной

Принимая величину P_M постоянной, а величину P_0 функционально зависящей от x : $P_0 = P_0(x)$, получаем из уравнений (7)–(9) следующую систему (математическую модель), описывающую процесс регулирования величины $\omega(t)$:

$$\left. \begin{aligned} (T_{J1} + T_{J2}(\delta(t), \delta)) \frac{d^2\delta}{dt^2} &= \omega_0(P_0(x) - P_M \sin \delta), \\ m\ddot{x} + \alpha\dot{x} + \gamma x &= \beta m(x + r)\omega^2. \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Разработка компьютерной модели микроГЭС и ее исследование. Обыкновенные дифференциальные уравнения (ОДУ), применяемые для анализа динамической устойчивости микроГЭС (первое уравнение системы (10)), нелинейное. Второе уравнение описывает динамику регулятора. Обычно решение таких уравнений производят численными методами с помощью ЭВМ и таким же путем идут при анализе устойчивости

работы микроГЭС. Вывод об устойчивости синхронных машин делается на основании анализа изменения углов δ_i их роторов [8].

Система MatLAB (Simulink) с огромными математическими возможностями программной среды в сочетании с простотой моделирования, на наш взгляд, идеально подходит для численного исследования и моделирования нелинейных систем электроэнергетики.

В данной работе для анализа динамической устойчивости генератора микроГЭС, работающей на систему неограниченной мощности, использованы классические алгоритмы [11]. Структурные схемы модели микроГЭС (рис. 3–6) реализованы в программной среде Simulink.

Структурная схема модели микроГЭС, приведенная на рис. 3, составлена для этого случая. Запишем математическую модель микроГЭС для случая, когда маховик не заполнен водой. Тогда первое уравнение системы (10) можно выразить следующим образом:

$$(T_{J1}) \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \omega_0 (P_0(x_0) - P_M \sin \delta) \quad (11)$$

Запишем исходные данные модели (11) используемые для моделирования: $P_0(x_0) = 0.8$; $P_M = 0.9639204$; $T_{J1} = 10$ с; $\omega_0 = 314$ рад.

Для сравнительной оценки эффективности функционирования маховика с постоянными массой и моментом инерции и маховика с регулируемой массой и моментом инерции значения $P_0(x_0)$ и P_M подобраны таким образом, чтобы микроГЭС работала в критическом режиме, т.е. на границе потери устойчивости.

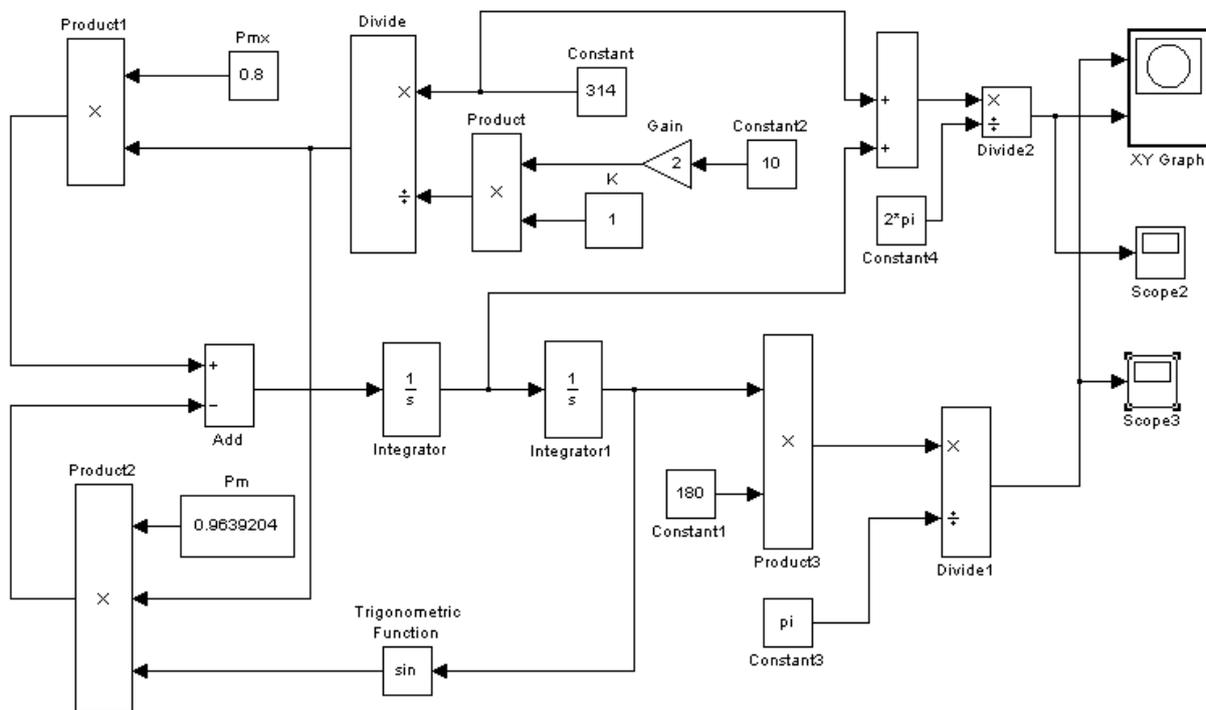
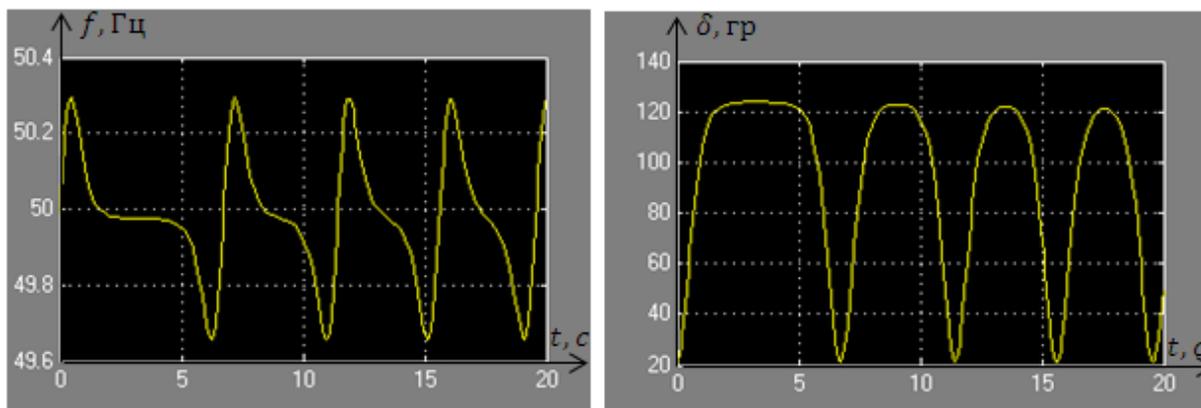


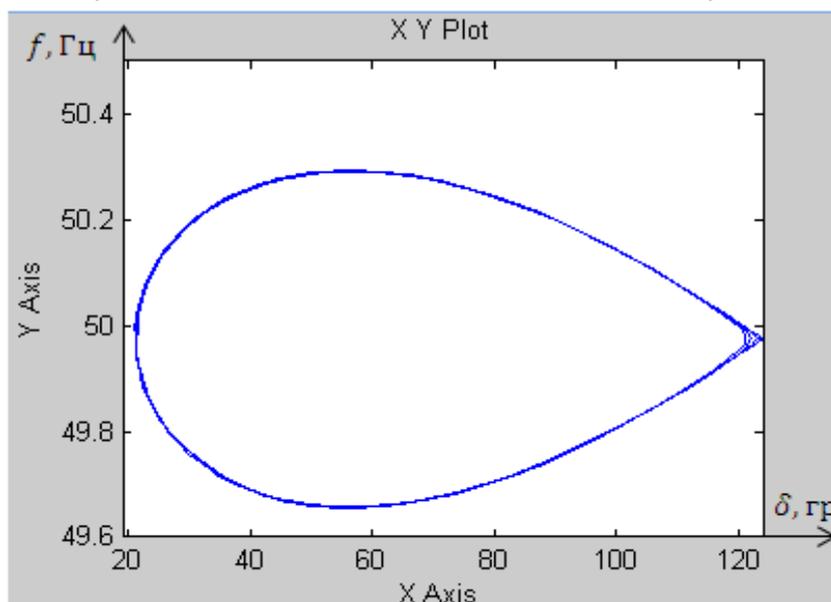
Рисунок 3. Структурная схема модели (11), описывающая работу микроГЭС при не заполненном водой маховике

На рис. 4 (а, б, в) приведены результаты моделирования микроГЭС (11) во временной области и в фазовом пространстве. Продолжительность моделирования составляет 20 секунд. Из рис. 4 (а, б) видно, что частота вращения генератора микроГЭС колеблется от 49,656 до 50,293 Гц, а угол ротора δ – от 21 до 117 градусов.



а)

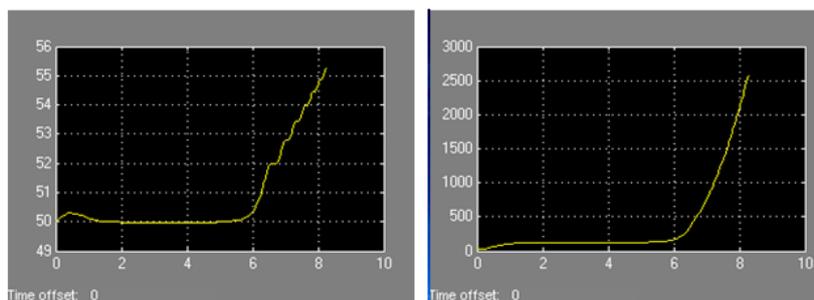
б)



в)

Рисунок 4. Поведение частоты вращения f и угла поворота ротора δ во временной области и в фазовом пространстве

Повторное моделирование работы микроГЭС с исходными данными модели (11): $P_0(x_0) = 0.8$; $P_M = 0.963920$; $T_{J_1} = 10$ с; $\omega_0 = 314$ рад, с отличающимся значением P_M на незначительную величину показало, что генератор теряет свою устойчивость. Поведение модели (11) для этого случая представлено на рис. 5 (а, б, в).



а)

б)

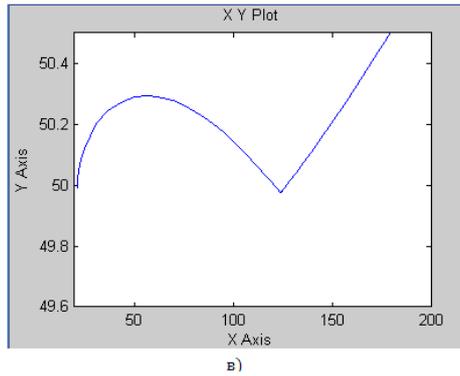


Рисунок 5. Поведение частоты вращения f и угла поворота ротора δ во временной области и в фазовом пространстве (неустойчивая работа генератора)

Структурная схема модели, описывающая работу микроГЭС, при функционировании регулятора и маховика (когда маховик заполнен водой) показана на рис. 6.

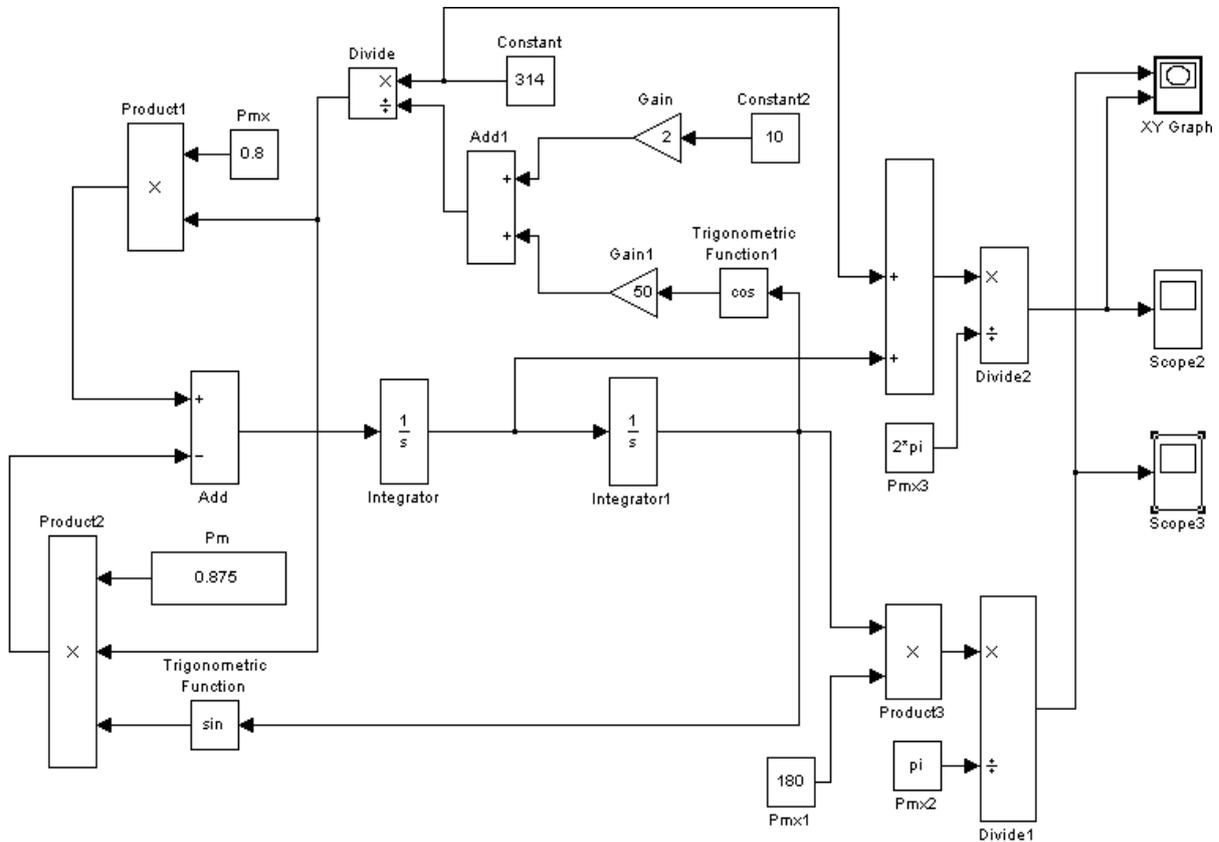


Рисунок 6. Структурная схема модели (11), описывающая работу микроГЭС, при функционировании регулятора и маховика

Запишем исходные данные модели (11) используемые для моделирования: $P_0(x_0) = 0.8$; $P_M = 0.875$; $T_{J_1} = 10$ с; $\omega_0 = 314$ рад.

Результаты моделирования предложенной структурной схемы микроГЭС показаны на рис. 7 (а, б, в), из которой видно, что диапазон колебания частоты сузился, а устойчивая работа генератора значительно возросла. Это говорит о том, что маховик с регулируемой массой и моментом инерции обеспечивает устойчивую работу даже тогда, когда генератор работает в критическом режиме.

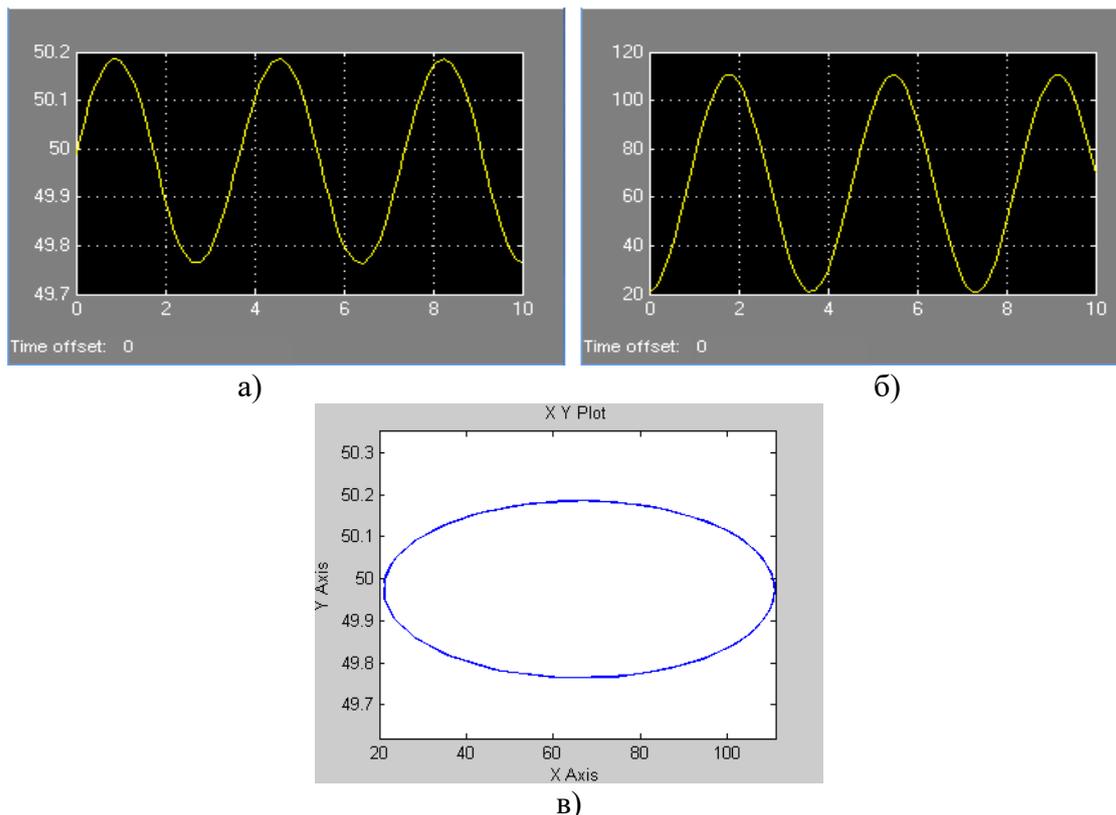


Рисунок 7. Поведение частоты вращения f и угла поворота ротора δ во временной области и в фазовом пространстве

Выбор и обоснование технических решений при разработке нового способа стабилизации частоты микроГЭС. Из анализа системы НДУ (10) ясно, что для нормального функционирования рассматриваемой системы важно поддержание требуемой частоты вращения вала ω , что, в свою очередь, достигается специальной конструкцией регулятора, а в качестве управляющего воздействия в данном случае используется жесткость пружины:

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega(t) \equiv \omega_0, \quad x(t) \equiv x_0. \quad (12)$$

Здесь ω_0 требуемая частота вращения вала; x_0 – некоторое число, для которого выполнены равенства

$$\left. \begin{aligned} P_0(x_0) &= P_M \sin \delta_0, \\ \gamma x_0 &= \beta m(x_0 + r)\omega_0^2. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Исходя из физических соображений, понятно, что первое уравнение системы (13) имеет некоторый корень x_0 , а второе уравнение системы (13) можно удовлетворить, например, при фиксированном x_0 , за счет выбора жесткости пружины. Чувствительность, а значит, и точность работы маховика зависят от быстроты реагирования клапана б, управляющего подачей воды, на движение грузиков 8. Очевидно, что равенства (13) необходимы и достаточны для того, чтобы соотношения (12) определяли решение системы (10). Как правило, получения этих соотношений добиваются за счет специальной конструкции регулятора [10].

Выводы

- При разработке математической модели микроГЭС нового типа предположено, что несколько автономных микроГЭС работают в распределительной электрической сети на генераторном напряжении.

- На основе проведенного качественного анализа изменения параметров микроГЭС нового типа и режимов ее работы скорректирована математическая модель «машина – регулятор», позволяющая определить параметры конструктивных элементов микроГЭС и водотока.
- Разработана компьютерная модель микроГЭС нового типа и проведено ее моделирование в программной среде MatLAB (Simulink). Результаты моделирования микроГЭС показали высокую эффективность функционирования маховика с регулируемой массой и моментом инерции, которая обеспечивает устойчивую работу микроГЭС нового типа.

Литература

1. Национальная стратегия устойчивого развития Кыргызской Республики на период 2013 – 2017гг., утв. Указом Президента КР от 21 января 2013 года №11.
2. Ниязова Г.Н., Яблочников А. М., Сатаркулов К. Принцип стабилизации частоты микроГЭС нового типа // Известия ВУЗов Кыргызстана.– Бишкек: – 2016. – №.6. – С. 30–33.
3. Шаршеналиев Ж.Ш., Сатаркулов К.А., Бакасова А.Б., Ниязова Г.Н. Саморегулирующийся адаптивный маховик для генераторов автономных микроГЭС // Патент Кыргызской Республики № 1743. 2015. 20140113.1 Бюл. №5 (71)(73).
4. Сатаркулов К.А., Бакасова А.Б., Ниязова Г.Н. Способ стабилизации частоты вращения ротора автономной микроГЭС // Патент Кыргызской Республики №1744. 2015. 20140114.1 Бюл. №5 (71)(73).
5. Сатаркулов К.А., Бакасова А.Б., Ниязова Н.Г. Способ стабилизации частоты автономной микроГЭС // Проблемы автоматики и управления – 2014. –№1(26) – С. 20–23.
6. Сатаркулов К.А., Ниязова Г.Н., Бакасова А.Б., и др. Саморегулирующийся адаптивный маховик для генераторов автономных микроГЭС // Заявка на изобретение. Кыргызпатент. № 534.
7. Лукутин Б.В., Обухов С.Г., Шандарова Е.Б. Автономное электроснабжение от микрогидроэлектростанций. – Томск, 2001. - 104 с.
8. Андерсон П.М., Фуад А.А. Управление энергосистемами и устойчивость, пер. с англ. под ред. Лугинского Я.Н. – М.: Энергия, 1980. – 568 с. ил.
9. Переходные процессы электрических систем в примерах и иллюстрациях; под редакцией Веникова В.А. Изд. 2-е, доп., – М.–Л.: Энергия, 1967. – 456 с. ил.
10. Леонов Г.А. Лекции по курсу теории управления. I (анализ) http://www.studmed.ru/leonov-ga-lekcii-po-kursu-teorii-upravleniya-i-analiz_8d9d707b83f.html. (дата обращения: 20.07.17)
11. Мак-Кракен Д., Дорн У. Численные методы и программирование на ФОРТРАНе; пер. с англ; под ред. Б.М. Наймарка. – М.: Мир, 1977. – 579 с., ил.

УДК: 517.93

С.Н. Верзунов, Н.М. Лыченко

Институт автоматики и информационных технологий

Национальной академии наук Кыргызской Республики, г.Бишкек

verzunov@hotmail.com, nlychenko@mail.ru

ПОЛИМОРФНАЯ ВЕЙВЛЕТ-СЕТЬ С ОБРАТНЫМИ СВЯЗЯМИ ДЛЯ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

Рассматривается структура и алгоритм обучения полиморфной вейвлет-сети с обратными связями. Полученные результаты применяются для решения задачи идентификации нестационарных временных рядов.

Ключевые слова: идентификация, нестационарный временной ряд, вейвлет-сеть.

Введение. В классическом смысле под идентификацией понимается выяснение структуры и параметров математической модели, дающей наилучшее соответствие выходных сигналов модели и временного ряда. При выбранной структуре модели задача идентификации представляет собой типичную экстремальную задачу и для ее решения с успехом используется мощный аппарат теории задач такого рода [1]. В последние три десятилетия активно развивались методы адаптивной идентификации с динамической подстройкой оценок неизвестных параметров линейных и нелинейных систем. Появились работы, в которых для идентификации нелинейных динамических систем используются рекуррентные нейронные сети [2]. С точки зрения теории систем, такие сети представляют собой нелинейные динамические системы с обратными связями. В этом случае задача идентификации становится неклассической, поскольку математическая модель объекта в явном виде не определяется и сводится к определению параметров нейронной сети с помощью адаптивного алгоритма, использующего пары наблюдаемых данных вход-выход.

Постановка задачи. Пусть имеется динамическая система, продуцирующая временной ряд, при этом исходные данные о параметрах и структуре модели системы отсутствуют. Требуется по наблюдаемым (измеряемым) входным и выходным переменным системы построить идентификационную модель системы при наличии разного рода ошибок измерений. В общем виде задача идентификации динамической системы поясняется на рис. 1. На систему влияет входное воздействие $u(t_i)$ и ненаблюдаемое возмущение $\varepsilon_s(t_i)$. Вход системы $u(t_i)$ и выход системы $y(t_i)$ измеряются в дискретные моменты времени при наличии некоторых случайных факторов, характеризующихся ошибками измерения, соответственно $\varepsilon_u(t_i)$ и $\varepsilon_y(t_i)$, при этом $M\{\varepsilon\}=0$, $D\{\varepsilon\}<\infty$.

Необходимо, используя выборки зашумленных измерений (наблюдений) реакции системы $d(t_i)=y(t_i)+\varepsilon_y(t_i)$ на входное воздействие $\hat{u}(t_i)=u(t_i)+\varepsilon_u(t_i)$, построить *Идентификатор системы* (идентификационную модель), который при любом входе, подаваемом на объект, продуцирует выход модели, аппроксимирующий временной ряд в

смысле малости ошибки идентификации $e(t_i)$.

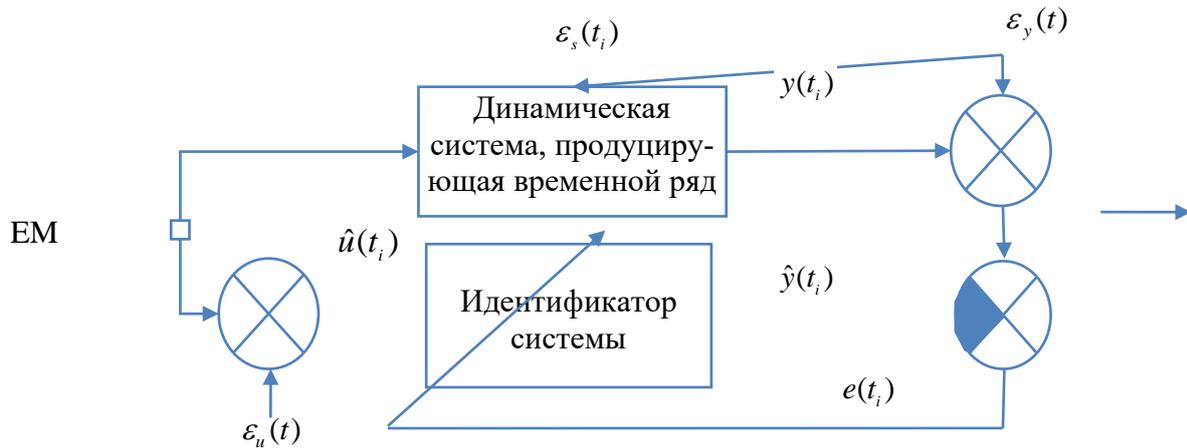


Рисунок 1. Структурная схема идентификации временного ряда

Полиморфная вейвлет-сеть с обратными связями. Для аппроксимации временного ряда предлагается использовать полиморфную вейвлет-сеть с обратными связями (рис. 2), выход которой определяется уравнением:

$$\hat{y}(t_i) = c + t_i \sum_{k=1}^K w_k h_{a_k, b_k, p_k}(t_i) + \sum_{j=1}^R r_j \hat{y}(t_i - j),$$

где c – постоянная составляющая (параметр смещения); K – количество вейвлетов; w_k – весовые коэффициенты прямых связей; R – количество обратных связей; r_j – весовые коэффициенты обратных связей.

Из рис. 2 видно, что предложенная сеть состоит из двух частей: полиморфной вейвлет-сети [3] и блока с обратными связями.

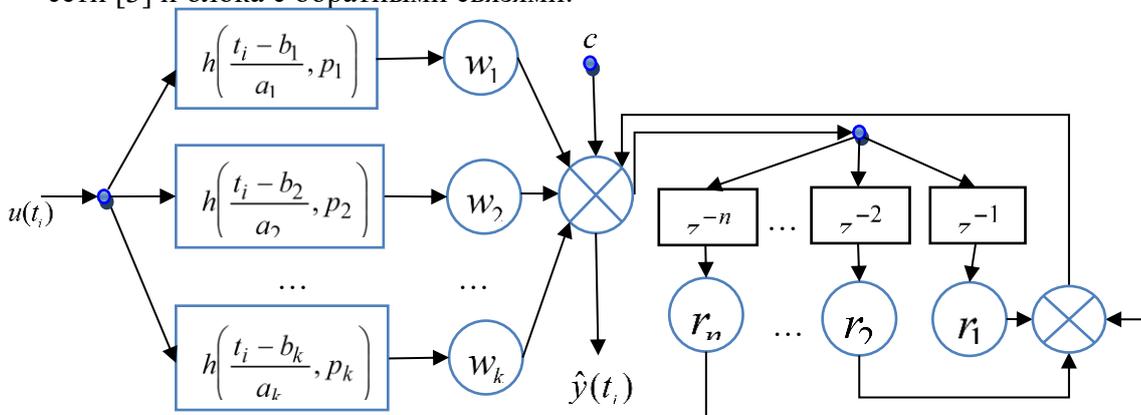


Рисунок 2. Полиморфная вейвлет-сеть с обратными связями

Таким образом, обозначая ошибку в момент t_i как: $e(t_i) = d(t_i) - \hat{y}(t_i)$, функцию энергии

ошибки можно записать:

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N e^2(t_i)$$

Параметры вейвлет-сети w_k , a_k , b_k , p_k , r_j и c могут быть настроены путем минимизации функции энергии ошибки E на всем множестве отсчетов времени t_j :

$$\sum_{i=1}^N \left(d(t_i) - \left[c + t_i \sum_{k=1}^K w_k h_{a_k, b_k, p_k}(t_i) + \sum_{j=1}^R r_j \hat{y}(t_{j-i}) \right] \right)^2 \rightarrow \min_{c, \bar{w}, \bar{a}, \bar{b}, \bar{p}, \bar{r}}$$

Для минимизации E можно использовать различные численные методы оптимизации, требующие градиенты $\frac{\partial E}{\partial w_k}, \frac{\partial E}{\partial a_k}, \frac{\partial E}{\partial b_k}, \frac{\partial E}{\partial p_k}, \frac{\partial E}{\partial r_i}$ и $\frac{\partial E}{\partial c}$ для последовательного изменения каждого конкретного параметра w_k, a_k, b_k, p_k, r_i и c :

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial w_k} &= -\sum_{i=1}^N e(t_i) h(\tau_i, p_k) \hat{u}(t_i), & \frac{\partial E}{\partial b_k} &= -\sum_{i=1}^N e(t_i) \hat{u}(t_i) w_k \frac{\partial h(\tau_i, p_k)}{\partial b_k}, \\ \frac{\partial E}{\partial a_k} &= -\sum_{i=1}^N e(t_i) \hat{u}(t_i) w_k \tau \frac{\partial h(\tau_i, p_k)}{\partial b_k} = \tau_i \frac{\partial E}{\partial b_k}, & \frac{\partial E}{\partial p_k} &= -\sum_{i=1}^N e(t_i) \hat{u}(t_i) w_k \frac{\partial h(\tau_i, p_k)}{\partial p_k}, \\ \frac{\partial E}{\partial r_i} &= -\sum_{j=1}^R e(t_i) \hat{y}(t_j - j), & \frac{\partial E}{\partial c} &= -\sum_{i=1}^N e(t_i). \end{aligned}$$

В этих выражениях $h(\tau_i)$ и ее производные определяются конкретным типом вейвлета. Например, для вейвлета RASP, используемого в описанном ниже вычислительном эксперименте, они определяются как:

$$h(\tau_i) = \frac{p_k \tau_i}{(\tau_i^2 + 1)^2}, \quad \frac{\partial h(\tau_i, p_k)}{\partial p_k} = \frac{\tau_i}{(\tau_i^2 + 1)^2}, \quad \frac{\partial h(\tau_i, p_k)}{\partial b_k} = \frac{p_k (3\tau_i^2 - 1)}{a_k (\tau_i^2 + 1)^3}, \quad \text{где } \tau_i = \frac{t_i - b_k}{a_k}.$$

Аппроксимация временных рядов полиморфными вейвлет-сетями с обратными связями, содержащими базовые вейвлеты различных типов. Рассмотрена задача аппроксимации (см. рис. 2), в которой $u(t_i) = t_i$, временной ряд $y(t_i)$ моделируются численным решением обыкновенного дифференциального уравнения на интервале $[t_0, N\Delta t]$ с шагом Δt . Требуется аппроксимировать $d(t_i)$.

