

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 № 1 (32)

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.– №1(32).– 112 с.