В качестве аппроксиматора предлагается использовать полиморфную вейвлет-сеть с обратными связями (см. рис. 2). Был проведен вычислительный эксперимент, в котором рассматривались два временных ряда, моделируемых дифференциальными уравнениями:

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 5 \frac{dy}{dt} + (6 + 3 \sin(0.5t)) y = \varepsilon_s(t), \quad \frac{d^2 y}{dt^2} + (2 + \sin(0.5t)) \frac{dy}{dt} + 5y = \varepsilon_s(t)$$

для 30 различных реализаций ошибок измерений ε . При этом $\varepsilon_s(t_i) = 0.1 \sin(7t) + \cos(9t)$, $\varepsilon(t) = \xi |y(t)|$, где ξ – некоторая нормально распределенная случайная величина $M\{\xi\} = 0$, $D\{\xi\} = 0.5$.

Для сравнения в качестве аппроксиматора была также применена полиморфная вейвлет-сеть без обратных связей. Кроме того, в качестве базовых использовались вейвлеты различных типов: Морле, POLYWOG и RASP [3]. Результаты статистически обработаны и приведены на рисунке 3.

Как видно из рис.3, сравнение возможностей полиморфной вейвлет-сети с обратными связями и без них в плане использования их в качестве аппроксиматоров нестационарных временных рядов с инерционностью показало, что полиморфная вейвлет-сеть с обратными связями дает меньшую энергию ошибки E в сравнении с полиморфной вейвлет-сетью без обратных связей и, кроме того, имеет преимущества в скорости сходимости (характеризующейся скоростью сходимости \hat{n} и временем, затрачиваемым на обучение T) [4].

Идентификация нелинейной динамической системы полиморфной вейвлет-сетью с обратными связями.

Для решения задачи идентификации параметры вейвлет-сети нужно настроить так, чтобы минимизировать меру рассогласования между значениями выходных переменных динамической системы, генерирующей временной ряд, и сети. Структура сети должна быть идентичной структуре идентифицируемого динамического объекта, то есть она должна включать обратные связи и временные задержки. Итак, рассмотрим структуру полиморфной вейвлет-сети с обратными связями, на вход которой подается зашумленное измерение (наблюдение) входного воздействия $\hat{u}(t_i)$, поступающего на динамическую систему.

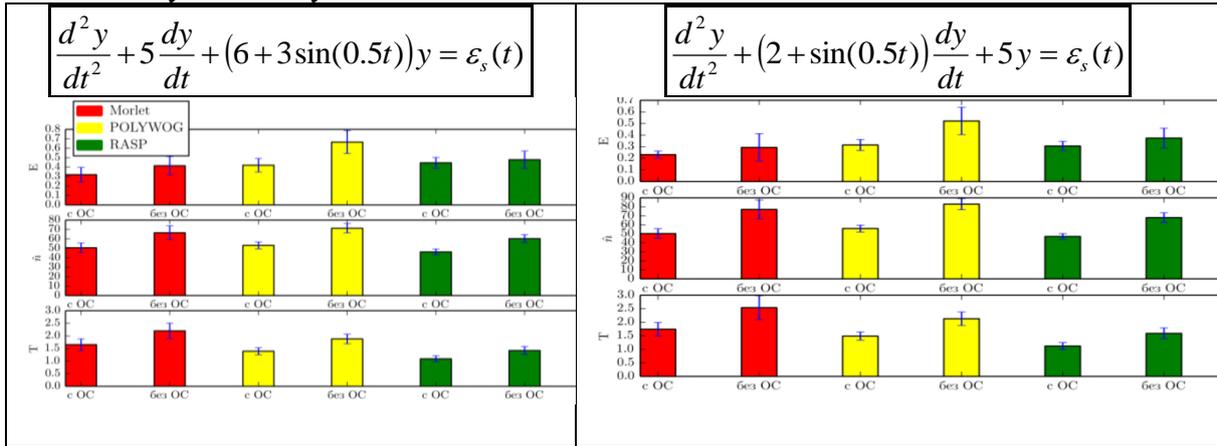


Рисунок 3. Результаты численных исследований аппроксимации нестационарной динамической системы полиморфными вейвлет-сетями с обратными связями и без обратных связей с различными базовыми вейвлетами

Рассмотрим для примера нелинейную дискретную динамическую систему 2-го порядка:

$$y_j(n) = \frac{1.1y(n-1)}{1 + y(n-2)} + u_j(n) + \varepsilon_s(n) \quad (1)$$

где $j = 1, 2, 3, 4$; $n = 0, 1, \dots, 99$. Случайные ошибки измерения имеют нормальное распределение, при этом стандартные отклонения для ошибок измерения $\varepsilon_u(t_i)$ и $\varepsilon_y(t_i)$ равны соответственно 0.01 и 0.05 . Стандартное отклонение неизменяемого возмущения $\varepsilon_s(t_i) = 0.01$. Обучающую выборку образуют пары (u_1, y_1) и (u_2, y_2) , при этом

$$u_1(n) = 1(n), \quad u_2(n) = 0.5 \cos(3\gamma_2) e^{-0.5\gamma_2^2} + 1, \quad (\gamma_2 = \frac{n-20}{3}). \quad u_3(n) = 0.7 \cos(2.5\gamma_3) e^{-0.5\gamma_3^2} + 1,$$

$$\text{при } \gamma_3 = \frac{n-30}{3.5}, \quad u_4(n) = 0.5 \delta(n-25) + 1, \text{ а тестовую } - (u_3, y_3) \text{ и } (u_4, y_4).$$

На рис. 4 показана динамика изменения энергии ошибки E для сети, содержащей 40 RASP вейвлетов, при обучении ее по алгоритму Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно на выборке $\{(u_1, y_1), (u_2, y_2)\}$ в течение 5000 эпох.

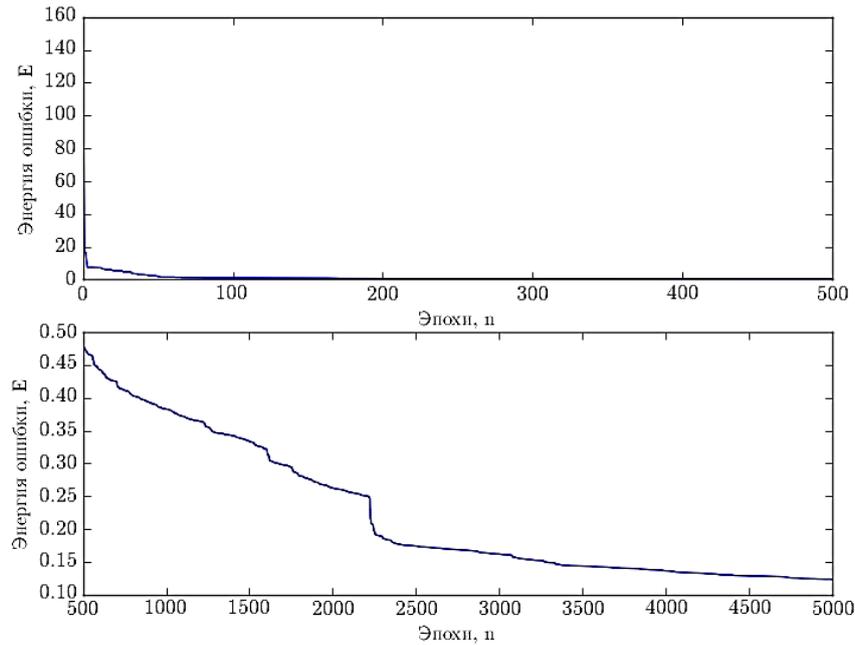


Рисунок 4. Динамика изменения энергии ошибки E в процессе обучения сети

Можно видеть, что в основном обучение сети заканчивается менее чем за 100 эпох, затем, как видно из рис. 5, на протяжении примерно 2200 эпох значения весов сети \bar{a} , \bar{b} , \bar{p} , \bar{w} , c , \bar{r} изменяются довольно плавно. Однако, около 2300 эпох происходят скачкообразные изменения значений параметров сети, которые приводят к значительному уменьшению энергии ошибки. Далее сеть медленно обучается на протяжении более 2500 эпох, после чего параметры сети вновь принимают устойчивые значения.

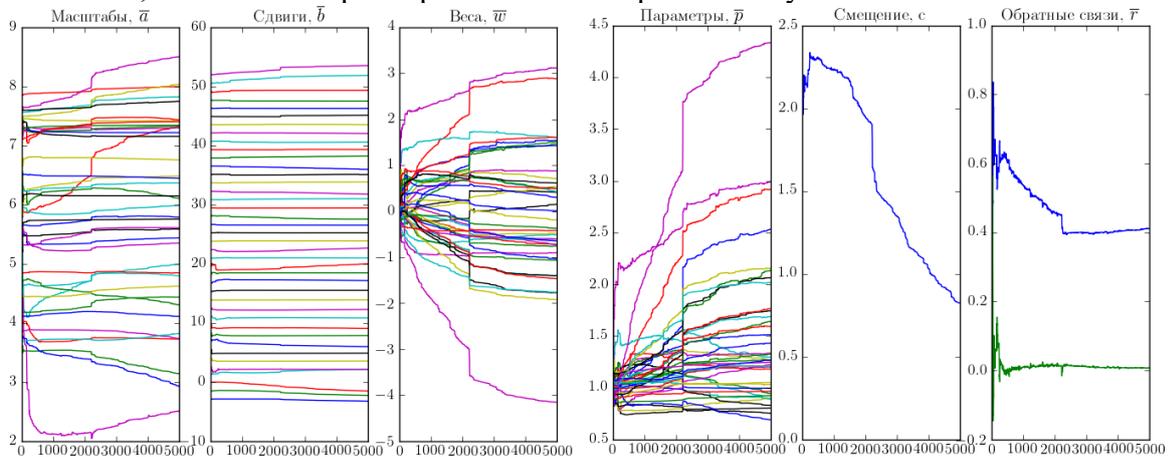


Рисунок 5. Динамика параметров сети в процессе обучения

На рис. 6 показаны выходы системы (1) и идентифицирующей ее вейвлет-сети при входном воздействии $u_1(n) = 1(n)$, воздействии $u_2(n) = 0.5\cos(3\gamma_2)e^{-0.5\gamma_2^2} + 1$, где

$$\gamma_2 = \frac{n-20}{3},$$

использованных при обучении сети. На рис. 7 показаны выходы системы (1) и вейвлет-сети при входных воздействиях, отличных от использованных при обучении: $u_3(n) = 0.7\cos(2.5\gamma_3)e^{-0.5\gamma_3^2} + 1$, где $\gamma_3 = \frac{n-30}{3.5}$ и $u_4(n) = 0.5\delta(n-25) + 1$, где

$$\delta(n-25) = \begin{cases} 1, & \text{при } n = 25, \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases}$$

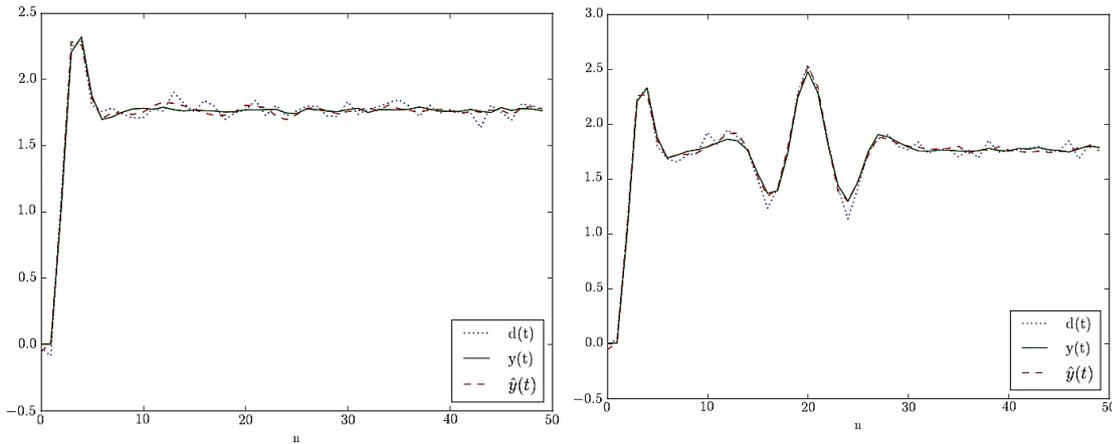


Рисунок 6. Результат идентификации системы полиморфной вейвлет-сетью при входном воздействии u_1 и u_2 из обучающей выборки

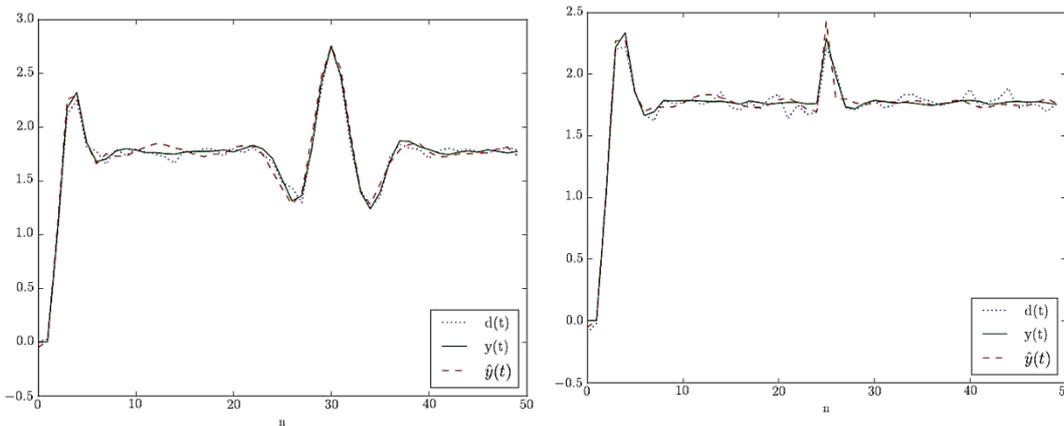


Рисунок 7. Результат идентификации системы полиморфной вейвлет-сетью при входном воздействии u_3 и u_4 из тестовой выборки

Из рис. 6–7 видно, что полиморфная вейвлет-сеть с обратными связями достаточно хорошо идентифицирует нелинейные динамические системы при различных входных воздействиях. На основании модели динамической системы в виде обученной полиморфной вейвлет-сети с обратными связями можно осуществлять прогноз детерминированной составляющей временного ряда, генерируемого этой системой при различных входных воздействиях. Следует отметить, что обучать сеть следует на двух и более парах вход/выход, в противном случае результат идентификации неудовлетворительный [5].

Аппроксимация нестационарных временных рядов полиморфными вейвлет-сетями с обратными связями, обученными различными численными методами. Для того, чтобы сравнить различные численные методы оптимизации, используемые при обучении полиморфных вейвлет-сетей, рассмотрим пример аппроксимации полиморфной вейвлет-сетью временного ряда, детерминированная составляющая которого $y(t_i)$ моделируется численным решением обыкновенного дифференциального уравнения на интервале $[t_0, N\Delta t]$ с шагом Δt :

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 5 \frac{dy}{dt} + (6 + 20 \sin(3t))y = u(t) + \varepsilon_s(t) \quad (2)$$

где $\varepsilon_s(t_i) = 0.1\sin(7t) + \cos(9t)$, $u(t) = 1 + 0.2\sin(2t)$. □ На рис. 8 показана аппроксимация системы (2) полиморфной вейвлет-сетью с 10-ю вейвлетами Морле с суммарной квадратической ошибкой $E=0.025$. Как видно из рисунка, эта система достаточно нестационарна. Обучение полиморфной вейвлет-сети с 10-ю вейвлетами Морле по алгоритму наискорейшего спуска до суммарной квадратической ошибки $E=0.025$ занимает 1440 эпох (рис. 9). На рис. 10 показана динамика изменения параметров сети в процессе обучения. При тех же условиях обучение сети по алгоритму сопряженных градиентов занимает 598 эпох (рис. 11). Обращает на себя внимание больший диапазон изменения дополнительных параметров p по сравнению с предыдущим алгоритмом (рис. 13).

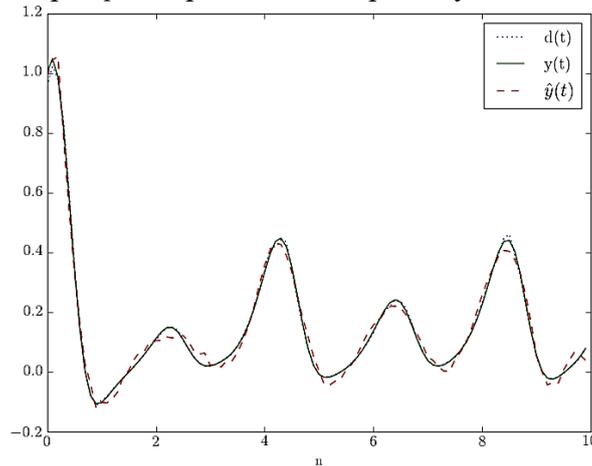


Рисунок 8. Аппроксимация нестационарной системы полиморфной вейвлет-сетью с 10-ю вейвлетами Морле по алгоритму наискорейшего спуска

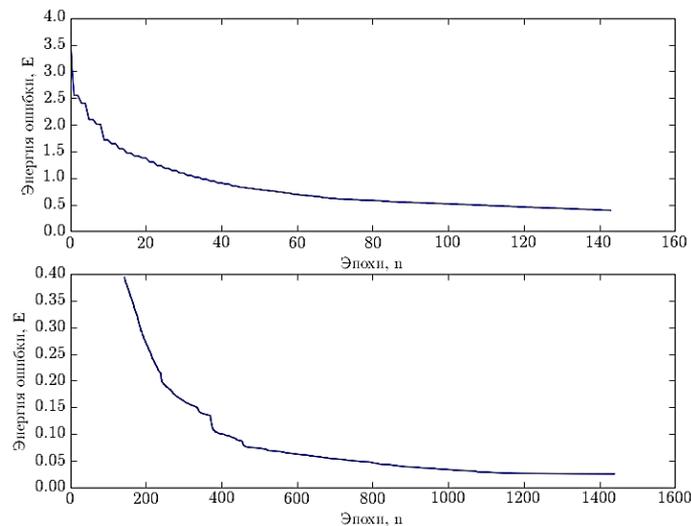


Рисунок 9. Динамика изменения энергии ошибки E в процессе обучения сети по алгоритму наискорейшего спуска

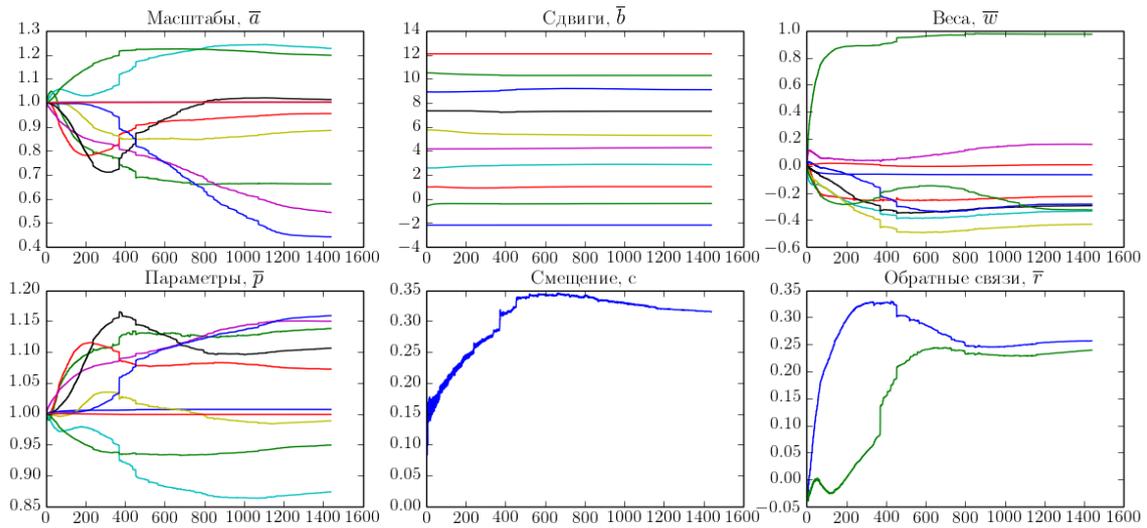


Рисунок 10. Динамика изменения параметров сети в процессе обучения по алгоритму наискорейшего спуска

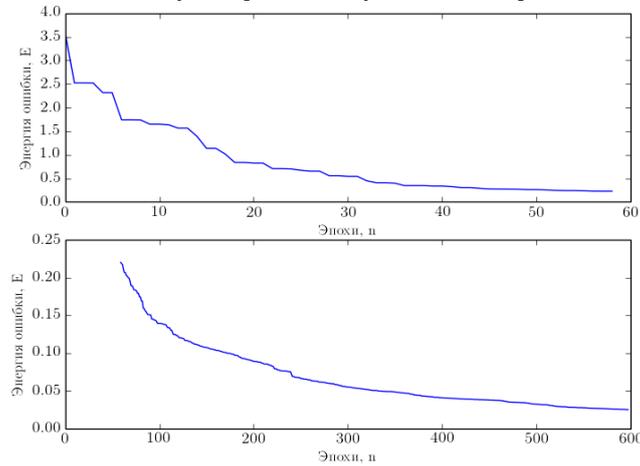


Рисунок 11. Динамика изменения энергии ошибки E в процессе обучения сети по алгоритму сопряженных градиентов

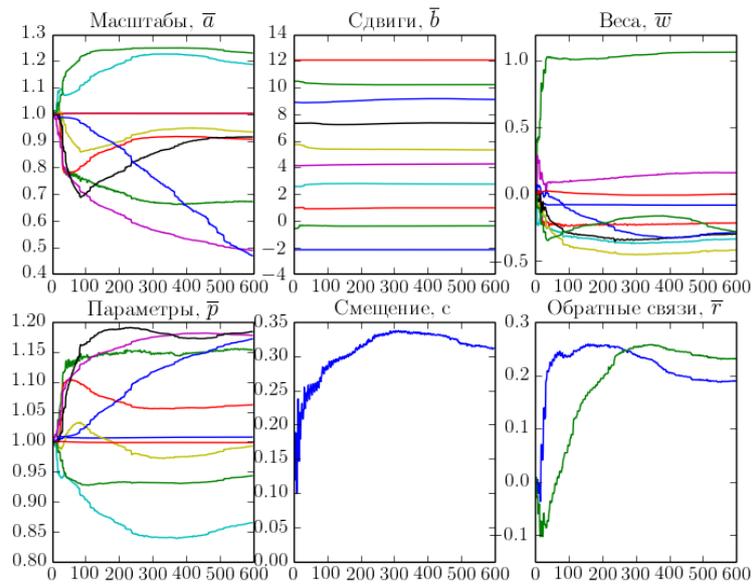


Рисунок 12. Динамика изменения параметров сети в процессе обучения

по алгоритму сопряженных градиентов

Обучение сети по алгоритму Бroyдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно занимает 293 эпохи (рис. 12).

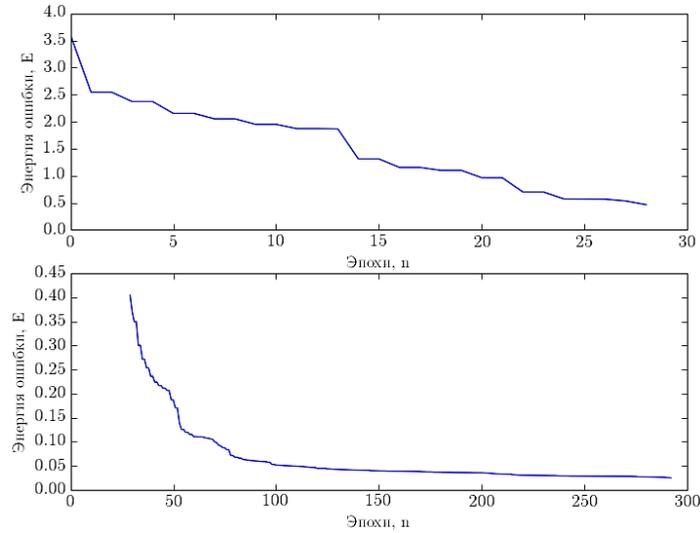


Рисунок 13. Динамика изменения энергии ошибки E в процессе обучения сети по алгоритму Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно

При использовании этого алгоритма обучения веса сети изменяются в более широких диапазонах, причем сильнее всего изменяются именно масштабы вейвлетов a и дополнительные параметры p (рис. 14).

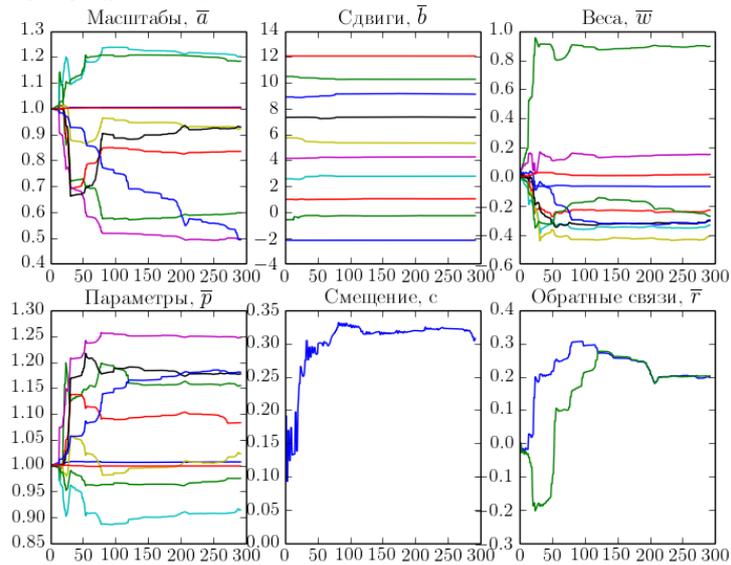


Рисунок 14. Динамика изменения параметров сети в процессе обучения по алгоритму Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно

Таким образом, на основании приведенных выше примеров можно говорить, что наиболее эффективным алгоритмом обучения полиморфной вейвлет-сети является метод Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно. Причем значительная роль в обучении вейвлет-сети принадлежит правильной настройке масштабов вейвлетов a и дополнительных настраиваемых параметров p . Метод Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно — один из наиболее часто используемых квазиньютоновских методов, при котором не вычисляется непосредственно гессиан оптимизируемой функции. Вместо этого гессиан

оценивается приближенно, что позволяет достичь высокой скорости работы алгоритма [6].

Выводы. В настоящей работе для идентификации нестационарных временных рядов предложена новая структура полиморфной вейвлет-сети с обратными связями. Рассмотрены алгоритмы для адаптивной настройки параметров сети и примеры аппроксимации нестационарных временных рядов, детерминированные составляющие которых моделируются численными решениями обыкновенных дифференциальных уравнений на некотором интервале времени. Показаны преимущества использования полиморфных вейвлет-сетей с обратными связями в сравнении с сетями без обратных связей.

Проведено исследование сетей с базовыми вейвлетами различных типов: Морле, POLYWOG и RASP. Рассмотрена задача идентификации нелинейных динамических систем, в которой в качестве идентификатора предложено использовать полиморфную вейвлет-сеть с обратными связями. Результаты моделирования показали, что разработанная вейвлет-сеть с обратными связями достаточно хорошо идентифицирует нелинейную динамическую систему при различных входных воздействиях. Полученные результаты могут быть использованы при создании вейвлет-сетевых систем управления нелинейными процессами.

Проведено сравнение различных численных алгоритмов оптимизации параметров полиморфной вейвлет-сети. Показано, что наилучшим алгоритмом обучения полиморфной вейвлет-сети является метод Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно.

Литература

1. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя. – М.: Наука, 1991. – 432 с.
2. Narendra, K. Parthasarathy K. Identification and Control of Dynamical Systems Using Neural Networks // IEEE Transaction on Neural Networks. – 1990. – Vol. 1. – P. 4–27.
3. Верзунов С. Н. Синтез полиморфной вейвлет-сети и исследование ее свойств для аппроксимации нестационарных временных рядов // Информатика и системы управления. – Благовещенск. № 2 (2015) – С. 60–69.
4. Верзунов С.Н., Лыченко Н.М. Аппроксимация временных рядов полиморфной вейвлет-сетью с обратными связями // Математические структуры и моделирование. 2016. № 2 (38). С. 16–26.
5. Верзунов С.Н., Лыченко Н.М. Идентификация нелинейных динамических систем полиморфной вейвлет-сетью с обратными связями // Вестник Кыргызско-Российского Славянского университета. 2015. Т. – 15. № 9. – С. 18–22.
 6. Верзунов С.Н., Лыченко Н.М. Аппроксимация нестационарных динамических систем полиморфной вейвлет-сетью // Фундаментальные и прикладные проблемы науки. Том 3. Материалы Кыргызской секции X международного симпозиума 8–10 сентября 2015 года. – М.: РАН, 2015 – С. 3–11.

С.Н. Верзунов

Институт автоматизации и информационных технологий Национальной академии наук Кыргызской Республики, г.Бишкек

verzunov@hotmail.com

ОБЗОР МЕТОДОВ РАЗРАБОТКИ ПРИЛОЖЕНИЙ ДЛЯ ГЕТЕРОГЕННЫХ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

В работе даны краткие теоретические сведения и приведен обзор актуальных методов и технологий создания программ для гетерогенных параллельных вычислительных систем.

Ключевые слова: параллельное программирование, гетерогенная вычислительная система, графический процессор, уровни параллельности, гранулярность, синхронизация потоков.

Введение. В настоящее время вычислительные системы становятся все более сложными и гетерогенными в основном за счет использования не только традиционных центральных процессоров, но и многоядерных микропроцессоров, цифровых процессоров обработки сигналов [1], программируемых логических интегральных схем и, наконец, графических процессоров (Graphical Processor Unit, GPU). За счет такого разнообразия параллельных вычислительных устройств значительно усложняется процесс разработки эффективного программного обеспечения. Разрабатываемые приложения, как правило, создают неоднородную нагрузку на вычислительные системы, начиная от простых задач обработки данных, таких как, например, поиск, сортировка и синтаксический анализ, и заканчивая процедурами, требующими длительных математических вычислений – обработка изображений, моделирование и интеллектуальный анализ данных. В последнем случае эффективная работа приложений в большой степени зависит от вычислительной эффективности используемого оборудования. В качестве примеров таких задач можно привести:

- задачи молекулярной динамики,
- модели погоды и океанических течений,
- моделирование дрейфа тектонических платформ,
- моделирование роста клеток,
- моделирование распространения звука и световых волн [2].

Как правило, многие из этих задач могут решаться параллельно. Учитывая тепловые пределы современной технологии изготовления процессоров на основе комплементарных металлооксидных полупроводников, дальнейшее увеличение их производительности путем увеличения тактовой частоты представляется невозможным и оказывается более целесообразным разместить несколько процессоров, иногда специализированных, на одном чипе. В связи с этим за последние 10 лет значительно увеличилось разнообразие и возможности параллельных вычислительных устройств. Возросла роль графических процессоров, которые теперь обеспечивают высокую скорость обработки данных при очень низких затратах. Современные GPU обладают значительно большей вычислительной мощностью, чем любые другие программируемые устройства общего назначения. Разница в пиковой производительности по сравнению с мощными центральными процессорами персональных компьютеров достигает 20–50 раз, при том,

что потребляемая мощность больше всего в 2 раза, а цена сопоставима. При этом их можно использовать для решения широкого круга задач, включая задачи цифровой обработки сигналов [3]. Уже имеются реализации самых различных алгоритмов для гетерогенных многопроцессорных вычислительных систем, содержащих GPU, включая БПФ, сортировку, алгоритмы линейной алгебры, всевозможные алгоритмы обработки изображений и видео, алгоритмы компьютерного зрения и многие другие [4]. На рис. 1 показано, как часто встречающиеся задачи, такие как сортировка и скалярное произведение векторов, могут быть решены с использованием множества процессоров [2].

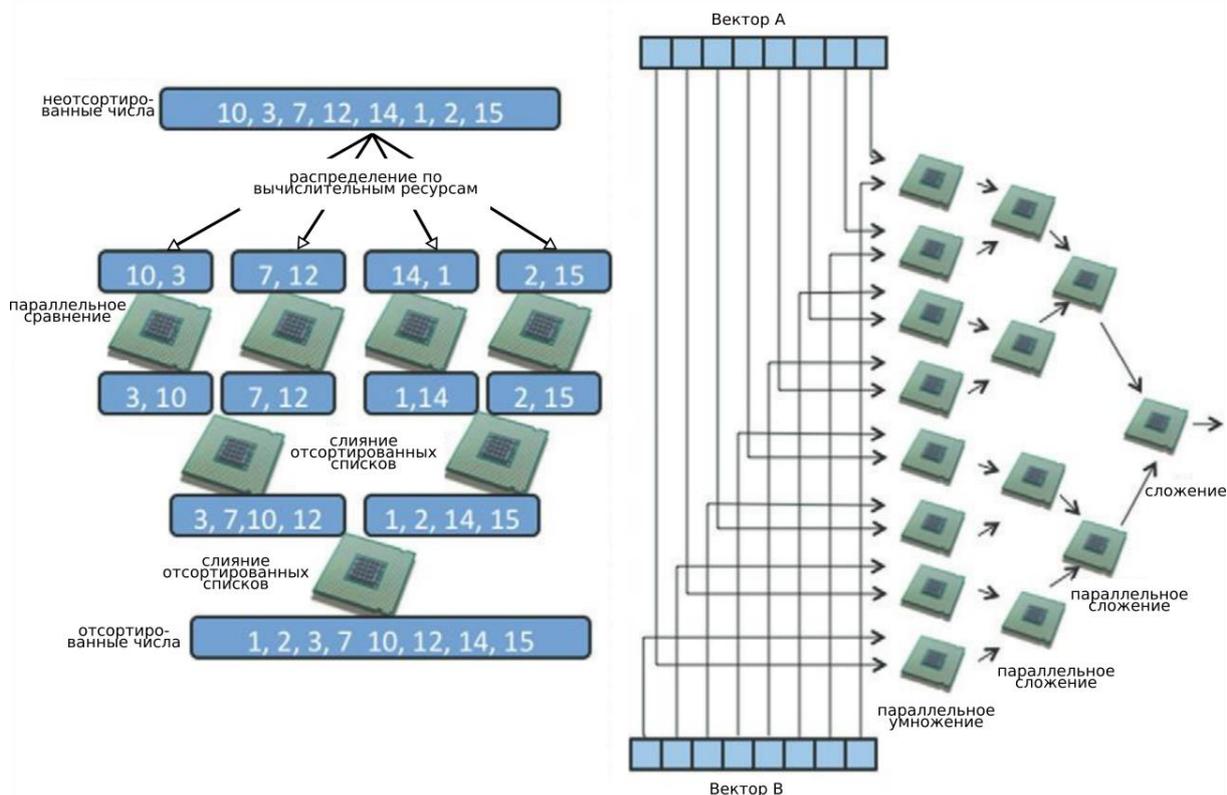


Рисунок 1. Параллельная сортировка и скалярное произведение векторов

В настоящее время существует несколько программных платформ для реализации параллельных вычислений, например CUDA для видеокарт фирмы NVIDIA [5], ATI Stream Technology для видеокарт от AMD [6]. Особое место занимает OpenCL (Open Computing Language, открытый язык вычислений) – программная платформа, сопровождаемая некоммерческим технологическим консорциумом Khronos Group [7]. Эта платформа применяется для разработки приложений, выполняющихся на широком спектре устройств различных производителей, поддерживает множество уровней параллелизма и может эффективно работать на гомогенных или гетерогенных, однопроцессорных и многопроцессорных вычислительных системах, содержащих, кроме традиционных, графические процессоры и другие типы устройств. В настоящее время она поддерживает все основные архитектуры процессоров, включая x86, ARM и PowerPC, также она была адаптирована к драйверам графических плат AMD и NVIDIA. Поддержка среди производителей процессоров, видеокарт и ПЛИС быстро растет, что делает OpenCL перспективной платформой для разработчиков программного обеспечения, при этом можно быть уверенным в том, что она будет использоваться в течение многих лет, а сфера применения будет постоянно расширяться [3].

Таким образом, современные вычислительные системы характеризуются наличием разнообразных по своим возможностям и аппаратной реализации параллельных

вычислительных ресурсов, что значительно затрудняет разработку для них эффективного программного обеспечения. В настоящей работе дан обзор актуальных методов и технологий создания программ для такого рода гетерогенных параллельных вычислительных систем.

Методы создания программ для параллельных вычислительных систем. С увеличением потребности в высокопроизводительных вычислениях и появлением соответствующего аппаратного обеспечения получили развитие различные методы ускорения вычислений за счет использования нескольких процессоров. Первый метод, использующий параллелизм на уровне задач, включает подходы, итеративно разбивающие проблему на подзадачи до тех пор, пока они не будут хорошо соответствовать имеющимся вычислительным ресурсам. Другой часто используемый метод, основанный на параллелизме уровня данных, подразумевает, что исходные данные разбиваются на подмножества, каждое из которых обрабатывается на отдельном процессоре, затем обработанные данные объединяются и формируют результат. При разбиении, как в первом, так и во втором случае учитывается размер подмножеств, так как необходимо, чтобы он соответствовал имеющимся аппаратным вычислительным ресурсам.

Параллельные вычисления [8] являются «одной из форм расчетов, в которых многие вычисления проводятся одновременно, исходя из принципа, что большие проблемы часто можно разделить на более мелкие, которые затем решаются одновременно», т. е. параллельно. «Степень параллелизма, которая может быть достигнута, зависит не только от характера рассматриваемой проблемы, но и умения разработчика программного обеспечения найти правильный подход к рассматриваемой задаче.» Джин Амдал [9] сформулировал ограничение на рост производительности при распараллеливании вычислений: «В случае, когда задача разделяется на несколько частей, суммарное время ее выполнения на параллельной системе не может быть меньше времени выполнения самого длинного фрагмента». Согласно закону Амдала, ускорение выполнения программы за счет распараллеливания части ее инструкций на наборе вычислительных элементов ограничено временем, необходимым для выполнения ее последовательных инструкций.

Пусть необходимо решить некоторую вычислительную задачу. Доля α от общего объема необходимых вычислений может быть получена только с помощью последовательных расчетов и тогда доля $1 - \alpha$ может быть распараллелена так, чтобы время ее вычисления было обратно пропорционально числу задействованных вычислительных элементов p . В этом случае ускорение, которое может быть получено на вычислительной системе из p элементов, по сравнению с решением с помощью одного элемента, не будет превышать величины:

$$S_p = \frac{1}{\alpha + \frac{1-\alpha}{p}}$$

В таб. 1 показано, во сколько раз быстрее выполнится программа с долей последовательных вычислений α при использовании p процессоров.

Таблица 1. Иллюстрация закона Амдала

$\alpha \backslash p$	10	100	1000
0	10	100	1000
10%	5.263	9.174	9.910
25%	3.077	3.883	3.988
40%	2.174	2.463	2.496

Из таблицы видно, что только при полном отсутствии последовательных вычислений (т.е. при $\alpha = 0$) можно получить линейный прирост производительности с ростом количества вычислителей в системе. Закон Амдала показывает, что прирост эффективности вычислений зависит от задачи и ограничен сверху для любой задачи с $\alpha \neq 0$.

Таким образом, не для всякой задачи имеет смысл наращивание числа процессоров в вычислительной системе. Более того, если учесть время, необходимое для передачи данных между узлами вычислительной системы, то зависимость времени вычислений от числа узлов будет минимальна. Это накладывает ограничение на масштабируемость вычислительной системы, то есть означает, что с определенного момента добавление новых вычислительных элементов в систему будет увеличивать время расчёта задачи. Однако в работе [10] Джона Густафсона на вычислительной системе из 1024 процессоров приведено параллельное решение трех больших задач, для которых доля последовательного кода α лежала в пределах от 0,5 до 0,8% и получены значения ускорения по сравнению с последовательным вариантом от 1016 до 1021 раз. Согласно закону Амдала, для данного числа процессоров и значений α ускорение не должно было превысить 200 раз. Густафсон пришел к выводу, что причина этого заключается в исходной предпосылке, лежащей в основе закона Амдала: увеличение числа процессоров не сопровождается увеличением объема решаемой задачи. Реальное же положение вещей существенно отличается от такой гипотезы.

Обычно, получая в свое распоряжение более мощную систему, пользователь не стремится сократить время вычислений, а сохраняя его практически неизменным, старается пропорционально мощности вычислительной системы увеличить объем вычислений, например, чтобы получить решение более сложных, имеющих практическое применение приложений решаемой задачи. И если оказывается, что наращивание общего объема касается главным образом распараллеливаемой части программы, то это ведет к сокращению величины α . Примером может служить искусственная нейронная сеть. Если, например, доля последовательно выполняемого кода составляет 10% для 100 нейронов, то для 10 000 нейронов доля последовательно выполняемого кода снизится до 0,1%. Таким образом, повышение ускорения обусловлено тем, что, оставаясь практически неизменной, последовательная часть в общем объеме увеличенной программы имеет уже меньший удельный вес. Чтобы оценить степень ускорения вычислений, когда объем последних увеличивается с ростом количества процессоров в системе (при постоянстве общего времени вычислений), Густафсон рекомендует использовать выражение, предложенное Е. Барсисом [11]:

$$S_p = \alpha + (1 - \alpha)p .$$

Данное выражение известно как закон масштабируемого ускорения или закона Густафсона–Барсиса, из которого следует, что ускорение является линейной функцией числа процессоров, если рабочая нагрузка увеличивается так, чтобы поддерживать неизменным время.

Чтобы продемонстрировать, какие задачи можно решать с помощью параллельных вычислительных систем, можно рассмотреть несколько примеров. Пусть, например, выполняется умножение элементов двух векторов A и B , каждый из которых содержит N элементов, в результате получается вектор C (рис. 2) [2].

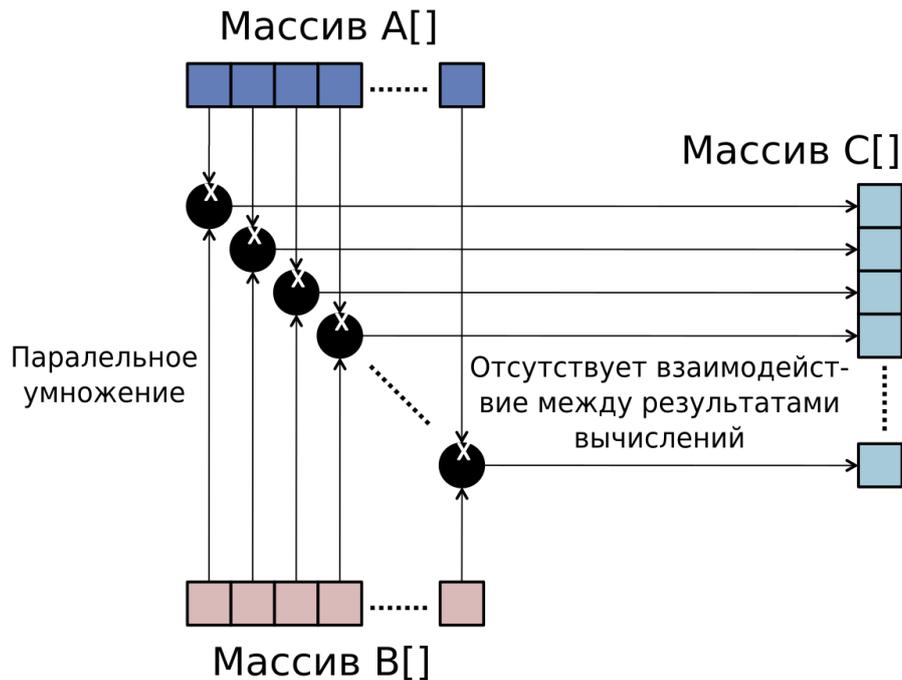


Рисунок 2. Поэлементное умножение векторов с распараллеливанием на уровне данных

Вычисление каждого элемента вектора C не зависит от любого другого его элемента. При распараллеливании этого кода можно использовать отдельный процессор для вычисления каждого элемента вектора C . Следовательно, в этом примере можно исходить из принципа параллелизма на уровне данных, поскольку одна и та же операция применяется ко всем элементам A и B для получения C , а максимальное количество используемых вычислительных элементов ограничивается только их наличием и накладными расходами на пересылку исходных данных и получение результата.

На рис. 3 показан параллелизм на уровне задачи на примере фильтрации множества изображений с использованием БПФ. Каждое изображение в наборе может обрабатываться независимо друг от друга на отдельном процессоре.

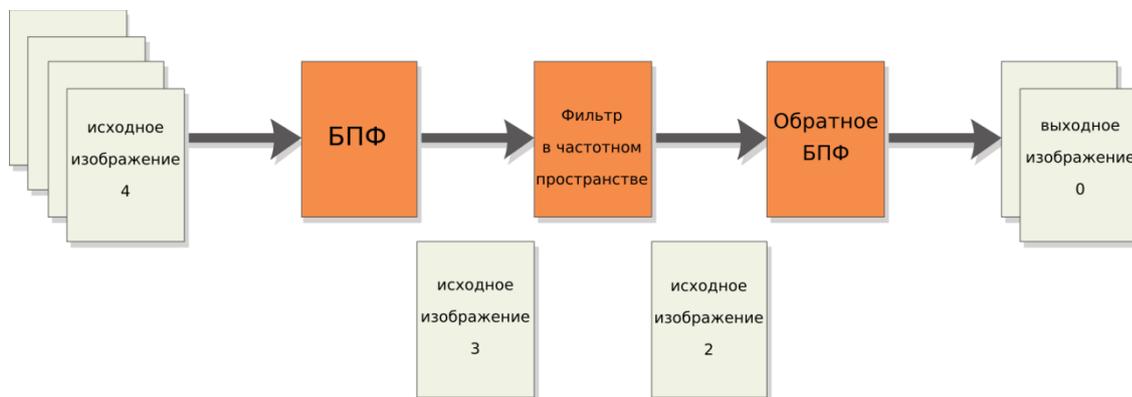


Рисунок 3. Фильтрация набора изображений с распараллеливанием на уровне задачи

Пусть, например, теперь нужно найти количество вхождений некоторого слова в текст (рис. 4).

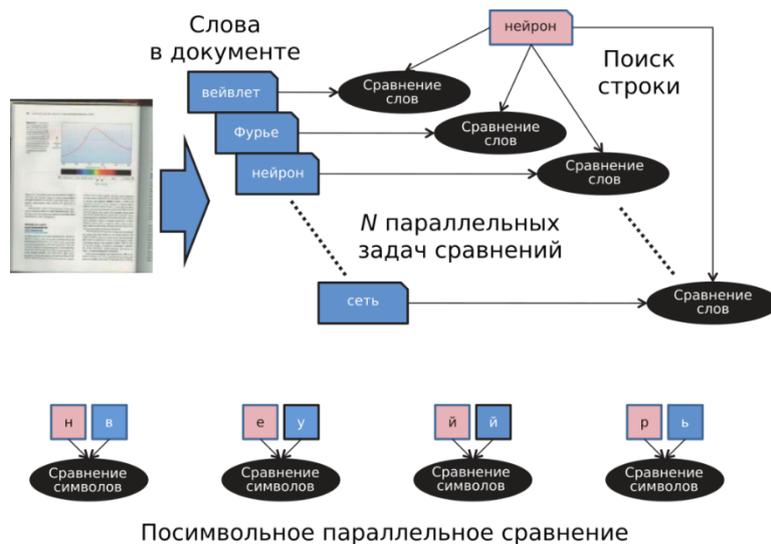


Рисунок 4. Поиск количества вхождений слова в текст

Предположим, что текст уже преобразован в набор из N слов, тогда можно сравнивать по очереди каждое слово с остальными $N-1$ словами. Процесс сравнения слова с множеством потенциально совпадающих с ним слов представляет собой N параллельных выполняемых задач. Здесь существует еще и вложенный параллелизм при посимвольном сравнении двух слов. Этот пример демонстрирует параллелизм и на уровне данных (одна и та же операция посимвольного сравнения выполняется с несколькими элементами данных), и на уровне задачи (слово сравнивается со всеми другими словами одновременно). Как только количество совпадений определено, необходимо сложить их, чтобы получить общее количество вхождений. Это суммирование также может выполняться параллельно каскадным суммированием с временной логарифмической сложностью с помощью операции редукции (рис. 5) частичных сумм для нахождения конечного результата [2].

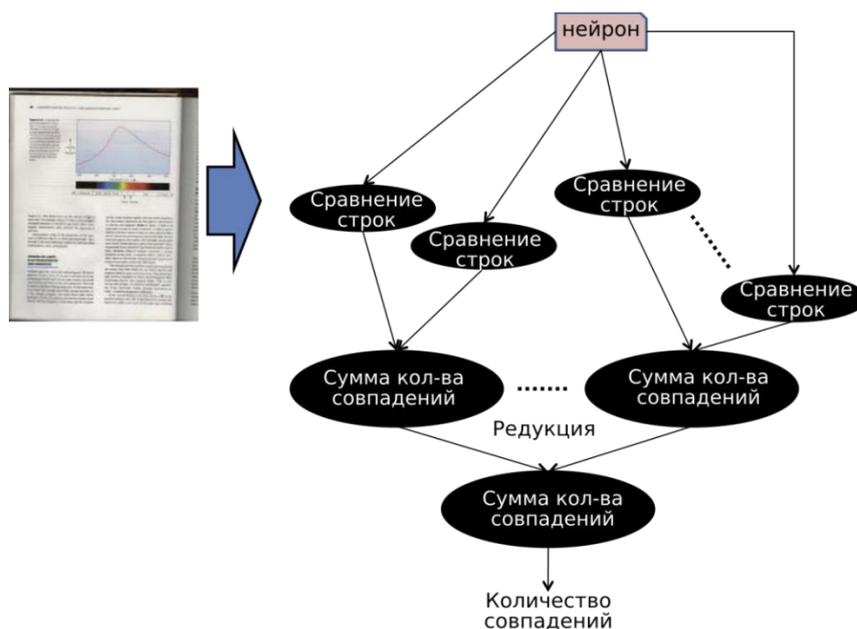


Рисунок 5. Каскадное суммирование

К понятию уровня параллельности тесно примыкает понятие гранулярности – это мера отношения объема вычислений, необходимых для параллельного решения задачи, к объему коммуникаций, необходимых для обмена сообщениями. Наиболее часто выделяют крупнозернистый, среднезернистый и мелкозернистый параллелизм.

- Крупнозернистый параллелизм имеет место тогда, когда каждое параллельное вычисление выполняется в большой степени независимо от остальных, причем требуется достаточно редкий обмен сообщениями между отдельными независимыми вычислениями. Единицами распараллеливания здесь являются большие программы, содержащие тысячи команд. Этот уровень параллелизма обычно обеспечивается операционной системой.
- При среднезернистом параллелизме единицами распараллеливания являются функции, включающие в себя сотни команд. Такой параллелизм может организовываться как программистом, так и компилятором.
- Мелкозернистый параллелизм имеет место тогда, когда каждое параллельное вычисление очень мало и содержит не более нескольких десятков команд. Обычно распараллеливаемыми единицами являются небольшие выражения или отдельные итерации циклов, с небольшими зависимостями по данным. Обычно термин «мелкозернистый параллелизм» означает наличие простых и быстрых любого вычислительных действий. Характерная особенность мелкозернистого параллелизма заключается в приблизительном равенстве интенсивности вычислений и обмена данными [13].

Эффективное параллельное программирование требует хорошего баланса между степенью гранулярности программ и величиной задержки, возникающей между разными гранулами из-за обмена данными. Если эта задержка минимальна, то максимальную производительность будет обеспечивать мелкозернистое разбиение программы. Это тот случай, когда нужно использовать методы параллелизма на уровне данных. Если коммуникационная задержка велика, предпочтительней крупнозернистое разбиение программы на уровне задачи.

Технологии параллельного программирования. Сущность параллелизма заключается в наличии двух или более действий, происходящих одновременно, что применительно к разработке программного обеспечения и означает наличие программно-аппаратной системы, выполняющей несколько задач независимо. Хотя возможно, что независимые задачи могут выполняться одновременно (то есть параллельно), на это не является обязательным требованием. В качестве примера можно привести программу для рисования, которая должна получать информацию об изображении от пользователя и выводить на дисплей сформированное изображение. Прием и обработка входных данных это задачи, которые могут быть независимыми от обновления изображения на мониторе. Хотя их и можно решать одновременно, но, как правило, в этом нет необходимости, тем более, если все они выполняются на одном процессоре. В этом случае программа или операционная система должны переключаться между задачами, по очереди предоставляя им время процессора. В настоящей работе рассматривается параллелизм, связанный с выполнением двух или более вычислений одновременно с явной целью повышения общей производительности.

Например, рассмотрим следующие вычисления :

$$A = B+C \quad (1)$$

$$D = E+G \quad (2)$$

$$R = A+D \quad (3)$$

Вычисления значений A и D в формулах (1) и (2) являются независимыми друг от друга, поскольку они не связаны общими данными. Однако выражение (3) зависит от выражений (1) и (2), поэтому не может вычисляться параллельно с (1) или (2). Параллельные программы обязательно должны иметь части, которые являются независимыми, за счет чего возможно их параллельное выполнение. Как правило, они оформляются в виде нескольких подпрограмм, называющихся потоками. Связь между потоками осуществляется через совместный доступ к памяти, в одном и том же адресном пространстве. Каждый поток имеет и свою локальную память, то есть свои локальные переменные, но все потоки имеют общие глобальные переменные. Основная программа содержит части, которые не могут выполняться параллельно с другими. Она запускается операционной системой, выполняет загрузку необходимых для запуска потоков системных и пользовательских ресурсов и создает ряд потоков. Для организации согласованного взаимодействия потоков через разделяемую память необходимы специальные конструкции синхронизации, такие как блокировки или семафоры [2].

Все многопроцессорные вычислительные системы в той или иной мере поддерживают разделяемую память. Однако поддержка полностью разделяемой между всеми процессорами памяти для многопроцессорных и многоядерных систем на аппаратном уровне является ограничивающим фактором, поскольку необходимое число соединений для передачи данных между процессорами растет по экспоненте с увеличением их количества. Поэтому часто используется менее жесткая модель разделяемой памяти, когда процессоры разбиваются на группы, и непосредственный обмен данными возможен только между процессорами одной группы, что позволяет достичь лучшей масштабируемости системы [14].

Кроме разделяемой памяти возможна организация явного взаимодействия через передачу сообщений, что требует совместных операций отправки и получения, которые должны выполняться каждым потоком. На практике такое взаимодействие реализуется с помощью библиотеки аппаратно-независимых подпрограмм для отправки и получения сообщений. Исторически сложилось так, что с 1980-х годов доступно множество библиотек для передачи сообщений между потоками, самой популярной из которых является MPI [15]. Однако ее реализации для различных операционных систем существенно различаются, что затрудняет разработку кроссплатформенных приложений. Рассмотрим, например, случай, когда запускаются два потока, не использующие общие данные. Если операционная система имеет доступ к необходимым им ресурсам, их можно запускать одновременно или параллельно. Однако если во время выполнения одного потока он сгенерировал данные, которые могут потребоваться второму потоку, тогда возникает необходимость в некоторой форме синхронизации, а параллельное выполнение потоков через точку синхронизации становится невозможным, из чего следует, что при создании программного обеспечения для параллельных вычислительных систем важную роль играет обмен данными и синхронизация. Примерами совместного использования данных в параллельных программах являются и такие задачи, результат решения которых зависит от другой задачи, как например, в известных шаблонах производителя-потребителя или конвейера, а также когда промежуточные результаты объединяются вместе (например, как часть редукции, показанной на рис. 5). Лучше всего поддаются распараллеливанию части программы, лишенные зависимости от общих данных. Но на практике такие случаи встречаются не часто, и практически всегда приходится использовать конструкции синхронизации, поддерживаемые CUDA и OpenCL.

Выводы. В настоящей работе дана характеристика современных гетерогенных вычислительных систем, кроме традиционных процессоров, содержащих, как правило, графические процессоры и другие вычислительные устройства. Даны краткие теоретические сведения и приведен обзор актуальных методов и технологий создания программ для параллельных вычислительных систем. На примерах показано, что применяя различные методы, можно максимально распараллелить задачу, чтобы добиться эффективного решения на многопроцессорных гетерогенных вычислительных системах.

Литература

1. Пантелеев А.Ю. Высокопроизводительные сопроцессоры для параллельной обработки данных в формате с плавающей точкой в системах цифровой обработки сигналов: автореф. дис. канд. техн. наук. – Москва, 2013. – 26 с.
2. Heterogeneous Computing with OpenCL 2.0. David R. Kaeli, Perhaad Mistry, Dana Schaa, Dong Ping Zhang. – Waltham: Morgan Kaufmann, 2015. – 330 p.
3. Пантелеев А.Ю. Цифровая обработка сигналов на современных графических процессорах // Цифровая обработка сигналов. – 2012. – № 3. – С. 68–75.
4. Кориков А.М, Симонов В.В. Гибридная архитектура параллельных вычислительных систем // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2012. – Т.1. № 2(26). – С. 178–183.
5. <http://www.nvidia.ru/object/cuda-parallel-computing-ru.html> (дата обращения: 17.09.2017)
6. <http://www.amd.com/ru-ru/innovations/software-technologies/firepro-graphics/stream> (дата обращения: 17.09.2017)
7. <https://www.khronos.org/opencv/> (дата обращения: 18.09.2017)
8. Almasi G. S., Gottlieb, A. Highly Parallel Computing. – Redwood City, CA: Benjamin Cummings, 1989.
9. Amdahl Gene M. Validity of the Single Processor Approach to Achieving Large-Scale Computing Capabilities // AFIPS Conference Proceedings. – 1967. N. 30. – P. 483–485.
10. Gustafson, J. L. Reevaluating Amdahl's Law // CACM. – 1988. N. 31(5). – P. 532–533.
11. Quinn M.J. Parallel Programming in C with MPI and OpenMP. – New York: NY: McGraw-Hill, 2004.
12. Линев А.В., Боголепов Д.К., Бастраков С.И. Технологии параллельного программирования для процессоров новых архитектур. М.: Изд-во Московского университета, 2010. – 160 с.
13. Орлов С. А., Цилькер Б. Я. Организация ЭВМ и систем: Учебник для вузов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2011. – 688 с.
14. Эндрюс, Г.Р. Основы многопоточного, параллельного и распределенного программирования. М.: «Вильямс», 2003.
15. Долинский М., Толкачев А. Обзор аппаратных и программных средств реализации параллельной обработки // Компоненты и Технологии. – 2004. – № 6. – С. 152–155.

А.В. Сороковая, Н.М. Лыченко

Кыргызско-Российский славянский университет, Бишкек, Кыргызстан

E-mail: nastusha24sh-g@yandex.com, nlychenko@mail.ru,

РАЗРАБОТКА УПРАВЛЯЮЩЕЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦИИ СКОРОЙ МЕДИЦИНСКОЙ ПОМОЩИ

Представлены результаты проектирования и разработки управляющей информационной системы диспетчеризации скорой медицинской помощи, позволяющей автоматизировать процессы приема/передачи вызовов, а также отслеживания местоположения выездных бригад службы скорой медицинской помощи. Система реализована в трехуровневой клиент-серверной архитектуре для взаимодействия компонентов программы и трехслойной архитектуре MVVM для разделения бизнес-логики и представлений.

Ключевые слова: скорая медицинская помощь, карта вызова, выездная бригада, диспетчер, объектно-ориентированное моделирование, клиент-серверная архитектура, платформа Microsoft .Net.

Введение. Проблема автоматизации процесса управления службой скорой медицинской помощи (СМП) является сложной, но актуальной задачей. Существующая технология сбора и обработки оперативной информации через каналы телефонной связи и радиосвязи не обеспечивает эффективного управления выездными бригадами СМП. В условиях роста населения, а следовательно, и количества выполняемых вызовов, требуется более эффективный способ управления работой СМП. Возникает необходимость реорганизации работы СМП по приему-передаче вызовов на основе комплексных автоматизированных систем. Такие системы, отвечающие типовым требованиям к информационным системам диспетчеризации СМП [1], есть в РФ [2, 3, 4], однако в КР аналогов информационных систем управления СМП в настоящее время нет. Как показал анализ бизнес-процессов службы СМП в КР, в ее организации существуют процессы, которые можно автоматизировать и, тем самым, повысить эффективность ее работы. Настоящая статья представляет одно из решений проблемы автоматизации функционирования службы СМП в КР, заключающееся в разработке управляющей информационной системы диспетчеризации СМП (УИСД СМП). В ходе разработки системы была исследована специфика бизнес-процессов в работе службы СМП КР, выделены поддающиеся автоматизации бизнес-процессы, сформулированы функциональные требования к УИСД СМП, проведено объектно-ориентированное моделирование системы.

Анализ бизнес-процессов в существующей системе СМП. Существующая система диспетчеризации СМП в КР основана на передаче всех данных о вызове по телефону или рации. *Старший врач смены* руководит дежурным персоналом, принимает решения об отказе в приеме вызова, ведет переговоры с представителями различных органов. *Старший диспетчер* руководит работой диспетчерской, комплектует карты вызова, следит за местонахождением выездных бригад. *Диспетчер* принимает и ведет запись

вызовов, связывается с дежурным персоналом, передает им адреса вызовов в случае, если бригада не на подстанции, или карты вызова, если бригада находится поблизости, контролирует местонахождение автомобилей СМП, время работы выездного персонала, ведет учет исполнения вызовов, делая записи в картах вызова; карты вызова передает старшему диспетчеру. При этом диспетчер затрачивает большое количество времени на составление очереди, оформление карты вызова и передачу вызова выездным бригадам посредством голосовых сообщений. *Вызывающая сторона* совершает звонок диспетчеру по поводу вызова бригады СМП и при этом вынуждена постоянно связываться с диспетчером для уточнения сроков выполнения вызова. *Выездная бригада* осуществляет оказание СМП и заполняет карту вызова. При этом выездные бригады затрачивают значительное количество времени на регулирование накладок с диспетчером, поиск адреса места вызова, оформление карты вызова. *Врач стационара* принимает госпитализированных больных в стационар или отказывает в госпитализации по обоснованной причине.

Анализ бизнес-процессов организации СМП выявил следующие проблемы: ошибки передачи информации и планирования вызовов, необходимость длительного заполнения и передачи карты вызова, необходимость отслеживания времени обслуживания вызова и каждой из его стадий выездной бригадой, трудность определения и выбора пути следования к месту вызова, поступление частых звонков от вызывающей стороны по поводу уточнения выезда бригады на место вызова, длительность и сложность поиска карты вызова и обработки картотеки вызовов. Следствиями этих проблем являются: задержки обслуживания вызовов, ошибки планирования, ошибки в заполнении карты вызова, потеря времени на поиск адреса и определение пути; снижение эффективности работы диспетчера. Указанные проблемы затрагивают население, диспетчеров СМП, врачей. Успешное решение этих проблем должно позволить: ускорить передачу карты вызова за счет передачи ее в электронном виде, исключить ошибки, повысить скорость работы диспетчера, снять обязанность с врача бригады следить за временем обслуживания вызова за счет автоматического подсчета времени, сократить время принятия решения о выборе пути за счет автоопределения (по возможности) системой адреса и предложения оптимального пути следования к месту вызова, уведомлять вызывающую сторону о выезде бригады посредством SMS-уведомлений, упростить работу с картотекой вызовов за счет ее хранения в электронной базе данных.

Кроме того, в результате анализа бизнес-процессов организации СМП выявлены основные процессы, которые можно автоматизировать путем создания УИСД СМП: процесс приема/обработки вызова; процесс приема/передачи информации о местоположении выездных бригад; поиск по истории вызовов.

Функциональные требования. Функционал системы описывается совокупностью вариантов использования системы или прецедентов. Каждый вариант использования (ВИ) охватывает некоторую очевидную для пользователей функцию подсистемы и решает некоторую дискретную задачу пользователя [5]. На рис. 1 представлена обобщенная диаграмма вариантов использования системы.

Диспетчер: принимает и регистрирует вызовы в системе; назначает вызовы *Выездным бригадам* или группе бригад с ожиданием дальнейшего принятия/отказа; ведет контроль за перемещением бригад, наблюдая за передвижением бригад на карте региона; имеет возможность посмотреть и распечатать отчетность по обслуженным вызовам; имеет доступ к заполнению карты вызова, а именно регистрирует вызов в системе по полученной от вызывающей стороны информации.

Вызывающая сторона: получает уведомления о статусе обслуживания совершенного вызова посредством SMS-сообщений.

Выездная бригада: принимает вызов или отказывается от него; заполняет карту вызова; фиксирует изменения статуса обслуживания вызова и статуса состояния автомобиля.

Поскольку система диспетчеризации СМП спроектирована как подсистема информационной системы СМП (ИС СМП), на диаграмме ВИ показан *Модуль управления доступом ИС СМП* как внешний по отношению к УИСД СМП. Кроме того, на диаграмме ВИ, так же как внешний, показан *Картографический проект OpenStreetMap*, как источник топографических карт местности.

■

Рисунок 1. Диаграмма вариантов использования системы пользователями

Как видно из рис. 1, система имеет три основных режима работы:

- режим непосредственной диспетчеризации (ВИ «Регистрация нового вызова», «Назначение вызова бригаде», «Контроль передвижения бригад»);
- режим обслуживания вызова (ВИ «Заполнение карты вызова», «Обслуживание вызова», «Изменение статуса обслуживания вызова», «Изменение статуса состояния автомобиля», «Получение уведомлений о статусе обслуживания»);
- режим просмотра отчетности (ВИ «Просмотр отчетов по обслуживанию вызовов»).

На рис. 2 и 3 в виде диаграмм деятельности [5] представлены детализации ВИ «Назначение вызова бригаде» и «Обслуживание вызова», как наиболее существенных с точки зрения потенциальных рисков и архитектурной значимости.

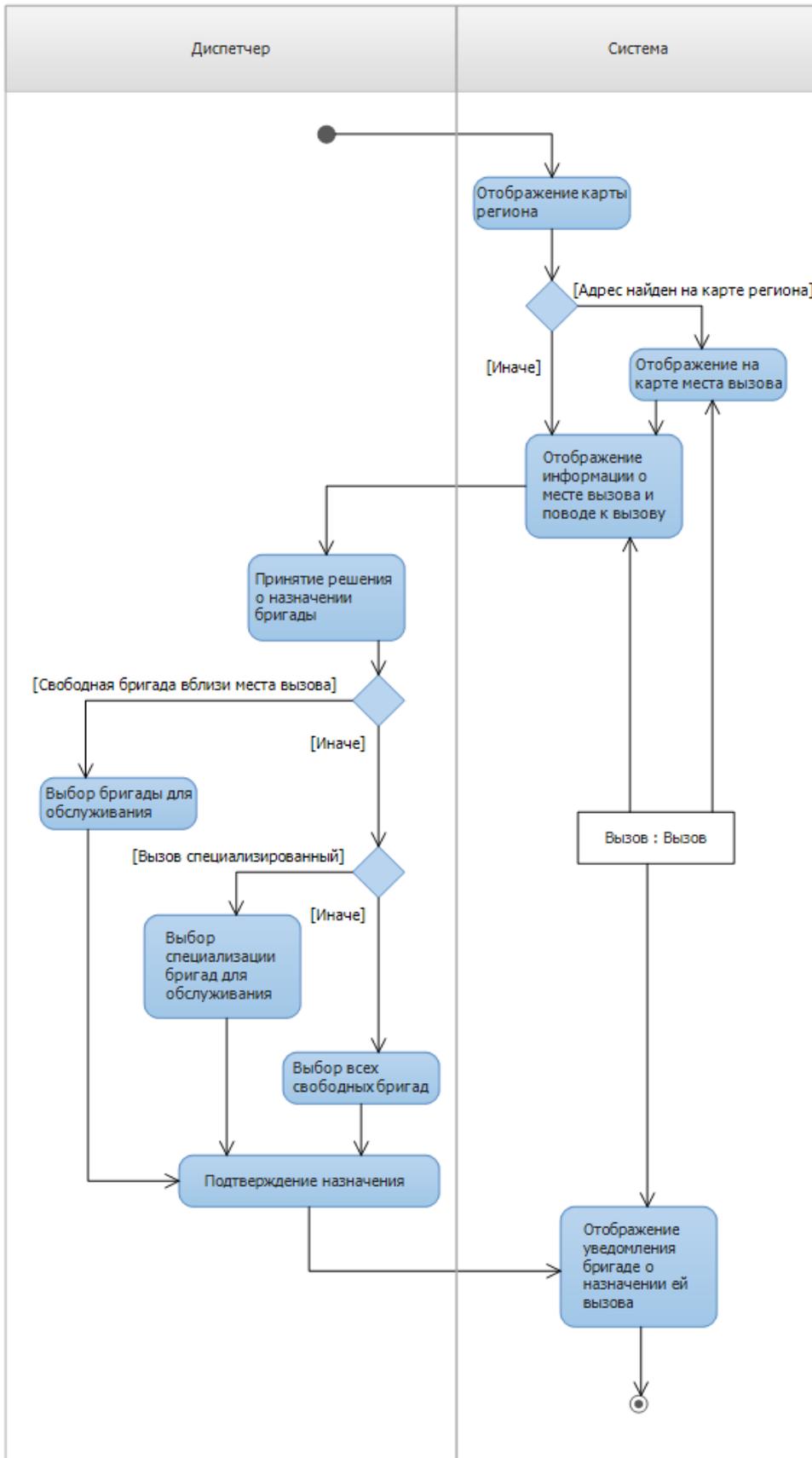


Рисунок 2. Детализация ВИ «Назначение вызова бригаде»

Рисунок 3. Детализация ВИ «Обслуживание вызова»

Общая модель системы. Разрабатываемая система основывается на трехслойной архитектуре MVVM. Последняя состоит из трех компонентов: *модели* (Model), *модели представления* (ViewModel) и *представления* (View) [6]. *Модель* описывает используемые в приложении данные. Логика обработки данных так же может присутствовать в моделях. Никакой логики отображения данных или взаимодействия с визуальными элементами в модели быть не должно. *Модель представления* связывает модель и представление через механизм привязки данных. При этом при изменении значений в модели изменяется представление, и наоборот. Модель представления также содержит логику по получению данных из модели, которые потом передаются в представление, и определяет логику по обновлению данных в модели. *Представление* определяет визуальный интерфейс, через который пользователь взаимодействует с приложением. Представление содержит в себе разметку и привязанный код. Код в идеале не должен содержать никакой логики обработки данных. Иногда допускаются отклонения от паттерна MVVM для реализации логики, сложно реализуемой для этого паттерна [6].

Таким образом, классы системы можно разделить на три основных пакета и несколько вспомогательных:

- пакет бизнес-моделей BusinessModels: представляет собой набор сущностей для отображения на базу данных и классы, необходимые для передачи информации о пользователях системы, находящихся подключенных к системе;
- пакет моделей представлений ViewModels: представляет собой набор классов, для отображения атрибутов бизнес-моделей на представление;
- пакет представлений Views: представляет собой классы форм и окон, предполагающих наличие разметки;
- пакет сообщений RequestModels: представляет собой набор классов, определяющих виды сообщений для передачи данных между различными частями распределенной системы и данные, необходимые для их отправки;
- пакет для описания логики взаимодействия частей распределенной системы NetworkCommunicationClasses.

На рис. 4 представлена общая модель системы в виде пакетов, содержащих соответствующие классы.

Рис. 4. Общая модель системы.

Система представляет собой реализацию трехуровневой архитектуры, предполагающей наличие трех компонентов [7]: сервера базы данных; сервера приложений; клиента. В системе клиента два: приложение диспетчера СМП и приложение бригады СМП.

Тестирование системы. Для проведения тестирования разработанного программного обеспечения с целью выявления, насколько хорошо разработанное программное обеспечение соответствует функциональным требованиям, а также установления и фиксации проблем, был разработан план тестирования, в рамках которого для каждого функционального требования (см. рис. 1) были разработаны сценарии тестирования. Стратегия тестирования всего продукта проводилась в несколько этапов:

- модульное тестирование – изолированная проверка каждого отдельного элемента путем запуска тестов в искусственной среде [8];
- интеграционное тестирование – проверка нескольких объединенных модулей в группе;
- системное тестирование – проверка системы в целом, ее функциональных и нефункциональных требований.

Модульное тестирование проведено в среде разработки Visual Studio с использованием встроенного шаблона модульных тестов. Для модульного тестирования в проекте разработаны соответствующие методы тестирования, заполняющие свойства модели представления заданными значениями, и проверяющие ошибки, возвращенные каждым полем модели.

Интеграционное тестирование проведено вручную для проверки взаимодействия компонентов “сервер – клиент диспетчера”. Для этого на стороне клиента выездной бригады была поставлена «заглушка» и система была проверена на правильность взаимодействия и передачи сообщений между удаленными компонентами.

Реализация приложения диспетчера СМП. После входа в систему открывается главная форма программы (см. рис. 5) для доступа к остальным функциям. Слева отображается местоположение подключенных к системе выездных бригад СМП. Справа отображаются все незавершенные вызовы, требующие контроля со стороны диспетчера.

Для регистрации нового вызова система отображает *форму регистрации нового вызова*, в которой заполняются обязательные поля: Вид вызова; Населенный пункт; Улица; дом/корп. (дом или корпус); Пол больного; Повод к вызову и поля, необязательные к заполнению: Кв. (квартира); Ком. (комната); Под. (подъезд); Код под. (код подъезда); Этаж; Фамилия, имя и отчество больного; Возраст больного; Место работы больного; Жалобы; Тел. (телефон вызывающего); Фамилия, имя и отчество вызывающего; Примечания. Время принятия вызова заполняется автоматически.

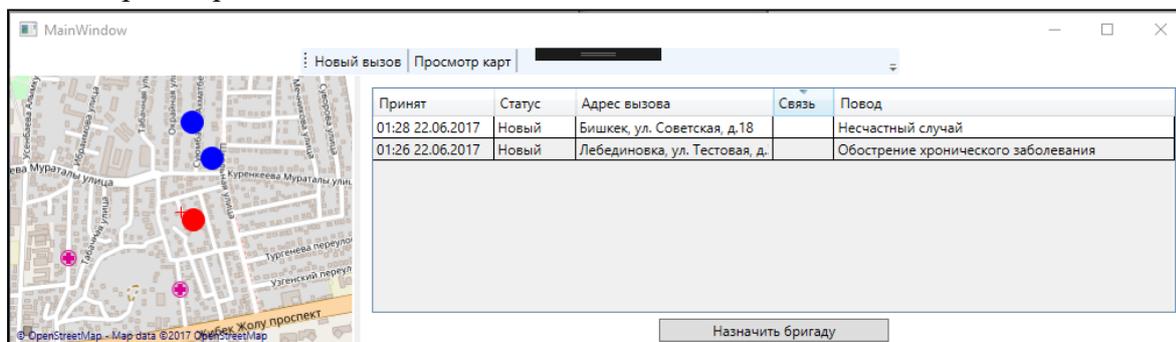


Рис. 5. Главная форма программы.

После регистрации нового вызова необходимо назначить вызов выездной бригаде СМП. При этом выбор бригады выполняется, нажав на метку бригады на топографической карте или из списков бригад и их профилей (см. рис. 6).

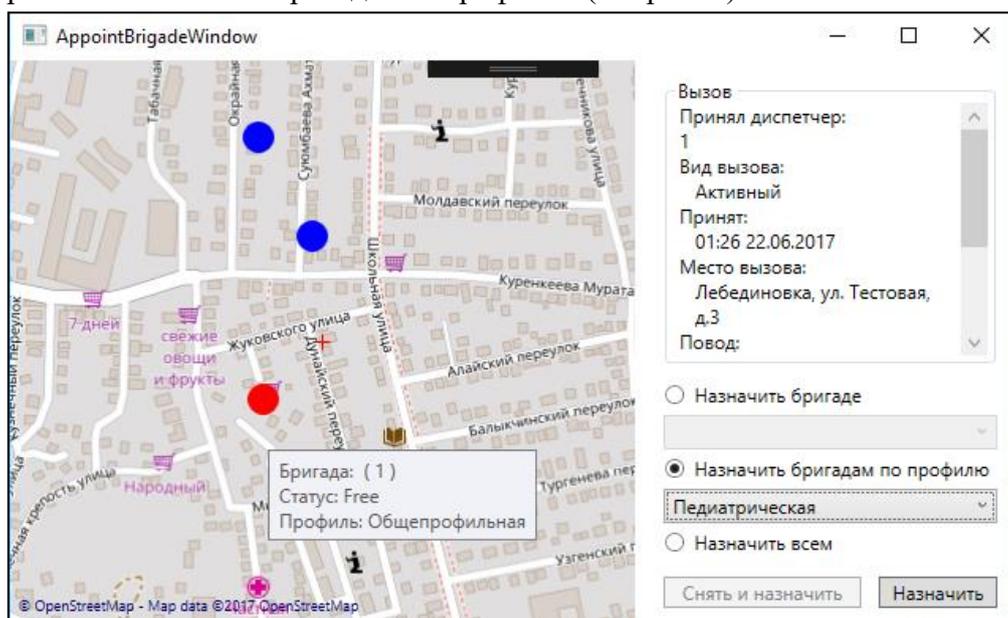


Рис. 6. Назначение вызова выездной бригаде СМП.

При просмотре истории вызовов (“Просмотр карт” на главной форме программы (рис. 5)) вниманию диспетчера предоставляются карты предыдущих вызовов, при этом информацию можно обновлять в соответствии с развитием ситуации с вызовом, дополнять и фильтровать. Пример полной карты вызова представлен на рис. 7.

Заключение. Таким образом, в работе представлены функциональные требования к УИСД СМП, общая модель системы и приложение для рабочей станции диспетчера СМП, которое позволяет:

- регистрировать новый вызов выездной бригады СМП;

- назначать выездную бригаду или бригады на вызов с ожиданием ответа от выездной бригады СМП;
- следить за местоположением выездных бригад СМП;
- формировать электронную базу карт вызова;
- производить поиск карт вызова по определенным критериям;
- заполнять или редактировать уже существующие в системе карты вызова.

CallInfoWindow

Диспетчер: 1 Вид вызова: Активный

Бригада: Brigade1(TEST) Статус: Закрыт

Время получения:

Вызов принят: 28.06.2017 00:14
 Передан бригаде: 28.06.2017 00:19
 Время выезда: 28.06.2017 00:21
 Время прибытия: 28.06.2017 00:32

Начало отправления: 28.06.2017 00:35
 Время прибытия в мед. уч.: 28.06.2017 00:54
 Время окончания вызова: 28.06.2017 01:02
 Время возвращения:

Затрачено на вызов 0 ч. 47 м.

АдресВызова

Населенный пункт: Бишкек Улица: Куренкеева

дом/корп. 43 кв. 1 ком. 1 под. код под. этаж

Кто вызвал

тел. Сам(а)

Фамилия: Иванов Имя: Иван Отчество: Иванович

Сведения о больном

Фамилия: Иванов Имя: Иван Отчество: Иванович

Возраст: 21 лет Пол: м

М. работы: Безработный

Повод: Острое заболевание Другой

Жалобы

Рвота, озноб, слабость в мышцах

Диагноз

Основной: Пищевое отравление Другой

Сопутствующие: Другой

Результаты

Результат вызова: Доставлен на госпитализацию

Доставлен в ЛПУ: Семейная №3

Результат доставки в стационар

Госпитализирован
 Отказ дежурного врача. Причина:
 Отказался / сам ушел во время транспортировки

Категория сложности вызова: Вторая Проведенные мероприятия: Соответствуют состоянию Медикаментозное лечение: Адекватное

Оценка обоснованности. Пациент нуждался к экстренной помощи

Примечания

Острое отравление пищевыми продуктами. Промыт желудок. Выписаны сорбенты: активированный уголь, энтеросгель. Госпитализирован.

Сохранить

Рис. 7. Форма заполнения карты вызова.

Проведено тестирование реализованной части функционала. Тестирование показало, что реализация отвечает соответствующим требованиям. На основе разработанных моделей всей системы в дальнейшем планируется разработать приложение выездной бригады СМП, дополнительные модули ИС СМП, которые вместе с рассматриваемой в данной работе УИСД СМП будут интегрированы в единую ИС СМП.

ИС СМП в дальнейшем должна предусматривать интеграцию с системами, разрабатываемыми в рамках Программы электронного здравоохранения КР на 2016-2020 годы, такими как: Электронная медицинская карта пациента, Центральная БД ЛЛС и ИМН, Центральные регистры «Организации здравоохранения», «Медицинские кадры», Регистр «Приписанное население». Полная реализация ИС СМП позволит улучшить качество предоставления медицинских услуг гражданам.

Литература

1. Типовые требования к информационным системам диспетчеризации скорой, в том числе скорой специализированной медицинской помощи – URL: <https://portal.egisz.rosminzdrav.ru/materials/306>
2. Навигационно-информационная система (НИС) мониторинга и управления транспортом и экипажами скорой медицинской помощи «РКС Скорая помощь» - URL: <http://russianspacesystems.ru/bussines/navigation/rks-navigaciya-i-monitoring/rks-skoraya-pomosh/>
3. АСУ Скорая Помощь – URL: <промкаталог.пф/PublicDocuments/0414497.pdf>
4. Программный комплекс автоматизации диспетчерской службы станций скорой медицинской помощи – URL: <http://www.adis-nst.ru/>
5. С.А. Орлов. Технологии разработки программного обеспечения: Учебник.– СПб.: Питер, 2002. – 464 с.
6. Паттерн MVVM – URL: <https://metanit.com/>
7. Трёхуровневая архитектура – URL: <https://ru.wikipedia.org/>
8. Модульное тестирование – URL: http://citforum.ru/SE/testing/unit_testing/

С.В. Корякин

*Институт автоматизации и информационных технологий
Национальной академии наук Кыргызской Республики, г.Бишкек
s.koryakin@aknet.kg*

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Рассматриваются особенности построения и функционирования систем информационной безопасности, комплекс организационных и технических мер, направленных на защиту корпоративных данных. Обосновываются процедуры и правила работы с разными видами информации, IT-сервисами, средствами защиты и т. д. Рекомендуются технические меры в использовании аппаратных и программных средств контроля доступа, мониторинга утечек, антивирусной защиты, межсетевого экранирования, защиты от электромагнитных излучений и прочее.

Ключевые слова: информационная безопасность, системы, информация, данные, средства защиты, устройства, технические средства, технические меры.

В наше время при бурном развитии науки и техники большое внимание необходимо уделять инженерно-технической охране объектов. Мероприятия по организации охраны являются частью единой системы охраны секретной информации объекта.

В решении вопросов обеспечения охраны объекта и территории участвуют определенные силы и средства, от эффективного функционирования которых зависит своевременное предотвращение доступа лиц к информации (материальным ценностям), которые охраняются посредством пропускного/внутри объектового режимов. Их целью является предупреждение любых происшествий на объекте, а также попыток проникновения на его территорию посторонних (в частности, ликвидация последствий происшествий), своевременное обнаружение проникших на территорию злоумышленников и их задержание, обеспечение сохранности, как конфиденциальной информации, так и материальных средств.

Список инженерно-технических средств защиты объектов

Список инженерно-технических средств защиты объектов можно разделить на физические барьеры и непосредственно технические средства.

Физические барьеры создаются исходя из степени секретности деятельности предприятия и расположения его объектов. К ним относят [1]:

Спец конструкции (контейнеры и решетки, усиленные двери, различные противотаранные устройства и пр.); строительные конструкции на объектах (ворота и двери, перекрытия и пр.); иные препятствия. Технические средства размещают по периметру, как служебных помещений, так и всех зон и элементов объектов.

К основным техническим средствам относят:

- средства охранной сигнализации – устанавливают на КПП, в служебных помещениях, во всех зданиях/сооружениях охраняемой зоны объекта;
- средства спец/связи (включая экстренную);
- средства контроля доступа – устанавливают на КПП, в служебных помещениях, во всех зданиях/сооружениях охраняемой зоны объекта; средства систем жизнеобеспечения и обнаружения (при попытке проноса/провоза) запрещенных веществ, предметов; средства наблюдения.

Особое место в единой системе защиты занимают различные средства наблюдения, охранная сигнализация и, конечно, средства контроля доступа. Все технические средства системы защиты обеспечены автоматической системой переключения на резервный источник питания в случае отключения основного.

Технические системы противопожарной защиты объектов:

Средства эвакуации (речевые оповещатели, пути эвакуации и пр.); системы контроля доступа, видеонаблюдения + охранная сигнализация; грамотный выбор и размещение дымовых извещателей с компенсацией запыленности. Идеальный вариант – комбинированные или совмещенные устройства для снижения числа ложных срабатываний, для обнаружения лица при температуре выше температуры тела.

Использование ИК-извещателей с микропроцессорной обработкой.

Организационные меры – плановые обходы территории, создание регламента для охранников и контроль над следованием ему, четко продуманная система пропуска, мониторинг камер наблюдения и зональная сигнализация, подключение коммуникаторов для вывода всей информации на пультах МЧС и ЧВК, и пр.

Дополнительные меры организации. Они касаются не только здания, но и всей территории, прилегающей к предприятию, включая парковки. Например, решение проблемы подъезда в экстренных случаях пожарных автомобилей, то есть, для эффективного решения задач необходимо соединение всех элементов системы безопасности в единую систему.

Выбор и размещение датчиков (пламени, тепловых, дымовых).

Следующими в списке средств защиты стоят виды технической защиты объектов от незаконного проникновения – сигнализация и видеонаблюдение.

При охране предприятия используются следующие виды сигнализации: охранная, пожарная, тревожная.

Очень распространен способ, когда первые две системы объединяют в одну. Назначение данной охранно-пожарной сигнализации – сигнализирование о пожаре либо попытке противоправного проникновения на территорию.

Назначение тревожной сигнализации – сигнализирование о разбойном нападении и прочих действиях незаконного характера, осуществляемое посредством нажатия тревожных кнопок (скрыто установленных) персоналом.

Сигнализацию разделяют на: автономную – выдача у доверенных лиц различных звуковых/световых сигналов тревоги и централизованная – выдача сигналов тревоги на приборах охраны, КПП или дежурной части милиции.

Различают следующие элементы технической укрепленности объектов:

Средства связи. Средства наблюдения. Освещение объекта охраны. Запретная зона. Ограждение периметра. Запорные устройства. Нахождение сотрудников охраны на спец местах (постовые будки, спец вышки, места скрытого наблюдения и пр.). Основные исходные требования к технической оснащенности объектов: исправное состояние всех помещений и их элементов; соответствие дверей требованиям ГОСТа.

Остекленные окна (форточки и пр.) с наличием исправных запорных систем, решеток при необходимости и пр. Установка решетчатых дверей при отсутствии дверей в подвальные помещения. Установка решеток на вентиляционные шахты либо дымоходы с выходом на крышу. Применение специальных запорных устройств. Тех оснащение спец хранилищ. Оборудование помещений с ценностями группы А различными замками повышенной секретности и многоуровневыми тех средствами, автономным источником питания и сигнализацией. Снабжение поста охраны внешней/внутренней связью. Укомплектование объекта нужным количеством средств пожаротушения и всеми видами сигнализации. Обеспечение достаточного освещения на территории объекта и прилегающей к нему.

Организация технической защиты помещений

Ключевая задача инженерно-технической защиты – предупреждение проникновения случайных лиц и злоумышленников на территорию объекта. Данная система защиты разделяется на 6 специальных зон: Помещения, которые доступны посетителям. Периметр объекта. Периметр прилегающей территории. Кабинеты руководства. Служебные помещения. Сеймовые комнаты, хранилища и пр.

Основные средства инженерно-технической защиты:

Заборные ворота и заборы (ток высокого напряжения, колючая проволока, козырьки и пр.). Шлюзы (пропуск/проверка авто). КПП для пропуска посетителей, персонала. Укрепление дверей, решеток, окон. Специальные электрические замки. Тамбуры, оснащенные средствами безопасности, и пр.

Таким образом, в настоящее время в современном обществе информационная сфера имеет две составляющие [2]: информационно-техническую (искусственно созданный человеком мир техники, технологий и т. п.) и информационно-психологическую (естественный мир живой природы, включающий и самого человека). Соответственно, в общем случае информационную безопасность общества можно представить двумя составными частями: информационно-технической безопасностью и информационно-психологической (психофизической) безопасностью.

Определение и классификация возможных угроз безопасности

Также важным аспектом информационной безопасности является определение и классификация возможных угроз безопасности.

Информационная безопасность в следующих значениях может рассматриваться как процесс обеспечения конфиденциальности, целостности и доступности информации (рис 1) [3].

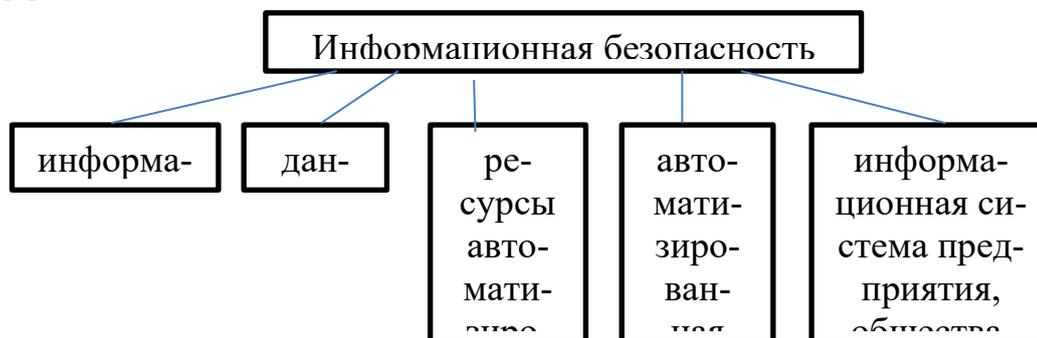


Рисунок. 1. Значение состояния определенного объекта системы информационной безопасности

Рассмотрим структурную схему основных критериев в совокупности составляющих систему информационной безопасности (рис. 2).

Безопасность автоматизированной информационной системы [4] характеризует состояние защищённости автоматизированной системы, при котором обеспечиваются конфиденциальность, доступность, целостность, подотчётность и подлинность её ресурсов. Защищённость информации и поддерживающей инфраструктуры от случайных или преднамеренных воздействий естественного или искусственного характера, которые могут нанести ущерб субъектам информационных отношений. Поддерживающая инфраструктура – системы электро-, тепло-, водо-, газоснабжения, системы кондиционирования и т. д., а также обслуживающий персонал.

В современном обществе информационную безопасность определяют, как "процесс баланса между возникающими, воздействующими угрозами и успешностью противодействия этим угрозам со стороны органов государственной власти, отвечающих за безопасность государства" [5].



Рисунок 2.

Рисунок. 2. Структурная схема критериев системы информационной безопасности

В качестве стандартной модели безопасности часто приводят модель из трёх категорий (табл. 1):

Таблица 1. Категории моделей информационной безопасности

Конфиденциальность	Целостность	Доступность
Состояние информации, при котором доступ к ней осуществляют только субъекты, имеющие на неё право	Избежание несанкционированной модификации информации	Избежание временного или постоянного сокрытия информации от пользователей, получивших права доступа

Существуют и другие не всегда обязательные категории модели безопасности (табл. 2):

Таблица 2. Не обязательные категории модели информационной безопасности

Неотказуемость или апеллируемость	Подотчётность	Достоверность	Аутентичность или подлинность
способность удостоверять имевшее место действие или событие так, что эти события или действия не могли быть позже отвергнуты	свойство, обеспечивающее однозначное проследивание действий любого логического объекта	свойство соответствия предусмотренному поведению или результату	свойство, гарантирующее, что субъект или ресурс идентичны заявленным

Определение категорий и характеристик информационной безопасности наиболее удобно проводить при помощи системного подхода. Системный подход при описании информационной безопасности предлагает выделить следующие составляющие [6]: Законодательная, нормативно-правовая и научная база. Структура и задачи органов (подразделений), обеспечивающих безопасность ИТ. Организационно-технические и

режимные меры и методы (Политика информационной безопасности). Программно-технические способы и средства обеспечения информационной безопасности.

Для построения и эффективной эксплуатации систем обеспечения информационной безопасности (СОИБ) необходимо [7]: выявить требования защиты информации, специфические для данного объекта защиты; учесть требования национального и международного законодательства; использовать наработанные практики (стандарты, методологии) построения подобных СОИБ; определить подразделения, ответственные за реализацию и поддержку СОИБ; распределить между подразделениями области ответственности в осуществлении требований СОИБ; на базе управления рисками информационной безопасности определить общие положения, технические и организационные требования, составляющие Политику информационной безопасности объекта защиты; реализовать требования Политики информационной безопасности, внедрив соответствующие программно-технические способы и средства защиты информации; реализовать систему менеджмента (управления) информационной безопасности (СМИБ); используя СМИБ, организовать регулярный контроль эффективности СОИБ и при необходимости пересмотр и корректировку СОИБ и СМИБ.

На (рис. 3) изображены службы, организующие защиту информации.

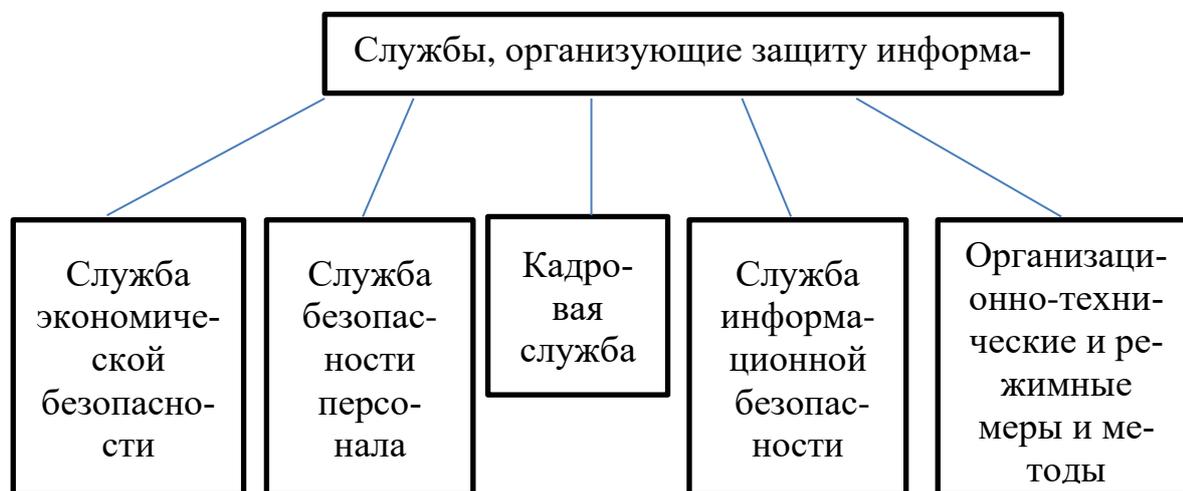


Рисунок. 3. Службы, организующие защиту информации

Для описания технологии защиты информации конкретной информационной системы обычно строится так называемая Политика информационной безопасности или Политика безопасности рассматриваемой информационной системы.

Политика безопасности (информации в организации) (англ. Organizational security policy) [8] – совокупность документированных правил, процедур, практических приёмов или руководящих принципов в области безопасности информации, которыми руководствуется организация в своей деятельности. Правила, директивы, сложившаяся практика, которые определяют, как в пределах структуры и её информационно-телекоммуникационных технологий управлять, защищать и распределять активы, в том числе критичную информацию. Структурная схема основных критериев построения Политики информационной безопасности изображена на Рис. 4.

Для построения Политики информационной безопасности рекомендуется отдельно рассматривать следующие направления защиты информационной системы [9]: защита объектов информационной системы; защита процессов, процедур и программ обработки информации; защита каналов связи (акустические, инфракрасные, проводные, радиоканалы и др.), включая защиту информации в локальных сетях; подавление побочных электромагнитных излучений; управление системой защиты.

При этом по каждому из перечисленных выше направлений Политика информационной безопасности должна описывать следующие этапы создания средств защиты информации:

- определение информационных и технических ресурсов, подлежащих защите;
- Выявление полного множества потенциально возможных угроз и каналов утечки информации;
- проведение оценки уязвимости и рисков информации при имеющемся множестве угроз и каналов утечки;
- определение требований к системе защиты;
- осуществление выбора средств защиты информации и их характеристик;
- Внедрение и организация использования выбранных мер, способов и средств защиты;
- Осуществление контроля целостности и управление системой защиты.

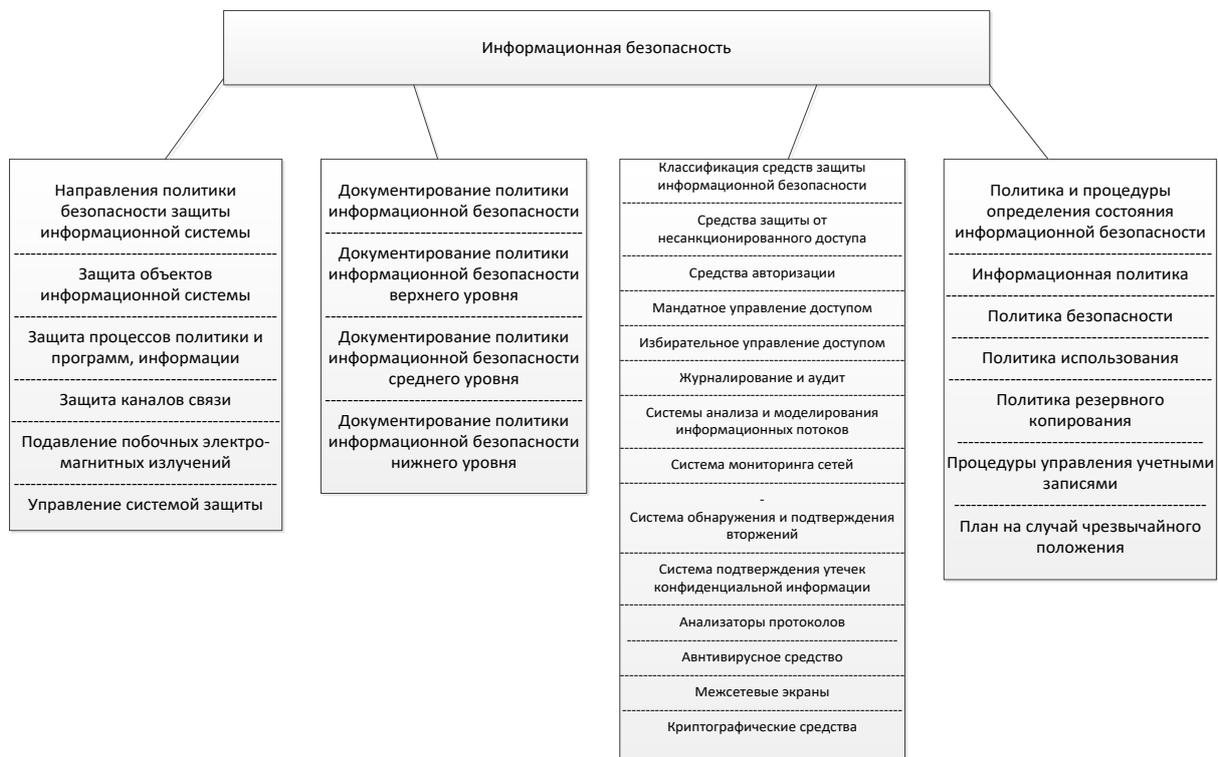


Рисунок. 4. Структурная схема критериев построения

Политика информационной безопасности

Политика информационной безопасности оформляется в виде документированных требований на информационную систему. Документы обычно разделяют по уровням описания (детализации) процесса защиты – верхний уровень, средний уровень, нижний уровень.

Документы верхнего уровня Политики информационной безопасности отражают позицию организации к деятельности в области защиты информации, её стремление соответствовать государственным, международным требованиям и стандартам в этой области. Подобные документы могут называться «Концепция ИБ», «Регламент управления ИБ», «Политика ИБ», «Технический стандарт ИБ» и т. п. Область распространения документов верхнего уровня обычно не ограничивается, однако данные документы могут выпускаться и в двух редакциях – для внешнего и внутреннего использования.

Согласно ГОСТ Р ИСО/МЭК 17799-2005, на верхнем уровне Политики информационной безопасности должны быть оформлены следующие документы: «Концепция обеспечения ИБ», «Правила допустимого использования ресурсов информационной системы», «План обеспечения непрерывности бизнеса».

К среднему уровню относят документы, касающиеся отдельных аспектов информационной безопасности. Это требования на создание и эксплуатацию средств защиты информации, организацию информационных и бизнес-процессов организации по конкретному направлению защиты информации. Например: Безопасности данных, Безопасности коммуникаций, использования средств криптографической защиты, Контентная фильтрация и т. п. Подобные документы обычно издаются в виде внутренних технических и организационных политик (стандартов) организации. Все документы среднего уровня политики информационной безопасности конфиденциальны.

В политику информационной безопасности нижнего уровня входят регламенты работ, руководства по администрированию, инструкции по эксплуатации отдельных сервисов информационной безопасности.

Далее в списке средств защиты располагаются Программно-технические способы и средства обеспечения информационной безопасности. Определяют следующую классификацию способов и средств защиты информации [10]:

- средства защиты от несанкционированного доступа;
- средства авторизации;
- мандатное управление доступом [11];
- избирательное управление доступом;
- управление доступом на основе ролей;
- журналирование (так же называется Аудит);
- системы анализа и моделирования информационных потоков (CASE-системы); системы мониторинга сетей; системы обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS);
- системы предотвращения утечек конфиденциальной информации (DLP-системы);
- анализаторы протоколов; антивирусные средства; межсетевые экраны.

Криптографические средства – шифрование; цифровая подпись; системы резервного копирования; системы бесперебойного питания; источники бесперебойного питания; резервирование нагрузки; генераторы напряжения.

Системы аутентификации: пароль; ключ доступа (физический или электронный); сертификат; биометрия.

Средства предотвращения взлома корпусов и краж оборудования. Средства контроля доступа в помещения.

Инструментальные средства анализа систем защиты – антивирус, способы защиты от компьютерных злоумышленников

Исходя из этой классификации средств защиты информации, понятие информационная безопасность это, прежде всего, защита сети от различного вида атак. Существует ряд простых средств, с помощью которых можно остановить попытки проникновения в сеть. К ним относятся:

Оперативная установка исправлений для программ, работающих в интернете.

Антивирусные программы по обнаружению различного рода взломов и вирусов незаменимы для повышения безопасности любой сети. Они наблюдают за работой компьютеров и выявляют на них вредоносные программы.

Следует использовать наиболее надёжные пароли, менять их как можно чаще и чтобы их длина была максимальной. Это может предотвратить кражу секретной и не секретной информации.

Соединения с удаленными машинами (компьютерами) должны быть защищены с помощью паролей, чтобы избежать проникновения в сеть с помощью прослушивания сетевого трафика в наиболее важных местах и выделения из него имен пользователей и их паролей.

При установке новой операционной системы обычно разрешаются все сетевые средства, что является не безопасным. Кроме вышеперечисленных средств защиты информации, существует еще множество способов предотвращения взломов и краж информации. Для избегания неприятных ситуаций необходимо изучать рекомендации по безопасности и придерживаться необходимых средств защиты.

Следующей в списке средств защиты располагается – Организационная защита объектов информатизации.

Организационная защита – это регламентация производственной деятельности и взаимоотношений исполнителей на нормативно-правовой основе, исключающей или существенно затрудняющей неправомерное овладение конфиденциальной информацией и проявление внутренних и внешних угроз. Организационная защита обеспечивает: организацию охраны, режима, работу с кадрами, с документами, использование технических средств безопасности и информационно-аналитическую деятельность по выявлению внутренних и внешних угроз предпринимательской деятельности [12].

К основным организационным мероприятиям относятся: организацию режима и охраны. Их цель – исключение возможности тайного проникновения на территорию и в помещения посторонних лиц; организацию работы с сотрудниками, которая предусматривает подбор и расстановку персонала, включая ознакомление с сотрудниками, их изучение, обучение правилам работы с конфиденциальной информацией, ознакомление с мерами ответственности за нарушение правил защиты информации и др.; организацию работы с документами и документированной информацией, включая организацию разработки и использования документов и носителей конфиденциальной информации, их учёт, исполнение, возврат, хранение и уничтожение; организацию использования технических средств сбора, обработки, накопления и хранения конфиденциальной информации; организацию работы по анализу внутренних и внешних угроз конфиденциальной информации и выработке мер по обеспечению её защиты; организацию работы по проведению систематического контроля над работой персонала с конфиденциальной информацией, порядком учёта, хранения и уничтожения документов и технических носителей.

В каждом конкретном случае организационные мероприятия носят специфическую для данной организации форму и содержание, направленные на обеспечение безопасности информации в конкретных условиях: обеспечение защищённого хранения информации на носителях; защита данных, передаваемых по каналам связи; создание резервных копий, послеаварийное восстановление и т. д.

Обеспечение информационной безопасности – это непрерывный процесс, включающий в себя пять ключевых этапов: оценка стоимости, разработка политики безопасности, реализация политики, квалифицированная подготовка специалистов, аудит.

Основные виды оценки: Оценка уязвимых мест на системном уровне. Компьютерные системы исследованы на известные уязвимости и простейшие политики соответствия техническим требованиям.

Оценка на сетевом уровне. Произведена оценка существующей компьютерной сети и информационной инфраструктуры, выявлены зоны риска.

Общая оценка риска в рамках организации. Произведен анализ всей организации с целью выявления угроз для ее информационных активов.

Аудит. Исследованы существующая политика и соответствие организации этой политике.

Испытание на возможность проникновения. Исследована способность организации реагировать на смоделированное проникновение.

При проведении оценки должны быть исследованы такие документы, как: политика безопасности; информационная политика; политика и процедуры резервного копирования; справочное руководство работника или инструкции; процедуры найма-увольнения работников; методология разработки программного обеспечения; методология смены программного обеспечения; телекоммуникационные политики; диаграммы сети.

Получив вышеуказанные политики и процедуры, каждую из них исследуют на предмет значимости, правомерности, завершенности и актуальности, так как политики и процедуры должны соответствовать цели, определенной в документе.

После оценки необходимо заняться разработкой политик и процедур, которые определяют предполагаемое состояние безопасности и перечень необходимых работ. Нет политики – нет плана, на основании которого организация разработает и выполнит эффективную программу ИБП.

Необходимо разработать следующие политики и процедуры:

Информационная политика. Выявляет секретную информацию и способы ее обработки, хранения, передачи и уничтожения.

Политика безопасности. Определяет технические средства управления для различных компьютерных систем.

Политика использования. Обеспечивает политику компании по использованию компьютерных систем.

Политика резервного копирования. Определяет требования к резервным копиям компьютерных систем.

Процедуры управления учетными записями. Определяют действия, выполняемые при добавлении или удалении пользователей.

План на случай чрезвычайных обстоятельств. Обеспечивает действия по восстановлению оборудования компании после стихийных бедствий или инцидентов, произошедших по вине человека.

Последний шаг в процессе реализации информационной безопасности Аудит. Он определяет состояние информационной безопасности внутри организации, создание соответствующих политик и процедур, приведение в действие технических средств контроля и обучение персонала [13].

Обеспечение системы информационной безопасности возможно только при системном и комплексном подходе к защите. Полноценная политика информационной

безопасности подразумевает непрерывный контроль всех важных событий и состояний, влияющих на безопасность данных, и осуществляется круглогодично.

Информационная безопасность системы достигается целым комплексом организационных и технических мер, направленных на защиту корпоративных данных. Организационные меры включают документированные процедуры и правила работы с разными видами информации, IT-сервисами, средствами защиты и т. д. Технические меры заключаются в использовании аппаратных и программных средств контроля доступа, мониторинга утечек, антивирусной защиты, межсетевое экранирование, защиты от электромагнитных излучений и прочее.

Подводя итог, хочу отметить что, в современном обществе для обеспечения максимальной защиты информации необходимо создавать системы информационной безопасности с временными ограничениями, которые в автоматизированном режиме производят выработку управляющих воздействий и команд, поступающий на реальный объект управления. Что позволит осуществлять защиту информационных ресурсов в нужное время в нужном месте, то есть здесь и сейчас.

Литература

1. *Симонов С.* Современные технологии анализа рисков в информационных системах // PCWEEK. – 2001. – № 37.
2. *Грушо А. А., Тимонина, Е.Е.* Ценность информации // Теоретические основы защиты информации. – М.: Издательство Агентства «Яхтмен», 1996. – С. 52–55.
3. *Бармен Скотт.* Разработка правил информационной безопасности. М.: Вильямс, 2002. – 208 с.
4. *Галатенко В. А.* Стандарты информационной безопасности. – М.: Интернет-университет информационных технологий, 2006. – 264 с.
5. *Галицкий А. В., Рябко С. Д., Шаньгин В. Ф.* Защита информации в сети – анализ технологий и синтез решений. М.: ДМК Пресс, 2004. – 616 с.
6. *Лепехин А. Н.* Расследование преступлений против информационной безопасности. Теоретико-правовые и прикладные аспекты. М.: Тесей, 2008. – 176 с.
7. *Запечнико С. В., Милославская Н. Г., Толстой А. И., Ушаков Д.В.* Информационная безопасность открытых систем. Том 1. – М.: Горячая линия – Телеком, 2006. Том 2. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 560 с.
8. *Лопатин В. Н.* Информационная безопасность России: Человек, общество, государство Серия: Безопасность человека и общества. М.: 2000. – 428 с.
9. *Родичев Ю.* Информационная безопасность: Нормативно-правовые аспекты. СПб.: Питер, 2008. – 272 с.
10. *Петренко С. А., Курбатов, В. А.* Политики информационной безопасности. – М.: Компания АйТи, 2006. – 400 с.
11. *Шаньгин В. Ф.* Защита компьютерной информации. Эффективные методы и средства. М.: ДМК Пресс, 2008. – 544 с.
12. *Малюк А. А.* Теория защиты информации. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 184 с.
13. *Щербако А. Ю.* Современная компьютерная безопасность. Теоретические основы. Практические аспекты. – М.: Книжный мир, 2009. – 352 с.

С. Т. Турдумаматов

Институт автоматике и информационных технологий

Национальной академии наук Кыргызской Республики, г.Бишкек

samat.turdumamatov@iaau.edu.kg

РАДИОЛОКАЦИОННАЯ МИКРОПОЛОСКОВАЯ АНТЕННА С ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СТРУКТУРОЙ ЗАПРЕЩЕННОЙ ЗОНЫ

Печатные микрополосковые антенные решетки широко используются в беспроводной связи. Взаимная связь между элементами антенны влияет на свойства антенны, поэтому уменьшение взаимного влияния и улучшения изоляции являются важными задачами для радиолокационных систем. В статье предложено несколько вариантов компактных электромагнитных структур запрещенной зоны (EBG) на основе метаматериалов. Результаты компьютерного моделирования показали, что изоляция между элементами антенны может быть улучшена с помощью предложенных структур электромагнитных запрещенных зон.

Ключевые слова: печатная антенная решетка, электромагнитная структура запрещенной зоны (EBG), метаматериалы, взаимная связь, изоляция, радиолокационная диаграмма.

Введение

Антенна является важным элементом для передачи и приема сигналов. В настоящее время поток передаваемой информации увеличивается, объем передачи информации с помощью кабеля существенно уменьшился, так как во многих устройствах приема-передачи начинают использоваться антенны. Устройство антенн является непростым из-за требований к новым конструкциям, имуществу, качеству и свойствам.

Неправильно разработанная антенна имеет низкую эффективность. Разработано много технологий проектирования антенн, но в настоящее время необходимы компактные и улучшенные антенны, и один из новых типов таких антенн – микрополосковая печатная антенна, имеющая низкую стоимость материала и легка в изготовлении. Первая печатная антенна была изобретена в 1950 году, но широкое распространение она получила после 1970 года [1]. Печатную антенну можно представить в виде металлической пластины, которая напечатана на заземленной подложке. Благодаря возможности изготовления с использованием печатных технологий [2] антенну можно изготовить вручную, что снижает стоимость, к тому же выбор материала также уменьшит цену. Небольшой вес и малые габариты печатной антенны позволят применять ее для целей радиолокации.

Главная проблема печатных антенн – поверхностные волны. Распространение поверхностных волн снижает эффективность антенны из-за увеличения боковых и задних лепестков диаграммы направленности, что уменьшает усиление антенны. В конструкции печатной антенны есть проблема, называемая взаимным сцеплением (взаимовлиянием).

Уменьшения как взаимной связи, так и поверхностных волн можно получить с помощью импедансных поверхностей с запрещенной зоной, или так называемыми электромагнитными структурами запрещенной зоны [3]. Электромагнитные структуры запрещенной зоны представляют собой искусственные периодические объекты, способные подавлять поверхностные волны вследствие фильтрации электромагнитных волн в определенной полосе частот.

В данной работе изучены проектирование и разработка компактных электромагнитных структур запрещенной зоны из метаматериалов. Нами предложены разные формы разных форм разделения кольцевых резонаторов и дополнительных разрезных колец резонаторов [4–6]. С помощью моделирования исследованы поведение и свойства данных структур. Производительность печатной антенной решетки сравнена для двух случаев с электромагнитной структурой запрещенной зоны и без нее.

Метаматериалы – это искусственные материалы с отрицательной диэлектрической и магнитной проницаемостью. Становится популярным использование метаматериалов или метаматериальных структур в системах печатной антенны [4, 5]. Метаматериалы хорошо подавляют распространение нежелательной волны на поверхности печатной антенны. Эта структура имеет хорошую изоляцию антенной решетки, предотвращая их взаимную связь.

Нами изучены различные типы структур запрещенной зоны: спиральные, в виде вилки, с гексагональной формой и грибовидные.

Все антенны предназначены для работы на частоте 5,9 ГГц. Моделирование предлагаемых антенных систем проведено с помощью программного обеспечения FEKO и CST Microwave Studio [7, 8]. Численные результаты, полученные при моделировании, показывают, что разработанные электромагнитные структуры запрещенной зоны расширяют полосу пропускания, одновременно подавляя взаимную связь между антенными элементами.

В первой части статьи рассмотрена концепция построения печатной микрополосковой антенны, печатной антенны с различными типами питания и электромагнитной структурой запрещенной зоны. Во второй части статьи исследована эффективность печатной антенны со структурами запрещенной зоны и без них.

Электромагнитные структуры запрещенной зоны

Структуры запрещенной зоны определяются как периодические ячейки, подавляющие поверхностные волны. Структуры запрещенной зоны представляют собой толстые металлические проводники, которые выглядят как микрополосковая или печатная антенна. Но их типы, формы существенно различаются. Они представлены упорядоченными рядами и столбцами, что показано на рисунке 1. Структуры запрещенной зоны компактны и имеют хорошие возможности для повышения эффективности телекоммуникационных систем [9].

Большинство исследователей классифицируют структуры EBG следующим образом:

- трехмерные объемные структуры;
- плоские поверхности;
- одномерные передающие линии.

Причем структура запрещенной зоны называется фотонной запрещенной зоной, или поверхностью с высоким импедансом [10].

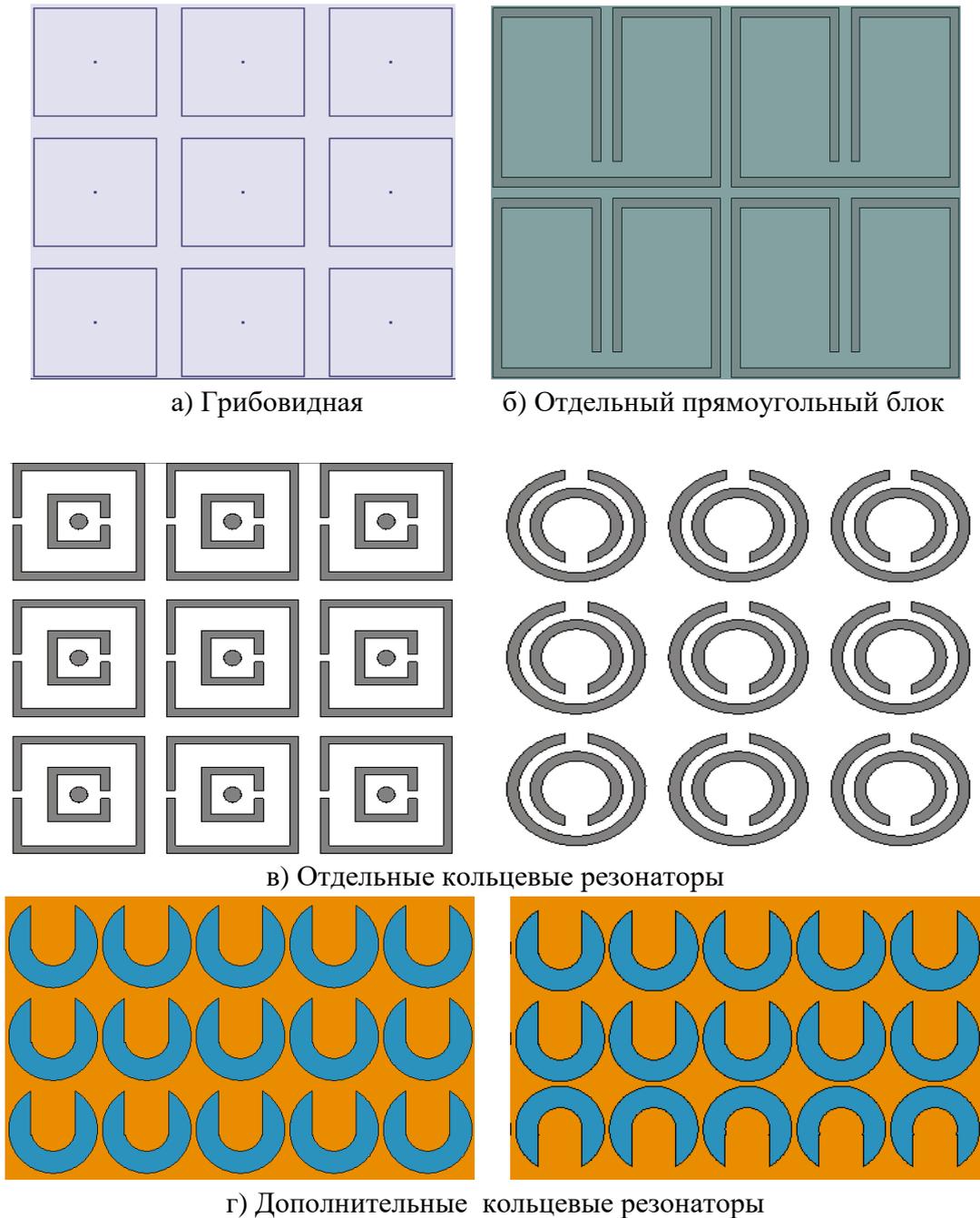


Рисунок 1. Структуры запрещенной зоны

Как уже сказано, развитие технологии беспроводной связи требует компактных, высокоэффективных и портативных устройств, однако в компактном устройстве взаимная связь между элементами антенн увеличивается. Кроме того, уровень шума системы увеличивается и влияет на качество системы. Структуры запрещенной зоны блокируют поверхностные волны (рисунок 2) и улучшают свойства печатной антенной решетки [11].

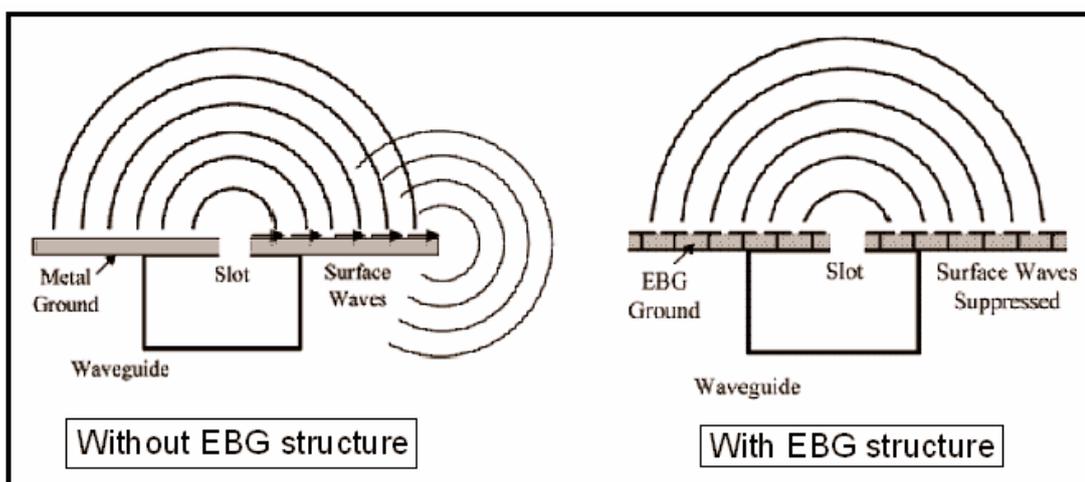


Рисунок 2. Блокирование поверхностных волн с помощью структур запрещенной зоны

Структуры запрещенной зоны могут иметь различную форму и каждая форма будет иметь свой диапазон частот. Для повышения качества необходимо применить параметрическую развертку и итерации. Структуры запрещенной зоны могут быть индуктивными или емкостными. Принцип работы этих структур обсуждается ниже.

Поверхностные волны

Поверхностные волны являются причиной взаимного влияния, что вызывает искажения сканирования в антенных решетках, и излучение антенны происходит в нежелательной области.

Когда коэффициент диэлектрической проницаемости материала $\epsilon_r > 1$, поверхностные волны распространяются на печатной антенне. Процесс таков: волны падают под углом на плоскость земли, затем получают отражение и соответствуют диэлектрической и воздушной границе, где снова происходит отражение. Этот процесс идет до границы, где волны отражаются и дифрагируют по краям, (рис. 3). Если есть еще одна антенная решетка, то поверхностные волны могут удваиваться. Фазовая скорость распространения волны зависит от ϵ_r и h [12], где h – высота диэлектрика.

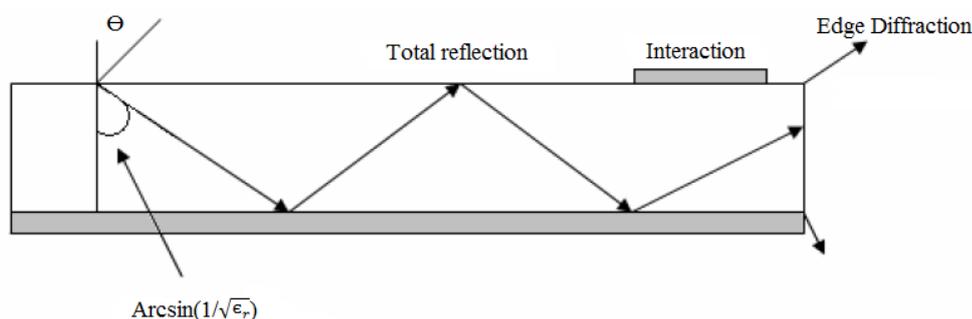


Рисунок 3. Распространение поверхностных волн в диэлектрике решетки

Результаты и обсуждение

Обратные потери и результаты пропускной способности разработанных одиночных и решетчатых антенн, получены с помощью компьютерной программы FEKO. Результаты моделирования антенн отличаются от реальных результатов, поскольку программы учитывают идеальные условия, что выполнить на практике довольно сложно.

Идеальные решения не могут быть получены, так как диэлектрик неоднороден и в материалах по всем направлениям изменяется ϵ , чистота используемых материалов влияет на изменение резонансной частоты.

Сопоставление импеданса

Для получения точных результатов необходимо сопоставление импеданса. Позиция подачи была настроена для обеспечения оптимального соответствия. Конечная позиция подачи находится на расстоянии 2 мм от края печатной антенны.

Входной импеданс приведен на рис. 4, который иллюстрирует, что на резонансной частоте мнимая часть импеданса близка к нулю, а действительная часть составляет почти 50 Ом.

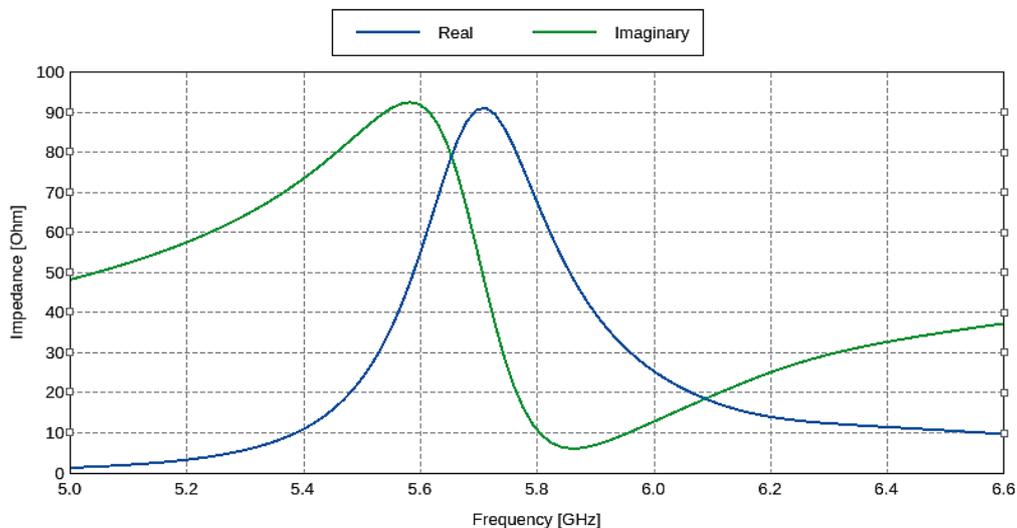


Рисунок 4. Входное сопротивление антенны

Антенная решетка со структурой запрещенной зоны

Параметры одной ячейки со структурой запрещенной зоны: $R_0=3,6$ мм, $R_i=1,8$ мм и $C_w=3,6$ мм, как показано на рис. 5.

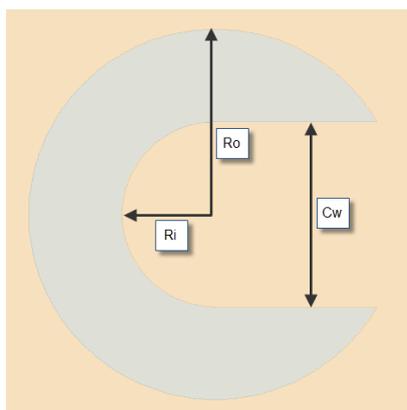
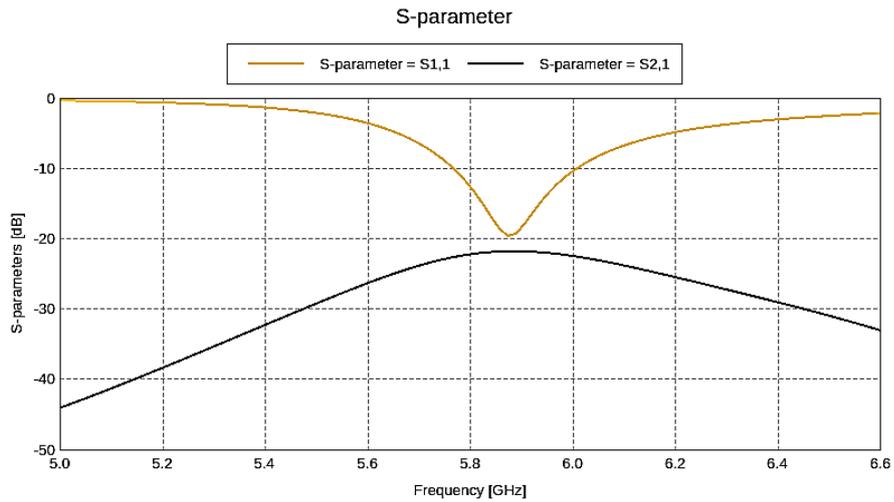
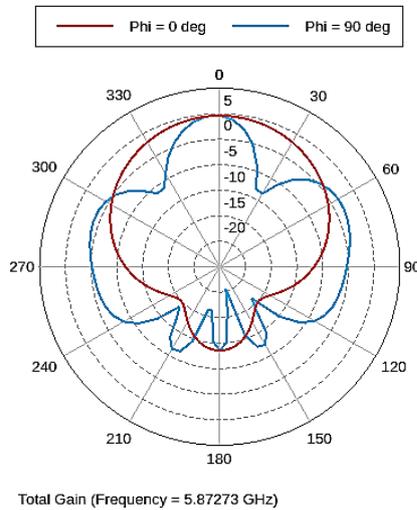


Рисунок 5. Параметры одной ячейки

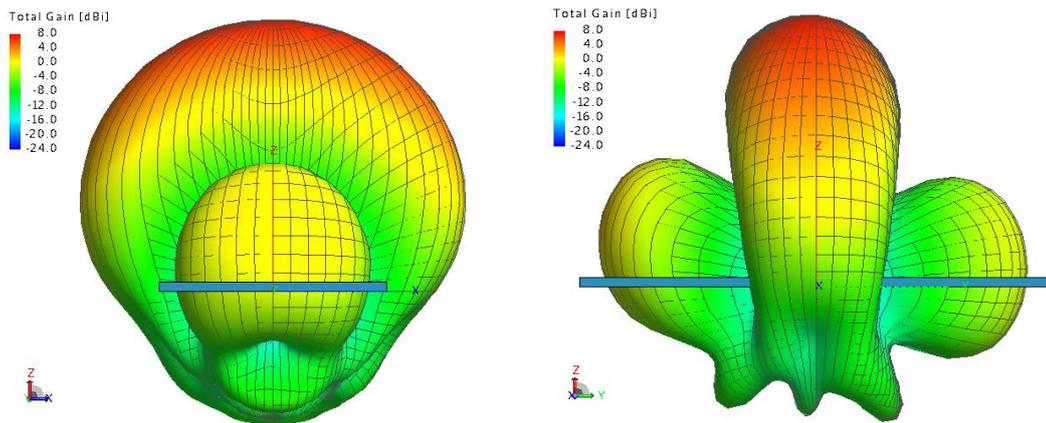
Возвратные потери антенной решетки без структуры запрещенной зоны составляют -20 дБ, а взаимная связь составляет $-21,75$ дБ на частоте 5,87 ГГц (рис. 6 а).



а) Обратные потери и взаимная связь



б) Усиление



в) Радиолокационная диаграмма

Рисунок 6. Численные результаты антенной решетки без структуры запрещенной зоны

Для антенной решетки со структурой запрещенной зоны на рис. 7 показаны обратные потери, взаимная связь, усиление, диаграмма направленности дальнего поля и токи на поверхности антенны показаны на рис. 8.

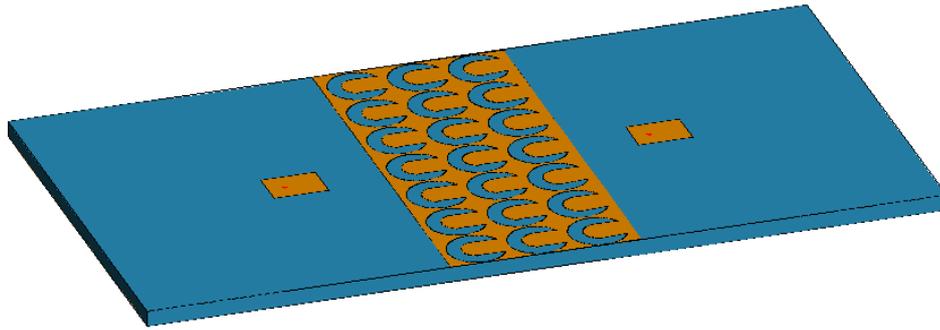
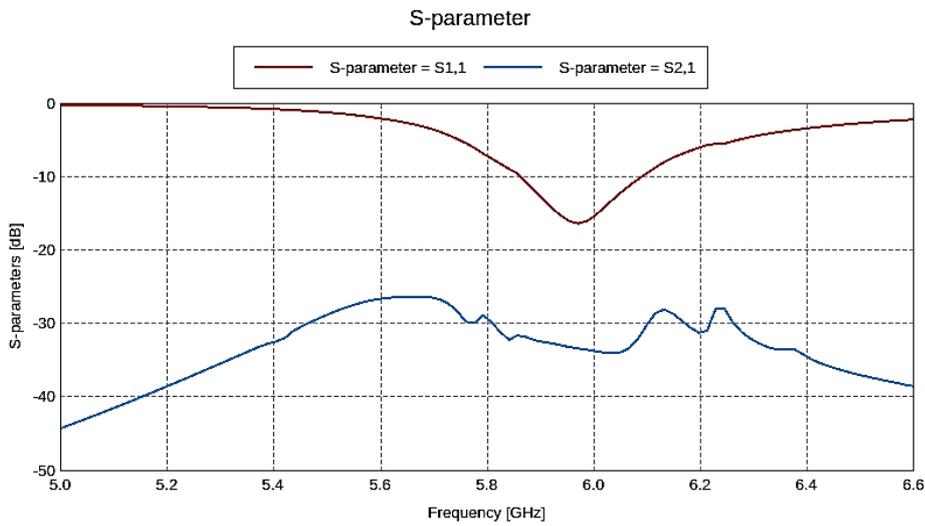
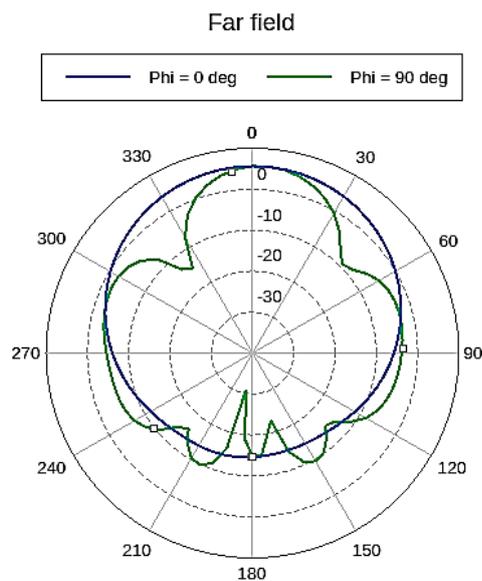


Рисунок 7. Антенная решетка со структурой запрещенной зоны

После вставки структуры запрещенной зоны резонансная частота слегка сдвигалась до 5,97 ГГц, но взаимная связь была увеличена до -35 дБ и уменьшена на 13,25 дБ, чем в антенной решетке без структуры запрещенной зоны. Это означает, что произошло значительное сокращение (рис. 8 а).

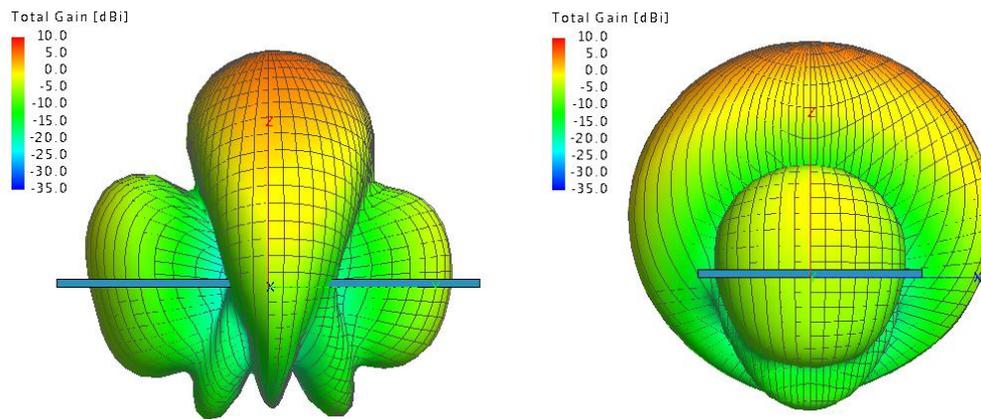


а) Обратные потери и взаимная связь

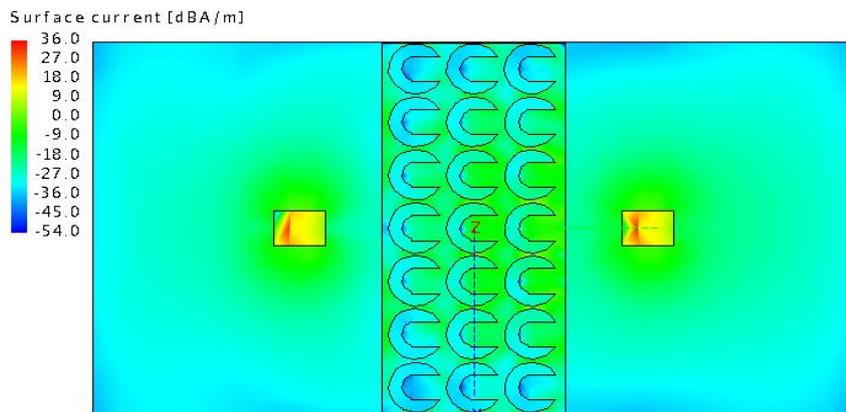


Total Gain (Frequency = 5.87273 GHz)

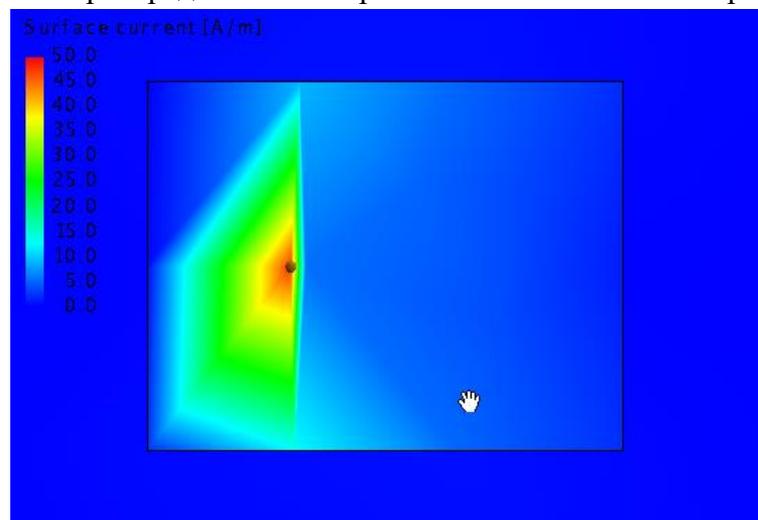
б) Усиление



в) Радиолокационная диаграмма



г) Снимок распределения поверхностного тока антенной решетки



д) Снимок распределения поверхностного тока на одной антенне

Рисунок 8. Численные результаты моделирования антенной решетки со структурой запрещенной зоны

Для антенной решетки с перестроенной структурой запрещенной зоны на рис. 9 показаны обратные потери, взаимная связь, усиление, диаграмма направленности дальнего поля и токи на поверхности антенны приведены на рис. 10.

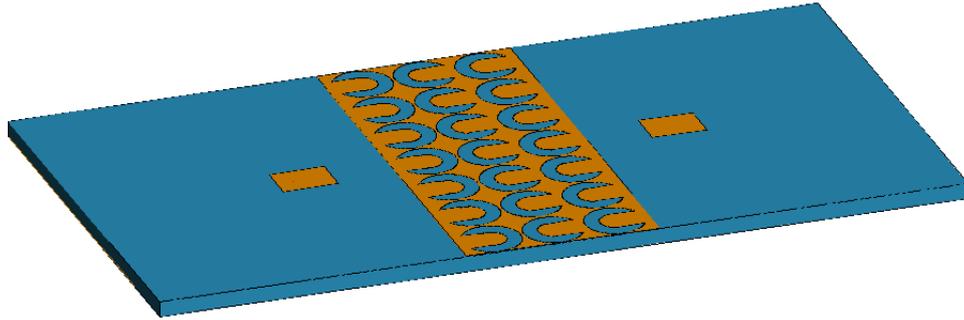
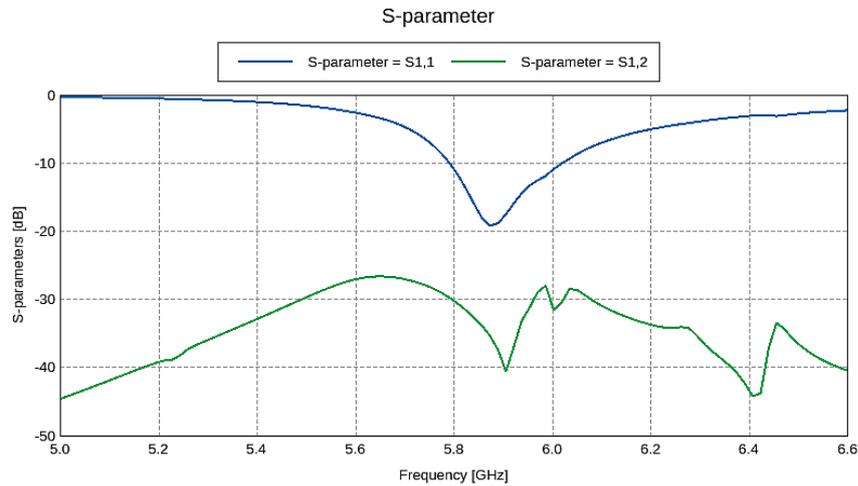
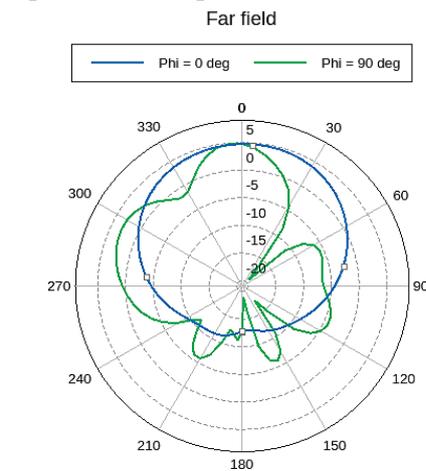


Рисунок 9. Антенная решетка с перестроенной структурой запрещенной зоны

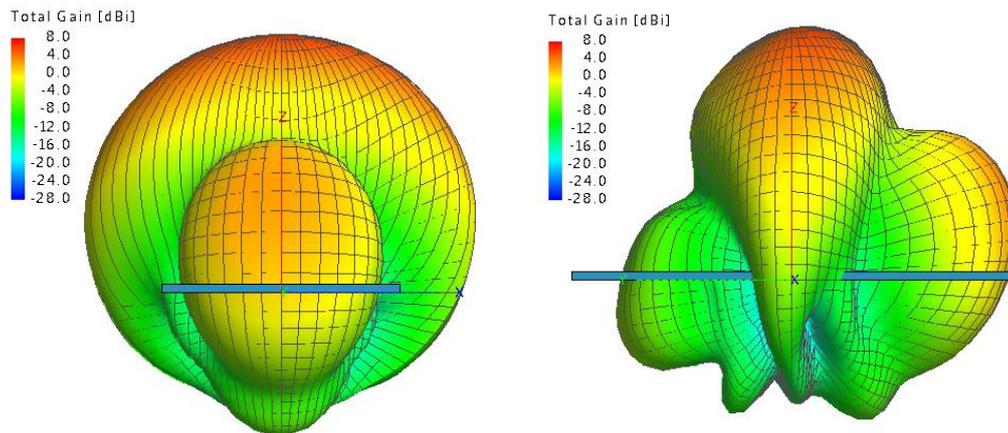
Численные результаты моделирования антенной решетки с перестроенной структурой запрещенной зоны следующие: взаимная связь произошла в -41 дБ со смещением частоты до $5,9$ ГГц, но достигнуто снижение потерь до $19,25$ дБ. Получено существенное уменьшение взаимной связи (рис. 8 а), по сравнению с антенной решеткой с нормальной (не перестроенной) структурой запрещенной зоны.



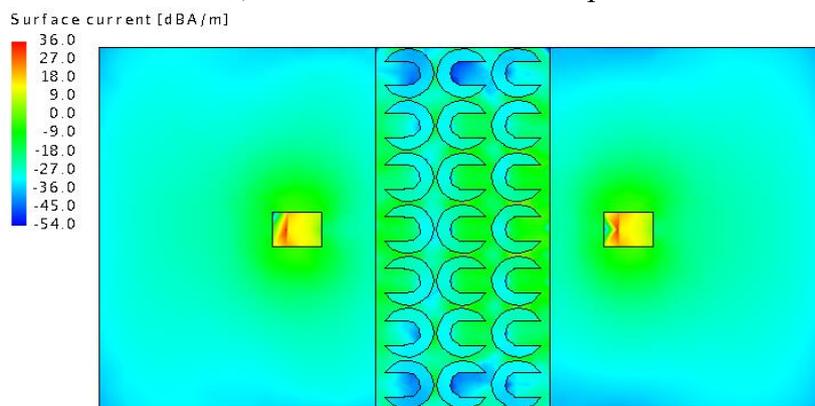
а) Возвратные потери и взаимная связь



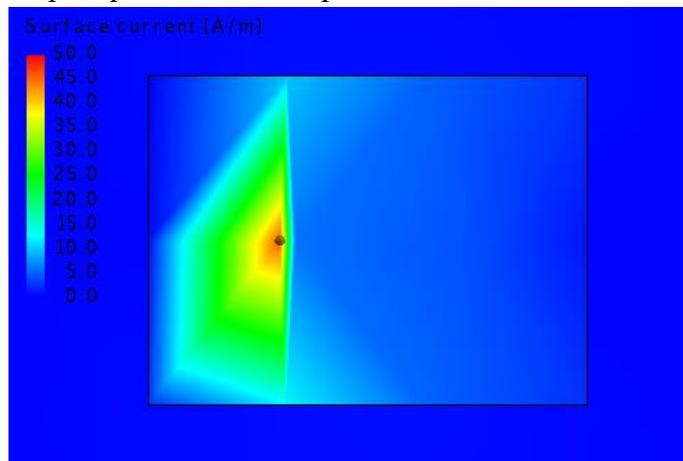
б) Усиление



в) Радиолокационная диаграмма



г) Снимок распределения поверхностного тока антенной решетки



д) Снимок распределения поверхностного тока на одной антенне

Рисунок 10. Численные результаты моделирования антенной решетки с перестроенной структурой запрещенной зоны

Таким образом, проанализированы характеристики антенны с метаматериальной структурой запрещенной зоны. При этом было отмечено увеличение пропускной способности традиционной антенны. Исследованы обратные потери, взаимная связь, резонансная частота и ширина полосы пропускания. Выяснено, что взаимная связь антенной решетки со структурой запрещенной зоны выше по сравнению с антенной без структуры запрещенной зоны, полоса пропускания для антенной решетки со структурой

запрещенной зоны шире. Следовательно, параметры структур запрещенной зоны могут быть подобраны для улучшения характеристик антенн.

Литература

1. Pozar D.M. (1992). Microstrip antennas, *Proc. IEEE*, 80, 79–91.
2. Howell J. (1972). Microstrip antennas, *Antennas and Propagation Society International Symposium*, 10, 177–180.
3. Turdumamatov S., Ogucu G. (2014). Metamaterial-Inspired Electromagnetic Band Gap Structure for Isolation Improvement of Microstrip Patch Antenna, *Second International Conference on Advances in Computing, Electronics and Communication (ACEC)*, 147 – 150.
4. Kafesaki M., Koschny Th., Penciu R. S., Gundogdu T. F., Economou E. N., Soukoulis C.M. (2005). Left-handed metamaterials: detailed numerical studies of the transmission properties. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 7, 12–22.
5. Falcone F., Lopetegi T., Baena J.D., Marques R., Martin F., Sorolla M. (2004). Effective negative-epsilon stopband microstrip lines based on complementary split ring resonators. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 14, 280–282.
6. Ferran Martin, Jordi Bonache. (2014). Application of RF-MEMS-Based Split Ring Resonators (SRRs) to the Implementation of Reconfigurable Stopband Filters: A Review. *Sensors*, 14, 22848–22863
7. FEKO - EM Simulation Software. (2017). <https://www.feko.info>
8. CST-Computer Simulation Technology. (2017). <https://www.cst.com>
9. Chen P., Yang X., Chen C., Zhao Y. (2014). A Novel Uni-Planar Compact EBG Structure. *Progress in Electromagnetics Research Letters*, 45, 31–34.
10. Qian Y., Coccioli R., Sievenpiper D., Radisic V. (1999). A microstrip patch antenna using novel photonic band-gap structures. *Microwave Journal*, 42, 66–76.
11. Yang F. (2002). Applications of Electromagnetic Band-Gap (EBG) Structures in Microwave Antenna Designs. *Invited presentation at Tampere University of Technology*.
12. Balanis C.A. (2005). *Antenna Theory: Analysis and Design*. 2nd Ed. New York: John Wiley and Sons.

И.В. Брякин, С.Т. Турдумаматов

Институт автоматизации и информационных технологий Национальной академии наук Кыргызской Республики, г.Бишкек

bivas2006@yandex.com, samat.turdumamatov@iaau.edu.kg

МЕТОД НЕЛИНЕЙНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ РАДИОЛОКАЦИИ ДЛЯ МАЛОГЛУБИННОЙ ГЕОФИЗИКИ

Рассматриваются особенности применения нелинейной и параметрической локации при решении задач малоуглубинной геофизики. Обосновывается новый способ нелинейно-параметрической радиолокации, основанный на использовании в качестве зондирующего и возбуждающего воздействий соответственно переменного и постоянного электрических полей. Предлагается за счет резонансной генерации связанных магнитоупругих волн возбуждать дополнительно нелинейные волны различного вида, включая и периодические нелинейные волны.

Ключевые слова: композиционный материал, магнитное и электрическое поля, модулятор, магнитоэлектрический и электродинамический эффекты, способ возбуждения, спиновый конденсатор, феррит, феррозонд.

В настоящее время, в связи с необходимостью обеспечения экономической рентабельности последующей добычи минерального сырья в области геологического изучения недр, применяемые современные геологические исследования носят за некоторым небольшим исключением малоуглубинный характер [1].

Одними из главных особенностей малых глубин являются разнообразие и быстрая изменчивость свойств геологической среды. К геофизическим исследованиям здесь предъявляются высокие требования по разрешающей способности и детальности наблюдений. Для того чтобы наиболее полно и качественно выполнить поставленные геологические задачи, необходимо повышать информативность геофизических исследований за счет разнообразия состава и увеличения объема работ.

Кроме того, во многих других областях деятельности человека, связанных с археологией, строительством и эксплуатацией подземных коммуникаций, борьбой с терроризмом, гуманитарным разминированием и т.п., возникает не менее острая необходимость поиска различных объектов в толще укрывающих сред [2]. При этом существующие средства поиска зачастую не способны обеспечить глубину поиска, соответствующую уровню заглупления объекта поиска, что непосредственно связано с существованием сравнительно больших удельных потерь при прохождении электромагнитных волн через различные слои укрывающей среды: грунты различного состава и влажности (поиск террористических тайников с оружием, террористических взрывных устройств); пресная и морская вода (поиск неразорвавшихся боеприпасов, железных контейнеров и бочек с химическими веществами); растительность (поиск холодного и огнестрельного оружия, например, в криминалистике); снег и лед; строительные материалы (кирпичи, бетон и т.д.).

Следует отметить, что интенсификация строительного освоения городской территории, уплотнение застройки в центральной части города, строительство зданий повышенной этажности, широкое использование подземного пространства, планируемое расширение и освоение городской территории также требует детального изучения состояния геологической среды, выявления опасных проявлений эндогенных и экзогенных геологических процессов.

Известно, что геологическая среда в подземной части территории города, имея изначально сложную природную обстановку, подвергается интенсивному техногенному

влиянию, при котором природные геохимические и геодинамические процессы резко ускоряются. Поэтому существует реальная угроза проявления непредсказуемых катастрофических процессов.

Исходя из этого, очевидно, что от достоверности геологической информации и категории сложности инженерно-геологических условий напрямую зависят степень благоприятности и сроки освоения территории, ее инвестиционная привлекательность, а также надежность эксплуатации как отдельного объекта капитального строительства, так и территории в целом. Существующие геофизические методы исследований характеризуются высокой производительностью и относительно низкой стоимостью, что дает основание прогнозировать в ближайшей перспективе устойчивое повышение спроса на них. Исходя из этого, можно предполагать и соответствующую востребованность малоуглубинных геофизических работ как в горно-геологической отрасли, так и в сфере инженерных изысканий.

Проведенный анализ существующей ситуации говорит, прежде всего, о необходимости обеспечения высокой оперативности получения достоверных данных различными методами исследований и соответствующей экономичности технического оборудования, что в итоге позволит избежать принятия неадекватных решений, связанных с антропогенной нагрузкой на геологическую среду, либо с чрезмерной защитой природной среды.

В связи с этим достаточно актуальным направлением является повышение эффективности малоуглубинных геофизических исследований за счет разработки недорогой универсальной измерительной аппаратуры, применения новых технологий обработки данных и использования оптимального комплекса геофизических методов.

В основе большинства известных методов малоуглубинных геофизических исследований лежит изучение электрических свойств (электрической проводимости σ , диэлектрической проницаемости ϵ и магнитной проницаемости μ) верхнего слоя земли (осадочных пород) осваиваемых территорий [3]. Особенностью верхнего слоя земли (осадочных пород) является слоистость, причем отдельные слои различаются по своим физическим свойствам.

Типичными осадочными породами являются: песок, глина, галечник, суглинок, известняк, мел и др. Эти породы пористы и в естественных условиях содержат определенное количество воды, которая просачивается вглубь земли особенно легко там, где поверхностные слои сложены из водопроницаемых пород (песка, щебня, гальки и т.д.). Вода продвигается до первого водонепроницаемого слоя (глина, сланцы и т.п.). На границах этих слоев атмосферные воды задерживаются и, скапливаясь в пустотах верхних слоев, образуют грунтовые воды. Степень влажности осадочных пород является одним из факторов, существенно определяющих их электрические характеристики

Твердая фаза осадочных пород, представляющих собой гетерогенную полидисперсную систему, состоит из минеральных, органических и органических частиц разного размера – от молекул до крупных механических элементов – ила, пыли, песка и камней (рис. 1).

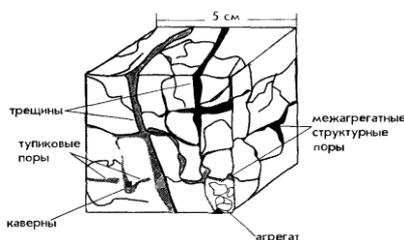


Рисунок 1. Структура гетерогенной полидисперсной системы

Особенности структуры и состава основных компонентов гетерогенной полидисперсной систем представлены на рис.2.

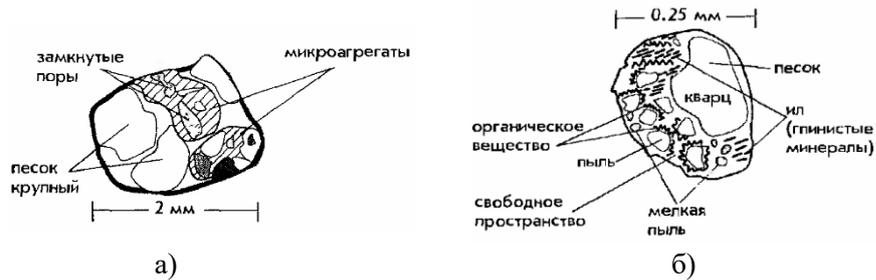


Рисунок 2. Структуры основных компонентов гетерогенной полидисперсной системы:
а – агрегат ($> 0,25$ мм); б – микроагрегат ($< 0,25$ мм)

Подобная геофизическая среда представляет собой гетерогенную многофазную систему с широким набором неоднородностей, взаимодействующую с зондирующим электромагнитным полем. В этом случае ее электрические свойства можно рассматривать с точки зрения взаимодействия данной среды и электромагнитных волн с использованием теории распространения радиоволн над импедансными структурами. Исходя из этого, в качестве модели такой среды можно взять модель физического объекта (ФО) с пространственно распределенными структурными элементами, функциональные связи между которыми реализуются на основе четырех групп физических эффектов (ФЭ): 1 – ФЭ-проводники; 2 – ФЭ-модификаторы; 3 – ФЭ-преобразователи энергии; 4 – ФЭ-преобразователи ФО [4].

Рассмотрим особенности каждой из перечисленных групп ФЭ применительно к рассматриваемой модели ФО:

- первая группа – ФЭ, связанные с проводимостью определенного вида энергии и используемые для обеспечения взаимосвязей между структурными элементами, на которых проявляются ФЭ-преобразователи. Эффекты проводимости могут проявляться на различных иерархических уровнях физических объектов, а эффекты проводимости с дополнительными воздействиями могут быть использованы для управления проявлением ФЭ-преобразователей и усиления преобразуемых воздействий (входных параметров ФО);

- вторая группа – ФЭ, связанные с модификацией результата воздействия по отношению к воздействию без преобразования одного вида энергии в другой и используемые для согласования результата воздействия и воздействия у двух взаимосвязанных ФЭ. При этом результат воздействия и само воздействие являются разновидностями одного физического поля и различаются лишь характеристиками. Кроме того, они могут использоваться для модификации характеристики результата воздействия у конечного ФЭ в цепочке преобразований или характеристики воздействия у первого ФЭ;

- третья группа – ФЭ, связанные с преобразованием одного вида энергии в другой. Следует отметить, что в природе не может быть физического поля, которое не имело бы взаимосвязей с другими полями посредством ФЭ. Несмотря на небольшое число известных в настоящее время видов энергии, данная группа ФЭ довольно многочисленна, что определяется большим количеством модификаций эффектов. Поэтому ФЭ этой группы являются наиболее сложными по своей физической структуре. Проявление ФЭ, обеспечивающих преобразование одних физических полей в другие, обуславливается наличием в составе физических объектов двух типов структурных элементов: структурных элементов, взаимодействующих с внешним воздействием, и структурных элементов, обладающих физическим полем, соответствующим результату воздействия. Преобразования как такового одного физического поля в другое не происходит, а осуществляется лишь передача энергии одного физического поля через соответствующие структурные элементы

другим структурным элементам-носителям другого физического поля, т.е. фактически происходят изменения во взаимосвязях между структурными элементами;

- четвертая группа – ФЭ, связанные с преобразованием ФО, которое может проявляться в следующем: 1 – изменение физических свойств (прозрачность, текучесть, температура, намагниченность и т. д.); 2 – изменение структуры (кристаллизация, переход от одной кристаллической структуры к другой, преобразование одних химических соединений в другие и т. п.); 3 – изменение агрегатного состояния (плавление, конденсация, сублимация, испарение и т. д.); 4 – изменение состава структурных элементов (деление и синтез молекул, атомов, ядер атомов и др.); 4 – изменение ФО может быть дискретным (замена одного ФО на другой) и непрерывным (изменение концентрации растворов, давления газов, состава газов и т. п.).

Следует отметить, что изменение свойств ФО влияет, в свою очередь, на проявление других ФЭ на этом же ФО.

Кроме того, известно, что модель любого ФЭ характеризует прежде всего зависимость результата воздействия (эффекта) от самого воздействия и должна удовлетворять следующим требованиям: 1 – отражать условия взаимосвязи ФЭ друг с другом; 2 – давать количественную характеристику проявления ФЭ; 3 – обеспечивать описание процесса проявления ФЭ во времени: переходные процессы (наложение воздействия, снятие воздействия) и установившийся процесс; 4 – быть пригодной для использования в инженерной практике, в частности при проектировании; 5 – обеспечивать определение результатов воздействий при заданных воздействиях, значениях варьируемых параметров физического объекта, временных характеристик [4].

Исходя из этого, в общем случае модель ФЭ можно представить в следующем виде:

$$c_i = F(A_{\text{осн}}, A_{\text{доп}}, \{b_1, b_2, \dots, b_n\}, t),$$

где $A_{\text{осн}}$, $A_{\text{доп}}$ – параметры основного и дополнительного воздействий; $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$ – кортеж параметров физического объекта B ; c_i – параметры i -го результата воздействия; t – время, характеризующее проявление ФЭ.

В рассматриваемом случае под основным воздействием на ФО понимается такое воздействие, результат от которого представляет другое, отличное от воздействия, физическое поле, а под дополнительным воздействием – такое, которое приводит лишь к количественному изменению результата, получаемого от основного воздействия. Дополнительными воздействиями могут являться постоянно действующие воздействия, например гравитационное и тепловое поля, а также воздействия, оказываемые объектами окружающей среды.

Модель ФЭ позволяет представить обобщенную схему ФЭ (рис. 3).

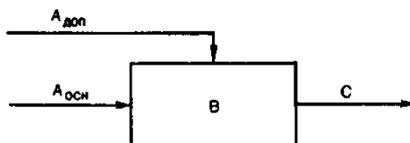


Рисунок 3. Обобщенная схема ФЭ

В настоящее время для многих ФЭ не известны строгие математические зависимости между воздействием и результатом воздействия. В этом случае следует использовать эмпирические зависимости, либо экспериментальные данные.

Для определения различных c_i необходимо использовать разные модели ФЭ. При этом изменяемыми параметрами модели будут кортежи варьируемых параметров объекта B .

Модель ФЭ может изменяться при переходе от одного класса объектов на другой. Изменение также будет связано с изменением кортежа $\{b_1, b_2, \dots, b_n\}$.

Из модели ФЭ следует, что результат воздействия c_i зависит от веществ и материалов, из которых состоит рассматриваемый ФО.

Как указывалось ранее, ФО в большинстве случаев представляют собой сложные иерархические системы, характеризующиеся множеством структурных элементов и связей между ними. Поэтому функционирование таких объектов основывается на проявлении множества взаимосвязанных ФЭ.

Существуют следующие условия взаимосвязи ФЭ [4]:

1. $C_n \cap A_{n+1}$, где $C_n = \{c_i\}_{i \in I}$ – множество результатов воздействия n -го ФЭ, I – число номеров наименований результатов воздействия n -го ФЭ; $A_{n+1} = \{a_j\}_{j \in J}$ – множество воздействий $(n+1)$ -го ФЭ, J – число номеров наименований воздействий $(n+1)$ -го ФЭ.

При этом должно выполняться следующее условие:

$$d_{c_i}^{\gamma_i} \cap d_{a_j}^{\lambda_j} \neq 0,$$

где $d_{c_i}^{\gamma_i}$ – значение результата воздействия c_i n -го ФЭ; $d_{a_j}^{\lambda_j}$ – значение воздействия a_j $(n+1)$ -го ФЭ; γ_i – множество номеров материалов, на которых проявляется c_i результатов воздействия; λ_j – множество номеров материалов, на которые оказывается воздействие a_j .

2. $\{b_1, b_2, \dots, b_k\}_{\Phi \mathcal{E}_n} \cap \{b_1, b_2, \dots, b_p\}_{\Phi \mathcal{E}_p}$, где $\{b_1, b_2, \dots, b_k\}$ – множество параметров объекта, на котором проявляется ФЭ _{n} ; $\{b_1, b_2, \dots, b_p\}$ – множество параметров того же объекта, на котором проявляется ФЭ _{p} .

В этом случае изменение параметров, входящих в область пересечения, должно влиять на проявление хотя бы одного c_i для ФЭ _{n} или ФЭ _{p} .

Ввиду различия моделей у ФЭ _{n} и ФЭ _{p} кортежи параметров, входящих в эти модели, будут различаться. Принимая во внимание, что ФЭ, как правило, имеют несколько c_i и могут зависеть от ряда $A_{\text{доп}}$ можно использовать соответствующие варианты построения сложных структур взаимосвязанных ФЭ, обеспечивающих реализацию ФО с несколькими входами и выходами, с обратными связями, с использованием комплексов ФЭ для реализации часто встречающихся функций. Совокупность таких ФЭ фактически является физической схемой объекта (ФСО), которая дает представление о том, какие заданные входные параметры ФО преобразуются в ожидаемые выходные параметры.

В связи с тем, что элементами ФСО являются структурные составляющие ФО, на которых проявляются ФЭ, то взаимосвязи между элементами ФСО будут характеризовать типы преобразований физических величин. При этом само преобразование заданного воздействия в ожидаемый конечный результат будет являться рабочей функцией ФО.

В этом случае под результатами воздействия понимаются те эффекты, которые проявляются на ФО или в окружающем их пространстве. Результатами воздействия являются те же физические поля, которые относятся к воздействиям, что, в конечном счете, и обуславливает взаимосвязь между ФЭ.

Одним из основных вопросов, который требует особого внимания, является учет основных четырех закономерностей проявления результатов воздействий: 1 – при одном воздействии на объект может проявляться несколько различных результатов воздействия одновременно, количество которых зависит от структуры физического объект; 2 – величина результата воздействия может регулироваться; 3 – при постоянстве условий воздействия и свойств физического объекта проявляются одни и те же результаты воздействия, одни и те же значения их параметров, что обуславливается стабильностью структуры ФО, на который оказывается воздействие, и стабильностью свойств элементов его структуры; 4 – инерция в появлении результата воздействия и в его проявлении,

которая определяется невозможностью мгновенной передачи действия одного тела на другое (постулат Максвелла) и связана с теми процессами, которые происходят при энергообмене между структурными элементами ФО.

Известно, что разнообразие процессов и явлений, которые происходят в природе, обусловлено, по современным данным, четырьмя типами взаимодействий: всемирным тяготением, электромагнитными, ядерными и слабыми взаимодействиями. Причем каждому типу взаимодействия соответствуют определенные физические поля, каждое из которых, в свою очередь, имеет ряд модификаций или характеристик, обуславливающих особенности взаимодействия материальных объектов. Так, например, электрическое поле может быть статическим, переменным, вихревым и т. д. Все это в целом и создает необходимые условия для проявления большого количества разнообразных ФЭ.

Обобщая, можно констатировать, что в рассматриваемом типе ФО особое место занимают межэлементные контактные явления, которые проявляются сложными дополнительными контактными структурами (КС), обладающими омическими свойствами.

В КС картина переноса носителей заряда отличается повышенной сложностью. Известно, что проводимость контактирующих сред может быть: металлической, полупроводниковой (квазиметаллической), холодной эмиссии, термоэмиссии, газового разряда, электрохимической, термо-э.д.с. и др.

Все перечисленные виды проводимостей (в зависимости от внешних и внутренних условий) в той или иной степени участвуют в формировании свойств КС.

При этом подобные КС, как правило, не обладают свойствами линейности и заметно искажают переизлученный сигнал. Контролируя омические КС по уровню нелинейности, можно выявить и идентифицировать ряд пространственно распределенных структурных элементов ФО, связанных между собой большим числом дополнительных КС.

Сложная и многообразная картина физики контактных явлений может быть раскрыта путем измерений нелинейных искажений специальных испытательных сигналов, используемых в процессе сканирования ФО.

Сущность способа контроля нелинейности, применяемого для идентификации пространственно распределенных структурных пассивных элементов (СПЭ), основана на свойстве нелинейности передаточной характеристики условного ФО создавать, кроме основного сигнала, еще и побочные физические факторы [5].

Известно, что если статическая функция преобразования (СФП) выражается степенным рядом входного напряжения

$$U_{\text{вых}} = a_1 U_{\text{вх}} + a_2 U_{\text{вх}}^2 + a_3 U_{\text{вх}}^3 + \dots,$$

то, воздействуя на передаточную характеристику синусоидальным сигналом $U_{\text{вх}} = E \sin \omega t$, можно получить основной сигнал с частотой ω , гармоники 2ω , 3ω , ... и постоянную составляющую A_0 :

$$U_{\text{вых}} = A_0 + A_1 \sin \omega t + A_2 \sin 2\omega t + A_3 \sin 3\omega t + \dots$$

Измеряя постоянную составляющую гармоник или суммарную мощность результатов искажения, можно получить представление о передаточной характеристике ФО.

В случае воздействия двухчастотным сигналом на передаточную характеристику ФО мы получим, кроме основных частот ω_1 и ω_2 дополнительные колебания, которые будут гармониками основных частот (комбинационными продуктами различных порядков), а также постоянную составляющую:

$$U_{\text{вых}} = A_0 + A_1 \sin \omega_1 t + A_2 \sin \omega_2 t + A_3 \sin 2\omega_1 t + A_4 \sin 2\omega_2 t + A_5 \sin 3\omega_1 t + A_6 \sin 3\omega_2 t + A_7 \sin(\omega_1 - \omega_2)t + A_8 \sin(\omega_1 + \omega_2)t + A_9 \sin 2(\omega_1 - \omega_2)t + A_{10} \sin 2(\omega_1 + \omega_2)t + \dots$$

Можно также воздействовать на нелинейный ФО широкополосным «белым шумом». По измерениям в узкой полосе, свободной от зондирующего сигнала, мощности переизлученного сигнала определяют степень нелинейности передаточной характеристики ФО. Измерения, проводимые таким способом, будут наиболее достоверными, т.к. они отражают все свойства нелинейного ФО (амплитудно-частотные, фазовые и другие соотношения).

Иными словами, если через КС, обладающую нелинейной вольт-амперной характеристикой, условно пропускать синусоидальный ток (ток Фуко), то вторичное электромагнитное поле, которое переизлучится данной КС, будет содержать гармонические составляющие основной частоты. Можно рассматривать только одну из всех гармоник, поскольку каждая из них является мерой нелинейности. Предлагается использовать третью гармонику, поскольку она при симметричной вольт-амперной характеристике нелинейного КС имеет наибольшую величину. Если увеличивается ток, то соответственно увеличивается плотность тока через КС и напряжение третьей гармоники будет возрастать пропорционально размерам КС.

Измеряя селективно напряжение третьей гармоники, можно подсчитать уровень нелинейности вольт-амперной характеристики КС и тем самым идентифицировать структурные компоненты (СК) ФО.

Обобщая, можно констатировать, что, зная уровень нелинейности того или иного возможного КС ФО в момент сканирования, существует возможность определения наличия конкретных СК в исследуемом ФО. Для этого необходимо выбрать критический уровень нелинейности, характерный для данного класса СК, и на основании этого осуществлять их идентификацию в процессе реализации исследовательских работ.

Как уже отмечалось выше, идентификация СК ФО осуществляется по степени отклонения вольт-амперных характеристик соответствующих КС от омических. Поэтому целесообразно рассматривать преобразование спектра испытательного сигнала на КС и производить идентификацию СК по их нелинейным искажениям.

Считая, что КС в ФО обладают как бы свойствами нелинейного резистора, при анализе частотных спектров можно пренебречь переходными процессами на СК.

В этом случае вольт-амперную характеристику ФО с учетом КС в общем случае можно определить как

$$i_{неф}(t) = i[\psi(t)]. \quad (1)$$

В качестве примера рассмотрим воздействие гармонического сигнала вида

$$v(t) = v_0 \cos(\Omega t + \psi) \quad (2)$$

на линейную безынерционную цепь.

Для этой цели разложим $i[\psi(t)]$ по степеням $\psi(t)$ в точке $v=0$. В этом случае

$$i_{неф}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} b_n v_n(t), \text{ где } b_n = \left. \frac{\partial^n i(t)}{\partial v^n(t)} \right|_{v(t)=0}. \quad (3)$$

Используя соотношение Эйлера, можем записать:

$$v(t) = \frac{1}{2} v_0 [e^{j(\Omega t + \psi)} + e^{-j(\Omega t + \psi)}].$$

Тогда выражение (3) может быть представлено в виде:

$$i_{неф}(t) = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{k=0}^n \frac{1}{2^n} b_n v_0^n e^{j(\Omega t + \psi)(n-2k)} C_n^k, \text{ где } C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (4)$$

Положим $(n-2k)=\alpha$, тогда выражение (4) принимает вид:

$$i_{неф}(t) = \frac{1}{2} h_0 + \sum_{\alpha=1}^{\infty} h_{\alpha} \cos \alpha(\Omega t + \psi), \text{ где } h_{\alpha} = \sum_{n \geq \alpha} \frac{v_0^n}{2^{n-1}} b_n C_0^{\frac{n-\alpha}{2}} \cos^2 \left[\frac{\pi(n+\alpha)}{2} \right]. \quad (5)$$

При расчете коэффициентов h_m для вычислений $C_n^{\frac{n-\alpha}{2}}$ может быть использована формула Стирлинга

$$n! \approx n^{n-\frac{1}{2}} e^{-n} \sqrt{2\pi} \left(1 + \frac{1}{12n} + \frac{1}{288n^2} + \dots \right), \quad (6)$$

$$C_n^{\frac{n-\alpha}{2}} \approx \frac{\sqrt{2\pi} n^n \left(1 + \frac{1}{12n} \right) 2^{\frac{n-\alpha}{2}}}{\alpha^n (n-\alpha)^{\frac{n-\alpha}{2}} \left(1 + \frac{1}{12\alpha} + \frac{1}{6(n-\alpha)} \right)}. \quad (7)$$

Полученные выражения (5), (6) и (7) свидетельствуют о том, что при воздействии гармонического колебания на нелинейную безынерционную цепь выходной сигнал представляет собой неэлементарную периодическую функцию, составляющими которой являются ее гармоники, причем номер самой высокой гармоники совпадает с наибольшим показателем степени полинома.

Наблюдается следующая закономерность: все четные гармоники выходного сигнала обусловлены наличием в полиноме членов с четными степенями, а все нечетные – наличием членов полинома с нечетными степенями.

При малых значениях амплитуды v_0 испытательного сигнала можно пренебречь членами ряда, содержащих v_0 в степени m , тогда приближенное значение амплитуды гармоники с номером m равно:

$$h_m \approx \frac{1}{2^{m-1}} b_m v_0^m$$

Очевидно, что при этом амплитуда m -й гармоники пропорциональна m -й степени амплитуды испытательного сигнала.

При воздействии на КС испытательного сигнала в результате нелинейного преобразования кроме гармонических составляющих сигнала всегда появляются дополнительные спектральные составляющие, вследствие чего форма сигнала на выходе искажается. Для количественной оценки нелинейных искажений используют различные критерии-коэффициенты.

Иногда коэффициент нелинейных искажений определяют как отношение корня квадратного из суммы квадратов амплитуд всех паразитных гармоник преобразования к среднеквадратическому значению испытательного сигнала.

Частным случаем коэффициента нелинейных искажений является коэффициент гармоник:

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{v=0}^{\infty} h_v^2}}{h_0}. \quad (8)$$

Естественно, что критерий (8) применим только для случая чисто гармонического испытательного сигнала.

Нелинейные передаточные характеристики при гармоническом испытательном сигнале часто выражают через среднеквадратическое значение входного сигнала и значение основной частоты на выходе:

$$\rho = \frac{\sqrt{2\tilde{U}_1}}{U_{0_1}}.$$

В общем случае входной испытательный сигнал формализуем в следующем виде:

$$U(t) = \sum_{i=0}^n U_{0i} \cos(\Omega_i t + \psi_i).$$

Напряжение $U(t)$ на некотором участке испытываемой платы можно представить выражением:

$$U(t) = \sum_{j=0}^m \tilde{U}_{0j} \cos(\Omega_j t + \psi_j).$$

Тогда для случая отсутствия явно выраженных КС в ФО будут верны соотношения:

$$n=m_3; U_{0i} = U'_{0i} k; K\psi_i = \psi'_i$$

При этом множества $\{i\}$ и $\{j\}$ являются совпадающими, т.е. $\{i\}/\{j\} \equiv 0$.

Например, выберем в качестве опорной реализации испытательный сигнал вида:

$$U'_n(t) = \sum_{i=0}^n U'_{0i} k_i \cos(\Omega_i t + \psi_i).$$

В случае нелинейных искажений множества $\{i\}$ и $\{j\}$ уже не будут совпадать. В составе напряжения $U(t)$ появляются гармоники с номерами, отличными от номеров гармоник испытательного сигнала, т. е.

$$\{i\}/\{j\} \neq 0.$$

Естественно, что производить идентификация СК ФО при нелинейных искажениях необходимо по мерам гармоник, входящим в множество $\{\alpha\}$, где

$$\{\alpha\} = \{i\}/\{j\},$$

т.е. по тем номерам гармоник, которые отсутствуют в опорной реализации с большей вероятностью.

Исходя из вышеизложенного, в качестве адекватного критерия может быть рекомендован критерий, представленный в виде:

$$R = 10 \lg \frac{\sum_{j \in \{\alpha\}} U_{0j}^2}{\sum_{i=0}^n U_{0i}^2 k_i^2} = 10 \lg \frac{S}{\tilde{U}_n^2}. \quad (9)$$

Оценка нелинейных искажений по критерию (9) будет эквивалентна оценке по критерию коэффициента гармоник (8).

Обобщая, можно констатировать, что суть эффекта нелинейного рассеяния зондирующего электромагнитного излучения исследуемым контролируемым ФО заключается в том, что некоторые ФО или их структурные элементы при облучении электромагнитными волнами обладают способностью генерировать спектральные составляющие, отсутствующие в спектре падающего потока электромагнитного излучения.

В большинстве случаев рассматриваемый класс ФО проявляет незначительные нелинейные свойства, что существенно ограничивает возможности нелинейной радиолокации при решении задач малоглубинной геофизики.

В связи с этим особый интерес представляет собой вопрос учета нелинейности в условиях переменного намагничивания ферромагнитных тел, суть которого заключается в существовании следующего нелинейного эффекта: глубинный дефект в ферромагнитном теле, не выявляющийся при намагничивании последнего слабым переменным полем из-за сильно выраженного скин-эффекта и незначительной величины поля, начинает четко обнаруживаться индукционными датчиками, если дополнительно наложить на тело достаточно сильное постоянное магнитное поле.

На базе этого эффекта возможна реализация метода выявления скрытых дефектов, заключающегося в том, что скрытый дефект в ферромагнитном изделии может быть

выявлен при помощи преобразователя переменного магнитного поля (электромагнитный преобразователь), если это изделие внести в достаточно сильное постоянное магнитное поле.

Из анализа данного эффекта следует вывод о том, что усиление нелинейных отражающих свойств гетерогенного ФО возможно за счет использования параметрических эффектов, вызванных различными возбуждающими физическими полями, в качестве которых целесообразно выбирать те, у которых удельные потери при прохождении через слой укрывающей среды минимальны.

Известно, что электрические цепи, в которых хотя бы один из параметров изменяется по какому-либо заданному закону, называются параметрическими. Рассеянное, например, объектом поиска электромагнитное поле может отличаться от падающего своими параметрами: амплитудой, фазой, частотой и поляризацией.

Такой активный метод обнаружения объектов, основанный на регистрации изменения параметров зондирующего поля за счет облучения этих объектов дополнительным возбуждающим полем (акустическим, СВЧ-электромагнитным, лазерным и др.), можно считать параметрической локацией.

Под воздействием дополнительного возбуждающего поля (акустического, лазерного и др.) эти параметры могут изменяться во времени и пространстве. Закон изменения этих параметров будет определяться, прежде всего, характеристиками возбуждающего поля (плотностью потока мощности, частотой и др.).

В параметрической локации возбуждающий сигнал “окрашивает” зондирующий сигнал при его отражении от объекта поиска искусственного происхождения. “Окраска” заключается в придании ему характерных амплитудных, частотно-временных и поляризационных признаков, которые могут затем быть выявлены в приемном устройстве поисковой системы

Необходимо отметить наличие значительного количества возможных сочетаний зондирующих и возбуждающих физических полей. Выбор той или иной комбинации должен осуществляться с учетом многих факторов: наличия априорной информации об особенностях устройства объектов поиска, характеристик окружающего фона, требуемой дальности обнаружения и др.

Возможные варианты сочетаний зондирующих и возбуждающих физических полей представлены на рис. 4.

Следует отметить, что многие из существующих вариантов параметрической локации основаны на физических эффектах, известных в технике как “вредные”. Например, механические вибрации цели (самолетов, танков и др.) вызывают “шум цели”, которые ухудшают поисковые характеристики РЛС, особенно когерентных; эффект кросс-модуляции рассматривается как “вредный”, создающий взаимные помехи между соседними каналами связи; возбуждение электронно-оптических приборов наблюдения и целеуказания лазерным излучением часто приводит к их “ослеплению” и т.п.

Управление всеми этими эффектами, прежде всего за счет выбора оптимальных параметров (энергетических, временных, частотных и др.) возбуждающего поля позволяет превратить их из “вредных” в “полезные” и использовать в целях локации подповерхностных объектов различного происхождения.

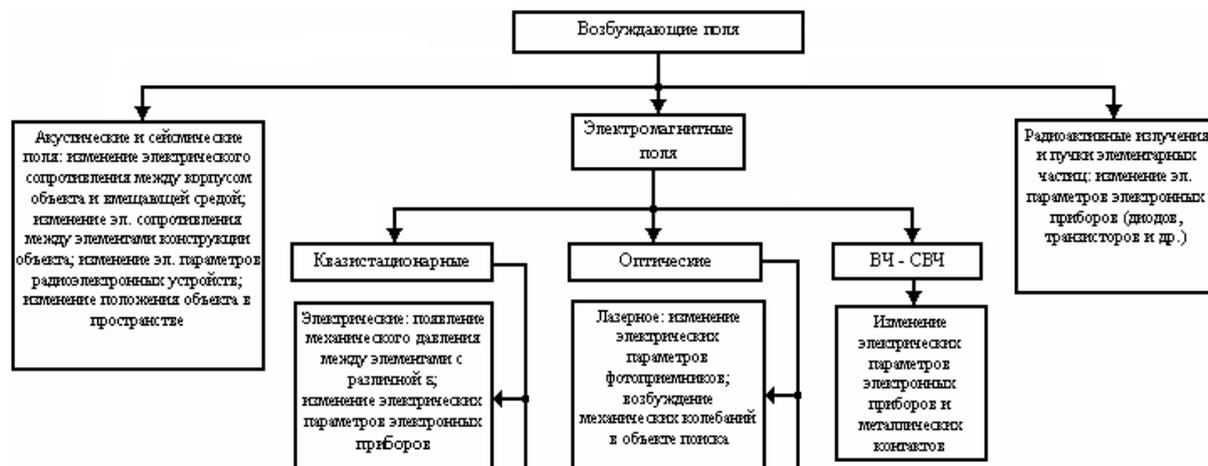


Рисунок 4. Варианты сочетаний зондирующих и возбуждающих физических полей

Сам параметрический процесс формирования вторичного сигнала может быть как линейным, так и нелинейным.

Первый случай имеет место, например, при рассеянии СВЧ-электромагнитного поля вибрирующим объектом поиска за счет дополнительного его облучения мощным акустическим полем, а второй – при рассеянии СВЧ-поля возбуждаемым нелинейным объектом на гармониках. Возбуждение нелинейных элементов объекта поиска может при этом осуществляться электромагнитным полем ДВ-, СВ-, КВ-диапазонов, что приводит к соответствующему изменению исходных характеристик всего ФО.

Анализ ситуации в области нелинейной и параметрической локации полупроводящих сред применительно к решению задачи малоглубинной геофизики показывает, что ресурсы электромагнитного поля используются не в полной мере.

Очевидно, что использование параметрического возбуждающего поля наряду с основным зондирующим позволит заметно улучшить поисковые характеристики приборов нелинейной радиолокации.

Качественный скачок в исследованиях рассматриваемого класса ФО может быть достигнут путем использования нового нелинейно-параметрического метода, основанного на усилении нелинейных свойств ФО за счет дополнительного воздействия на ФО постоянным электрическим полем при его зондировании переменным электрическим полем, т.е. основанного по аналогии с вышерассмотренным эффектом (рис.5) [6] .

В этом случае на несимметричный горизонтальный электрический диполь одновременно подается напряжение смещения U_0 и переменное напряжение U_ω , которые создают в окружающем пространстве соответственно зондирующее переменное электрическое поле определенной частоты E_ω и возбуждающее постоянное электрическое поле E_0 .

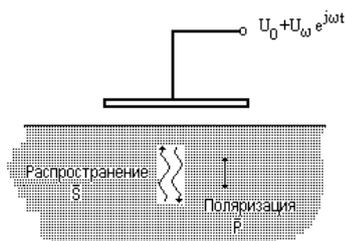


Рисунок 5. Метод нелинейно-параметрического метода локации

В результате воздействия этих двух физических полей на ФО (геофизическая среда) в нем возникает продольная ультразвуковая волна S , которая инициирует в ФО изменение его диэлектрических, электрооптических, упругих, пьезоэлектрических и/или магнитоупругих параметров.

Подобный нелинейно-параметрический метод, реализуемый посредством электростатического преобразователя, ориентирован на резонансные свойства ФО и с физической точки зрения объясняется в основном возникновением сложно-взаимосвязанных электро- и магнитоупругих эффектов на КС ФО, что, в свою очередь, обеспечивает усиление нелинейных свойств ФО.

В этом случае происходит образование связанных магнитоупругих волн, под действием которых рождается, по крайней мере локально, макроскопически большое число возбуждений, приводящих к образованию нелинейных волн различного вида, включая и периодические нелинейные волны.

Данная идея нелинейно-параметрической локации является логическим продолжением методов нелинейной и параметрической радиолокации, позволяющая существенно расширить круг обнаруживаемых объектов, и может быть положена в основу новых перспективных бесконтактных радиоволновых методов, не требующих прокладки кабелей, применения заглубленных специальных электродов и мощных генераторных установок.

Литература

1. Брякин, И.В. Концепция применения малоглубинной геофизики // Проблемы автоматизации и управления. – 2013. № 2 (25). – С. 91–101.
2. Брякин, И.В. Прикладные аспекты малоглубинной магниторазведки // Проблемы автоматизации и управления. – 2016. № 1 (30) С. 65 – 67.
3. Черняк, Г.Я., Мясковский, О.М. Радиоволновые методы исследований в гидрогеологии и инженерной геологии. – М.: Недра, 1973. 176 с.
4. Лукьянец, В.А., Алмазова, З.И. и др. Физические эффекты в машиностроении – М.: Машиностроение. 1993. – 224 с.
5. Петров, Б.М. Эффект нелинейного рассеяния. – Таганрог: ТРТУ, 1997. – 202 с.
6. Брякин, И.В. Комбинированный антенный блок для георадаров // Проблемы автоматизации и управления. – 2015. № 2 (29). – С. 64–74.

И.В. Брякин, С.В. Корякин

Институт автоматике и информационных технологий

Национальной академии наук Кыргызской Республики, г.Бишкек

bivas2006@yandex.com, s.koryakin@aknet.kg

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ В СИСТЕМАХ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

Рассматриваются структура и особенности функционирования систем реального времени (СРВ). Анализируются вопросы обеспечения информационной безопасности в СРВ. Обосновывается вариант методологии создания систем защиты информации (СиЗИ), как функционального компонента СРВ защищенного исполнения (ЗИ).

Ключевые слова: архитектура, защищенное исполнение, информационная безопасность, операционная система, принцип, структура, система реального времени, система защиты информации, ядро.

Введение

Системы реального времени (СРВ) по своей сути являются параллельными системами с временными ограничениями. Они широко распространены в промышленных, коммерческих и военных приложениях. Современная система реального времени немаловажна без комплекса достаточно сложной обработки информации, полученной не только путем ручного ввода, но и на основании автоматических измерений. К подобной обработке информации можно отнести: автоматизированный сбор, преобразование, агрегирование, хранение, передачу и представление (визуализация). Результатом этой обработки служит предоставление требуемой и достоверной информации в нужном виде, в нужном месте, и в нужное время, все то, без чего невозможно полноценное управление. Здесь имеется в виду не только информация для поддержки принятия решений, позволяющая операционному менеджменту выполнять свои функции, но и информация, на основании которой система в автоматическом или автоматизированном режиме производит выработку управляющих воздействий и команд, поступающих на реальный объект управления [1].

Система считается СРВ, если правильность ее функционирования зависит не только от логической корректности вычислений, но и от времени, за которое эти вычисления производятся. Иными словами, для событий, происходящих в такой системе, то, когда эти события происходят, так же важно, как логическая корректность самих событий. Кроме того, быстродействие такой системы адекватно скорости протекания физических процессов на объектах контроля или управления, а время генерации выходного сигнала СРВ играет существенную роль.

Это обычно связано с тем, что входной сигнал соответствует каким-то изменениям в физическом процессе, и выходной сигнал должен быть связан с этими же изменениями. Временная задержка от получения входного сигнала до выдачи выходного сигнала должна быть небольшой, чтобы обеспечить приемлемое время реакции. Время реакции является, прежде всего, системной характеристикой: при управлении ракетой требуется реакция в течение нескольких миллисекунд, тогда как для диспетчерского управления движением пароходов требуется время реакции, измеряемое днями.

Следует отметить, что время реакции СРВ имеет порядок миллисекунд; диалоговые системы отличаются временем реакции порядка нескольких секунд, а в системах пакетной обработки время реакции измеряется часами или днями. Примерами СРВ являются АСУ физическими процессами с применением вычислительных машин, системы торговых автоматов, автоматизированные системы контроля и автоматизированные испытательные комплексы.

Среди АСУ, являющихся СРВ, выделяют следующие основные классы [2]:

- АСУТП – АСУ технологическими процессами (например, система управления ядерным реактором АЭС или система управления конвейером автозавода);
- АСНИ – автоматизированные системы научных исследований и комплексных испытаний (например, система вибрационных испытаний компонентов ракетной техники);
- встроенные системы управления (предназначенные для управления работой простых технических объектов – мобильных телефонов, стиральных машин, станков и т.п.) и бортовые системы управления (предназначенные для управления автомобилями, танками, самолетами, ракетами и т.п.).

Следует отметить, что на практике встречаются частные случаи СРВ:

- если в системе присутствуют только каналы сбора данных и измерения, то данная система является ИИС;
- если принятие решений и управление осуществляется непосредственно человеком, то система представляет собой АСДУ.

В последние годы вместе с техническими факторами, определяющими эффективность использования СРВ, широко обсуждаются и проблемы информационной безопасности подобных систем.

Независимо от того, является ли СРВ распределенной или централизованной, ее можно рассматривать как некоторую совокупность средств обработки, хранения и представления информации. Из этого следует, что в СРВ должны функционировать линии связи между отдельными аппаратными составляющими. В этом случае любое из аппаратных средств и любая линия связи могут быть источником информационной угрозы.

Структура и особенности функционирования СРВ

На практике защита информации представляет собой комплекс регулярно используемых методов и средств, принимаемых мер и осуществляемых мероприятий с целью систематического обеспечения требуемой надежности информации, генерируемой, хранящейся и обрабатываемой, в какой-либо информационной системе, а также передаваемой по каким-либо каналам.

Защита должна носить системный характер, т.е. для получения наилучших результатов все разрозненные виды защиты информации должны быть объединены в единое целое. Она должна функционировать в составе единой системы методов и средств, представляющей собой безотказный механизм взаимодействующих элементов, предназначенных для выполнения задач по обеспечению информационной безопасности.

Качество (надежность и эффективность) защиты зависит не только от видов составляющих частей системы, но и от их полноты, которая может быть обеспечена только при учете всех факторов и обстоятельств, сопутствующих функционированию СРВ. Поэтому комплексная система защиты информации призвана объединить логические и технологические составляющие защиты, учитывающие все факторы, которые оказывают или могут оказывать влияние на качество защиты. Более того, комплексная система защиты информации предназначена обеспечивать, с одной стороны, организацию и обеспечение надежных механизмов защиты, а с другой – управление механизмами защиты информации [3].

В большинстве случаев требования к комплексной системе защиты информации

предъявляются с учетом условий и рабочих характеристик СРВ и стоящих перед ней функциональных задач.

Следует учитывать тот факт, что в настоящее время происходит переосмысление многих вопросов становления и развития информационного рынка, неизбежно порождающих самые разнообразные проблемы, главной из которых является обеспечение информационной безопасности, поэтому образование на этом рынке сектора, в задачи которого входит защита информации, является вполне закономерным и весьма необходимым.

Для более полного понимания специфики решаемых задач, в плане обеспечения необходимого уровня защиты информации СРВ, следует рассмотреть более подробно особенности организации и функционирования таких систем.

Известно, что термин «система реального времени» обычно относится к системе в целом, включающей приложение реального времени, операционную систему реального времени и подсистему ввода/вывода реального времени (рис. 1).



Рисунок 1. Обобщенная блок-схема СРВ

В состав такой системы входят также драйверы специальных устройств, управляющие работой различных датчиков и приводов.

По сравнению с информационными системами, в которых функции получения первичной информации и выдачи управляющих воздействий перекладываются на человека, системы, построенные на основе реальной связи с объектом управления, обладают более высокой оперативностью и достоверностью, не менее важным является и то, что в таких системах практически отсутствует человеческий фактор.

Системы реального времени часто отличаются повышенной сложностью, так как их работа связана с многочисленными независимыми потоками входных событий и продуцированием различной выходной информации. Частота поступления событий обычно непредсказуема, однако реагировать необходимо достаточно быстро, чтобы соблюсти временные ограничения, сформулированные в требованиях к программе. Нередко нельзя предугадать и порядок поступления событий. Кроме того, входная нагрузка может с течением времени значительно и неожиданно изменяться.

Аппаратные и программные средства, обеспечивающие техническую реализацию СРВ, должны отвечать современным требованиям унификации и стандартизации, метрологической, конструктивной, информационной и эксплуатационной совместимости, принципам модульного построения. При выполнении этих требований обеспечивается надежность построенной на основе этих средств информационной системы предприятия, достоверность и оперативность получаемой менеджментом информации, гарантированность исполнения командной информации.

Исходные требования к времени реакции системы и другим временным параметрам определяются или техническим заданием на систему, или просто логикой ее

функционирования. Однако точное определение «приемлемого времени реакции» не всегда является простой задачей, а в системах, где одним из звеньев служит человек, подвержено влиянию субъективных факторов.

Быстродействие СРВ должно быть тем больше, чем больше скорость протекания процессов на объекте контроля и управления. Чтобы оценить необходимое быстродействие для систем, имеющих дело со стационарными процессами, необходимо использовать теорему Котельникова, из которой следует, что частота дискретизации сигналов должна быть как минимум в 2 раза выше граничной частоты их спектра.

При работе с широкополосными по своей природе переходными процессами (транзиент-анализ) следует применять быстродействующие АЦП с буферной памятью, куда с необходимой скоростью записывается реализация сигнала, которая затем анализируется и/или регистрируется вычислительной системой. При этом требуется закончить всю необходимую обработку до следующего переходного процесса, иначе информация будет потеряна.

Подобные системы иногда называют системами квазиреального времени. Различают системы «жесткого» и «мягкого» реального времени [4]:

1. Системой «жесткого» реального времени является система, где неспособность обеспечить реакцию на какие-либо события в заданное время является отказом и ведет к невозможности решения поставленной задачи.

Несмотря на то, что теоретически время реакции в «жестких» системах может составлять и секунды, и часы, и недели, но с точки зрения практики время реакции в системах «жесткого» реального времени должно быть все-таки минимальным. Следует иметь в виду тот факт, что однозначного мнения о том, какое время реакции свойственно «жестким» системам, нет. Более того, с увеличением быстродействия микропроцессоров это время имеет тенденцию к уменьшению, и если раньше в качестве границы называлось значение 1 мс, то сейчас, как правило, называется время порядка 100 мкс.

2. Точного определения «мягкого» реального времени не существует, поэтому считается, что сюда относятся все системы реального времени, не попадающие в категорию «жестких». Кроме того, системы «мягкого» реального времени в настоящее время до конца теоретически не проработаны.

При разработке СРВ следует выбирать наиболее простые конфигурации, характерные для систем «жесткого» реального времени. Иногда это необходимо осуществлять даже в ущерб эффективности использования вычислительных ресурсов.

Причина этого заключается в том, что сложные динамические системы весьма трудно анализировать и отлаживать. Поэтому лучше использовать более мощную дорогостоящую микропроцессорную технику, чем иметь в будущем проблемы из-за непредвиденного поведения системы. В связи с этим большинство существующих СРВ представляют собой статические системы с фиксированными приоритетами. Часто в системе реализуется несколько «режимов» работы, каждый из которых имеет свой набор выполняемых задач с заранее заданными приоритетами.

Программные СРВ имеют дополнительные характеристики, отличающие их от прочих систем:

1. Встраиваемые системы. СРВ часто является частью более крупной программно-аппаратной системы. Примером может служить контроллер робота, входящий в состав робототехнического комплекса, имеющего одну или несколько механических рук. Обычно программная система реального времени состоит из приложения реального времени, ОСРВ и, возможно, дополнительного системного ПО: коммуникационных программ, программ промежуточного слоя или драйверов специальных устройств.

2. Взаимодействие с внешней средой. Как правило, СРВ осуществляет такое взаимодействие без участия человека. Например, она может управлять механизмами или

процессом производства, следить за протеканием химических реакций или поднимать тревогу. Для получения информации о внешней среде обычно требуются датчики, а для управления средой – приводы (см. рис. 2).

3. Временные ограничения. СРВ обязаны тратить на обработку события время, не превышающее заранее заданное. Если в интерактивной системе недостаточно быстрая реакция способна лишь вызвать недовольство, то в системе реального времени последствия бывают катастрофическими. Например, в системе управления воздушным движением это может привести к столкновению самолетов в воздухе. Необходимое время реакции зависит от приложения: иногда оно измеряется миллисекундами, иногда – секундами, а иногда – даже минутами.

4. Управление в реальном масштабе времени. Часто СРВ приходится принимать управляющие решения на основе входных данных, без участия человека. Так, автомобильная система круиз-контроля, призванная поддерживать постоянную скорость машины, должна управлять дросселем в зависимости от текущей скорости. Однако могут быть и некритичные по времени компоненты. Например, система сбора данных в реальном времени должна принимать информацию сразу, иначе она будет потеряна, но анализ полученных сведений допустим и позже.

5. Реактивные системы управляются событиями и должны реагировать на внешние стимулы. Обычно реакция системы зависит от ее текущего состояния, то есть не только от самого внешнего стимула, но и от того, что происходило в системе раньше.

В общем случае операционные системы (ОС) состоят из нескольких «слоев», каждый из которых выполняет свой набор функций (рис. 2).



При умозрительном можно относиться к рекламной информации разработчиков ОСРВ, которые из коммерческих соображений показывают, как правило, параметры для «лучшего случая».

Например, если речь идет о максимальном времени обработки прерывания, необходимо в первую очередь понимать, а что, собственно, подразумевается под этим временем: а) время от возникновения запроса на прерывание до передачи управления по вектору прерывания; б) или включая время сохранения контекста текущей задачи и передачи управления подпрограмме обработки прерывания; в) или дополнительно к этому еще и время до завершения подпрограммы обработки прерывания и передачи сообщения, связанной с прерыванием задачи; г) или дополнительно к этому время до момента, когда эта задача наконец получит управление (в предположении, что она является наиболее приоритетной) и начнет реальную обработку события.

Безотносительно к тому, какой вариант рассматривается, необходимо помнить следующее: 1 – если наряду с разработанными вами программами используется программное обеспечение третьих фирм, вы не застрахованы от того, что там не встретятся участки кода, где прерывания запрещены; 2 – практически любая ОСРВ имеет в своих недрах участки такого кода; 3 – всё ядро ОСРВ или его участки могут быть «невывесными»; 4 – интеллектуальные контроллеры ввода/вывода типа SCSI могут инициировать в системе различные служебные операции, которые способны отразиться на ее характеристиках; 5 – многое зависит от применяемой системы кэширования.

Все ОСРВ являются многозадачными операционными системами. Задачи делят между собой ресурсы вычислительной системы, в том числе и процессорное время.

Четкой границы между ядром (Kernel) и ОС нет. Различают их, как правило, по набору функциональных возможностей.

Ядра предоставляют пользователю такие базовые функции, как планирование и синхронизация задач, межзадачная коммуникация, управление памятью и т. п.

ОС в дополнение к этому имеют файловую систему, сетевую поддержку, интерфейс с оператором и другие средства высокого уровня.

Практически все современные процессоры поддерживают как минимум два режима выполнения программного кода:

- «привилегированный режим» (или «режим супервизора», или «режим ядра», или «kernel mode», или «защищенный режим»);
- «непривилегированный режим» (или «режим приложений»).

Основное различие между ними заключается в том, что программы, работающие в режиме супервизора, имеют непосредственный доступ ко всем ресурсам ЭВМ: к внешним устройствам, к оперативной памяти по физическим адресам и пр. Программы же режима приложений работают в виртуальной среде, сформированной программами режима супервизора.

По своей внутренней архитектуре ОСРВ можно условно разделить на монолитные ОС и ОС на основе микроядра (рис. 3).

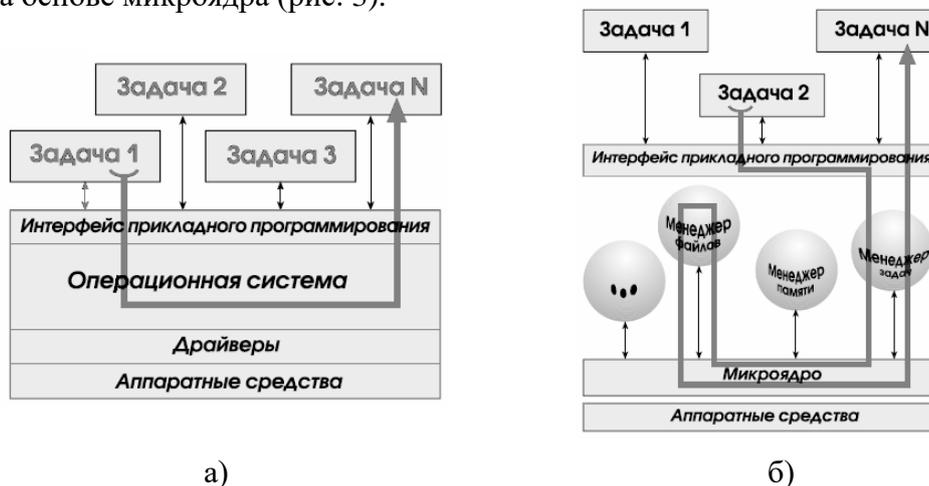


Рисунок 3. Варианты архитектур ОС: а – монолитная архитектура; б – микроядерная архитектура

Все компоненты «монолитной» ОС работают в режиме супервизора в едином адресном пространстве. Главное достоинство таких ОС – высокая производительность. Главный недостаток – невозможность внесения каких-либо изменений в структуру операционной системы в процессе ее эксплуатации, т.е. плохая масштабируемость. Другой недостаток – невысокая реактивность системы, т.к. если внешнее событие, требующее немедленной реакции, происходит во время выполнения задач уровня ядра, то обработка этого события задерживается до возвращения на уровень приложений.

Особенность «микроядерных» ОС – наличие компактного и быстродействующего «микроядра», работающего в режиме супервизора, а все остальные компоненты операционной системы, включая менеджеры ресурсов, при этом работают в непривилегированном режиме. «Микроядерный» подход обеспечивает хорошую гибкость и масштабируемость операционной системы, малое время реакции на внешние события. С другой стороны, «микроядерные» операционные системы отличаются относительно невысокой производительностью, т.к. при работе происходят частые переключения из режима в режим.

Встраиваемые ОСРВ преимущественно строятся в соответствии с «микроядерной»

архитектурой. В фирменной документации на ОСРВ обычно указывают числовые значения временных характеристик, таких как: предельное время переключения с задачи на задачу; предельная задержка между возникновением прерывания и началом его обработки; предельное время выполнения запроса прикладной программы к ядру ОС; предельное время переключения из режима «супервизора» в «непривилегированный» режим и обратно, и т.п.

Прежде чем устанавливать СРВ на реальном объекте, рекомендуется проверить ее работоспособность с помощью интенсивных тестов. Это особенно важно для сложных динамических систем. Во время такого тестирования желательно смоделировать наиболее неприятные и «тяжелые» режимы работы, аварийные ситуации и т. п. Кроме того, следует учитывать тот факт, что значительная часть особо ответственных систем фактически реализуется без применения коммерческих ОСРВ.

Общие требования по информационной безопасности СРВ

СРВ фактически представляет собой организационно-техническую систему, обеспечивающую выработку решений на основе автоматизации информационных процессов в различных сферах деятельности (управление, проектирование, производство и т.д.) или их сочетаниях.

СРВ реализует информационную технологию в виде определенной последовательности информационно связанных функций, задач или процедур, выполняемых в автоматизированном или автоматическом режимах. Целесообразность создания и внедрения АС определяется социальным, научно-техническим или другими полезными эффектами, получаемыми в результате автоматизации [4].

Под защищенным исполнением СРВ следует понимать наличие в ее составе организационных и программно-технических средств защиты информации от несанкционированного доступа (НСД) [5]. Тогда сам процесс создания СРВ защищенного исполнения будет представлять собой фактически выполнение совокупности мероприятий, направленных на разработку и/или практическое применение информационной технологии, реализующей функции по ЗИ, установленные в соответствии с требованиями стандартов и/или НД по ЗИ как во вновь создаваемых, так и в действующих СРВ.

Общие принципы проектирования СРВ защищенного исполнения основаны на структурном подходе к анализу и самому проектированию СРВ. Исходя из этого, для защиты информации можно сформулировать следующие основные принципы: 1 □□ системности; 2 □□ комплексности; 3 □ непрерывности защиты; 4 □□ разумной достаточности; 5 □□ гибкости управления и применения; 6 □ открытости алгоритмов и механизмов защиты; 7 □ простоты применения защитных мер и средств.

С точки зрения прикладной значимости, при организации ИБ СРВ в первую очередь следует акцентировать внимание на двух базовых принципах: комплексности и системности.

Собственно, комплексное использование методов и средств защиты компьютерных систем предполагает согласованное применение разнородных средств при построении целостной системы защиты, перекрывающей все существенные (значимые) каналы реализации угроз и не содержащей слабых мест на стыках отдельных ее компонентов. Защита должна строиться эшелонированно. Внешняя защита должна обеспечиваться физическими средствами, организационными, технологическими и правовыми мерами. При построении комплексной защиты СРВ используется ряд основных мер, на которых данная система строится:

- правовые (законодательные);
- организационные (административные и процедурные);
- технические (аппаратурные и программные);

- физические;
- технологические;
- морально-этические.

Связь данных принципов представлена в виде соответствующей блок-схемы на рис. 4, где 1 □ нормативные и организационно-распорядительные документы составляются с учетом и на основе существующих норм морали и этики; 2 □ организационные меры обеспечивают исполнение существующих нормативных актов и строятся с учетом существующих правил поведения, принятых в стране и/или организации; 3 □□ воплощение организационных мер требует разработки соответствующих нормативных и организационно-распорядительных документов; 4 □□ для эффективного применения организационные меры должны быть поддержаны физическими и техническими средствами; 5 □ применение и использование технических средств защиты требует соответствующей организационной поддержки.

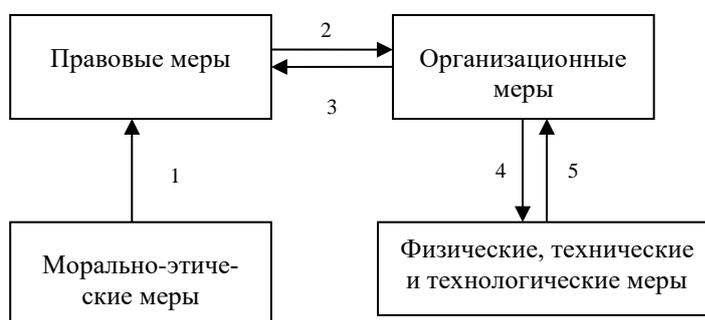


Рисунок 4. Взаимосвязь мер обеспечения безопасности

Системный подход к защите информации в СРВ предполагает учет всех взаимосвязанных, взаимодействующих и изменяющихся во времени элементов, условий и факторов, существенно значимых для понимания и решения проблемы обеспечения информационной безопасности в СРВ.

Принцип системности является одним из основных концептуальных и методологических принципов построения СРВ защищенного исполнения и предполагает:

- анализ всех возможных угроз безопасности информации;
- обеспечение защиты на всех жизненных циклах СРВ;
- защиту информации во всех звеньях СРВ;
- комплексное использование механизмов защиты.

Основной проблемой, которую приходится решать при создании больших систем любой природы, является проблема сложности. Правильная декомпозиция системы является главным способом преодоления сложностей больших систем [6].

Понятие *правильно* по отношению к декомпозиции означает следующее: 1 □ количество связей между отдельными подсистемами должно быть минимальным; 2 □□ связанность отдельных частей внутри каждой подсистемы должна быть максимальной.

Структура системы должна быть такой, чтобы все взаимодействия между ее подсистемами укладывались в ограничения: 1 □ каждая подсистема должна инкапсулировать своё содержимое; 2 □□ каждая подсистема должна иметь четко определенный интерфейс с другими подсистемами

Используют два основных подхода к декомпозиции систем:

1. Функционально-модульный (структурный подход) – в основу положен принцип функциональной декомпозиции, при которой структура системы описывается в терминах иерархии ее функций и передач информацией между отдельными функциональными элементами.

2. Объектно-ориентированный подход – использует объектную декомпозицию, при которой структура системы описывается в терминах объекта и связей между ними, а поведение системы описывается в терминах обмена сообщениями между объектами.

Кроме того, следует отметить, что одним из важнейших принципов построения защищенных СРВ является так же использование блочной архитектуры, позволяющее получить, в свою очередь, целый ряд преимуществ: а) упрощается разработка, отладка, контроль и верификация устройств (программ, алгоритмов); б) допускается параллельность разработки блоков; в) используются унифицированные стандартные блоки; г) упрощается модернизация систем; д) удобство и простота эксплуатации.

Основываясь на принципе блочной архитектуры защищенной СРВ, можно представить структуру идеальной защищенной системы.

В такой системе имеется минимальное ядро защиты, отвечающее нижней границе защищенности систем определенного класса (например, ПЭВМ). Если в системе необходимо обеспечить более высокий уровень защиты, то это достигается за счет согласованного подключения аппаратных блоков или инсталляции дополнительных программных средств (аналог режима «Plug and Play» в ОС Windows). В случае необходимости могут быть использованы более совершенные блоки СРВ, чтобы не допустить снижения эффективности применения системы по прямому назначению. Это объясняется потреблением части ресурсов СРВ вводимыми блоками защиты.

Стандартные входные и выходные интерфейсы блоков позволяют упростить процесс модернизации систем защиты информации (СиЗИ), альтернативно использовать аппаратные или программные блоки. Здесь просматривается аналогия с семиуровневой моделью OSI.

Очевидно, что степень соответствия этому принципу зависит от конкретной ОС, для которой создается СиЗИ. Эта зависимость определяется принципами построения и взаимодействия компонентов ОС, а также возможностью применения современных методов объектно-ориентированного проектирования.

Обобщая, можно констатировать, что в настоящее время существуют две концепции к проектированию СРВ защищенного исполнения (ЗИ):

- В первом случае СиЗИ разрабатываются одновременно с защищенной СРВ как таковой, т.е. СРВ создается как единое целое, включая, в частности, общее, специальное и функциональное ПО, аппаратную часть и средства защиты. При этом средства защиты включают компоненты уровня ОС, отвечающие за выполнение базовых функций защиты, и компоненты прикладного уровня, размещающиеся в общем, специальном и функциональном ПО. Взаимодействие указанных компонент СиЗИ позволяет создать необходимые условия для выполнения заданных требований по защищенности информации в СРВ.

- Вторая концепция обусловлена особенностями развития технологий разработки системного ПО в странах СНГ, которые привели к отсутствию сколь-либо распространенных ОС, производимых в этих странах. Разработка защищенных информационных систем в рамках СНГ выполнялась преимущественно путем переработки некоторой системы-прототипа с целью ее адаптации и доработки средств защиты до требуемого уровня. На первый взгляд, этот путь представляется менее трудоемким, чем создание средств защиты с нуля. Однако на практике доработка уже существующей системы при отсутствии достаточной информации о ней не только приводит к непроизводительным потерям рабочего времени, но и предопределяет большую вероятность неудачи. При таком подходе разработчики СиЗИ из стран СНГ за основу брали, как правило, штатную систему защиты конкретной ОС и дорабатывали ее под требования РД ГТК, используя декларированные функции и возможности. Для целого ряда некритичных приложений подобный подход вполне приемлем, так как обеспечивает достижение определенного

уровня информационной безопасности при относительно небольших затратах на разработку. Однако для использования в областях, где присутствует государственная тайна, например в изделиях, предназначенных для Министерств обороны стран СНГ, данный подход неприемлем в принципе.

При различных вариациях второй концепции основой СиЗИ все равно остается базовая система иностранного производства. При этом отсутствие исходных текстов и достоверных сведений о недеklarированных возможностях не позволяет гарантировать необходимую реакцию СиЗИ на угрожающее воздействие. Это справедливо и тогда, когда разработчики СРВ Зи обеспечивают частичное вскрытие и доработку базовой системы защиты с целью обеспечения требуемой реакции в соответствии с определенными правилами.

СиЗИ, как основной функциональный компонент СРВ защищенного исполнения

В сложившихся условиях принципиальным решением указанной проблемы является разработка своего комплекса средств защиты информации (СрЗИ), с использованием которого можно было бы создавать полнофункциональные СиЗИ, в максимальной степени не зависящие от ОС импортного производства и полностью не зависящие от базовой системы защиты этой ОС.

Поэтому разрабатываемая СиЗИ должна выполняться с более высоким приоритетом, чем уже существующая базовая, и обеспечивать функции защиты как при активной, так и при выключенной базовой СиЗИ.

В целом, совокупность требований к СиЗИ можно представить в виде соответствующей блок-схемы (рис. 5).

Выделяют четыре основных типа структуры СиЗИ [3]:

- однокомпонентные СиЗИ, которые строятся на базе одного, как правило, узкоспециализированного продукта по защите информации (в большинстве случаев таким продуктом становился антивирусный пакет);
- многокомпонентные СиЗИ, строящиеся уже на базе нескольких продуктов, каждый из которых решает свою конкретную задачу. При этом используемые в многокомпонентной СЗИ продукты и технологии по защите информации никак не связаны между собой ни на техническом, ни на организационном уровнях;
- комплексные СиЗИ – дальнейшее развитие многокомпонентных СиЗИ, в которых используемые продукты, технологии и решения объединяются в единую систему на организационном уровне с тем, чтобы обеспечить максимальную степень защищенности всей КИС в целом. Очевидно, что при этом стойкость всей СиЗИ эквивалентна стойкости самого «слабого» ее звена;
- интегрированные СиЗИ, в которых все элементы комплексных СиЗИ объединяются (вернее интегрируются) не только на организационном, но и на техническом и даже технологическом уровнях. В такой интегрированной системе компрометация одного из элементов защиты должна надежно компенсироваться противодействием других ее элементов.



Рисунок 5. Совокупность требований к СиЗИ

СиЗИ относятся к классу сложных систем и для их построения могут использоваться основные принципы построения сложных систем с учетом специфики решаемых задач СРВ: 1□□ параллельная разработка СРВ и СиЗИ; 2 □ системный подход к построению СРВ защищенного исполнения (ЗИ); 3□□ многоуровневая структура СиЗИ; 4□□ иерархическая система управления СиЗИ; 5□□ блочная архитектура СРВ ЗИ; 6□□ возможность развития СиЗИ; 7□□ дружественный интерфейс СРВ ЗИ с пользователями и обслуживающим персоналом.

Первый из приведенных принципов построения СиЗИ требует проведения одновременной параллельной разработки СРВ и механизмов защиты. Только в этом случае можно эффективно обеспечить реализацию всех остальных принципов. Причем в процессе разработки СРВ ЗИ должен соблюдаться разумный компромисс между созданием встроенных неразделимых механизмов защиты и блочных унифицированных средств и процедур защиты.

Только на этапе разработки СРВ можно полностью учесть взаимное влияние блоков и устройств собственно СРВ и механизмов защиты, добиться системности защиты оптимальным образом.

Как показывает практика, СиЗИ чаще всего имеет несколько уровней, перекрывающих друг друга, т. е. такие системы организованы по принципу построения «матрешек». В этом случае злоумышленнику, чтобы добраться до закрытой информации, необходимо «взломать» все уровни защиты (рис. 6).

Например, для отдельного объекта СРВ можно выделить 6 уровней (рубежей) защиты: 1 □ охрана по периметру территории объекта; 2 □□ охрана по периметру здания; 3 □ охрана помещения; 4 □ защита аппаратных средств; 5□□ защита программных средств; 6 □□ защита ин¹.....

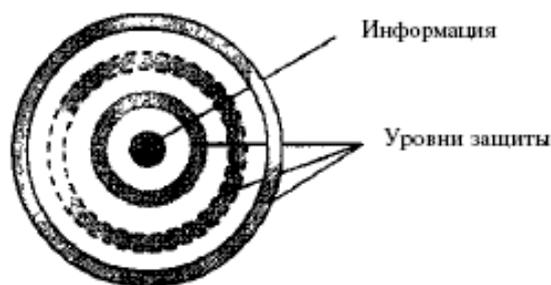


Рисунок 6. Многоуровневая СиЗИ

Несмотря на то, что СиЗИ всегда должны иметь централизованное управление, в распределенных СиЗИ допускается управление защитой осуществлять и по иерархическому принципу.

Централизация управления защитой информации объясняется необходимостью проведения единой политики в области безопасности информационных ресурсов в рамках предприятия, организации, корпорации, министерства. Для осуществления централизованного управления в СиЗИ должны быть предусмотрены специальные средства дистанционного контроля, распределения ключей, разграничения доступа, изготовления атрибутов идентификации и другие.

При создании СиЗИ должны учитываться все слабые и наиболее уязвимые места системы обработки информации, а также характер, возможные объекты и направления атак на систему со стороны нарушителей, пути проникновения в распределенные системы и несанкционированный доступ (НСД) к информации. СиЗИ должна строиться с учетом не только всех известных каналов проникновения и НСД к информации, но и с учетом возможности появления принципиально новых путей реализации угроз безопасности.

На современном этапе развития технологий обеспечения ИБ использование явления синергизма в масштабах всей корпоративной СиЗИ пока еще невозможно, т.к. на ИТ-рынке отсутствуют соответствующие реальные решения, позволяющие строить именно интегрированные СиЗИ. С одной стороны, это объясняется недостаточной зрелостью международных стандартов в области защиты информации, хотя движение в этом направлении прослеживается уже достаточно явно, а с другой стороны, построение многокомпонентных, а тем более однокомпонентных СиЗИ в большинстве случаев уже не является современным решением проблемы ИБ, особенно для крупных компаний. Поэтому в настоящее время оптимальным решением является построение именно комплексных СиЗИ.

Заключение

С учетом сказанного выше, в качестве системной основы для построения СРВ ЗИ исполнения рекомендуется применять микроядерную архитектуру с использованием сервера безопасности. На каждой рабочей станции защищаемой СРВ компоненты ПО системы защиты структурируются в виде ядра и сервисов. Ядро ориентировано на реализацию наиболее важных и общих функций базиса для всех сервисов защиты. Такой подход позволит минимизировать размер ядра и реализовать взаимодействие компонентов с использованием модели «клиент-сервер».

При разработке сложной СРВ, например, необходимо предусматривать возможность ее развития в двух направлениях: увеличения числа пользователей и наращивания возможностей сети по мере совершенствования информационных технологий. С этой целью при разработке СРВ предусматривается определенный запас ресурсов по сравнению с потребностями на момент разработки. Наибольший запас производительности необходимо предусмотреть для наиболее консервативной части сложных систем – каналов связи. Часть резерва ресурсов СРВ может быть востребована при развитии СиЗИ.

На практике резерв ресурсов, предусмотренный на этапе разработки, исчерпывается уже на момент полного ввода в эксплуатацию сложных систем. Поэтому при разработке СРВ необходимо предусмотреть возможность модернизации системы. В этом смысле сложные системы должны быть развивающимися или открытыми.

Причем механизмы защиты, постоянно совершенствуясь, вызывают необходимость наращивания ресурсов СРВ. Новые возможности, режимы СРВ, а также появление новых угроз в свою очередь стимулируют развитие новых механизмов защиты. Важное место в процессе создания открытых систем играют международные стандарты в

области взаимодействия устройств, подсистем. Они позволяют использовать подсистемы различных типов, имеющих стандартные интерфейсы взаимодействия.

Следует отметить, что разработка средств защиты уровня ОС позволит создать необходимый базис для проектирования СВЗ ЗИ. Однако, как указывалось выше, для получения эффективной СиЗИ необходимо иметь средства не только защиты уровня ОС, но и прикладного уровня, встроенные в прикладное ПО. На практике решение этой задачи достигается путем разработки соответствующих (руководящих документов) РД, используя которые, программист создает защищенное ПО. В случае реализации такого подхода к проектированию без использования серьезной инструментально-технологической оснастки разработанные средства защиты могут оказаться слабо типизированными и недостаточно унифицированными [6].

Практическое применение изложенных методологических аспектов проектирования АСЗИ позволит эффективно решать многосторонний комплекс существующих вопросов, связанных с достижением таких целей, как безопасность, безотказность и деловая добросовестность.

Литература

1. Нестеров, А.Л. Проектирование АСУТП: методическое пособие. Кн.1. – М.: Деан, 2006. – 552 с
2. Брякин, И.В. Методология итерационного проектирования магнитовариационной ИИС // Проблемы автоматизации и управления. – 2011. – №1. – С. 20–30.
3. Брякин И.В. Проектирование автоматизированных систем защищенного исполнения: научно-методическое пособие. – Бишкек: ИАИТ, 2017. – 81 с.
4. Емельянова, Н.З., Партыка, Т.Л., Попов, И.И. Основы построения автоматизированных информационных систем. – М.: ФОРУМ-ИНФРА-М, 2007. – 416 с.
5. Малюк, А.А. Информационная безопасность: концептуальные и методологические основы защиты информации. – М.: Горячая линия-Телеком, 2004. – 280 с.
6. Тарасюк, М.В. Защищенные информационные технологии: Проектирование и применение. – М.: СО-ЛОН-Пресс, 2004. – 192 с.

СОДЕРЖАНИЕ

УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ И МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ

1. *Шаршеналиев Ж.Ш., Самохвалова Т.П., Макиенко Д.О.* Алгоритм управления с периодическим контролем состояния объекта 3
2. *Джураев Х.Ш.* Стационарное распределение тепла с помощью математической модели процесса теплопроводности..... 10
3. *Пресников К.А., Аскалиева Г.О.* О методе определения характерного кинематического параметра на основе новой информативной характеристики 20
4. *Джураев Х.Ш., Наджмиддинов А.М., Хасанов С.* Приближенные аналитические решения нелинейной стационарной задачи теплопроводности при нагреве внутренними источниками, зависящими от температуры 27
5. *Волков А. Ю.* Моделирование инкрементального энкодера в системах автоматизированного проектирования PROTEUS ... 32
6. *Ниязова Г.Н., Сатаркулов К., Кыдырмаева З.С., Яблочников А.М.* Разработка компьютерной модели системы стабилизации и управления частотой вращения турбины микроГЭС нового типа 42

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

7. *Верзунов С.Н., Лыченко Н.М.* Полиморфная вейвлет-сеть с обратными связями для идентификации нестационарных временных рядов 52
8. *Верзунов С.Н.* Обзор методов разработки приложений для гетерогенных параллельных вычислительных систем..... 62
9. *Сорокова А.В., Н.М. Лыченко.* Разработка управляющей информационной системы диспетчеризации скорой медицинской помощи 72
10. *Корякин С.В.* Современные тенденции развития систем информационной безопасности 82
11. *Турдумаматов С. Т.* Радиолокационная микрополосковая антенна с электромагнитной структурой запрещенной зоны 92
12. *Брякин И.В., Турдумаматов С.Т.* Метод нелинейно-параметрической радиолокации для малоглубинной геофизики..... 103
13. *Брякин И.В., Корякин С.В.* Информационная безопасность в системах реального времени..... 115

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Научно-технический журнал

Редактор Л.В.Тарасова
Компьютерная верстка В.П. Алексеева

Подписано к печати 19.12.2017 г. Формат 70/108 1/8
Печать офсетная. Объем 14,52 п.л. Тираж 200 экз.

Издательство «Илим»
720071, Бишкек, проспект Чуй, 265-а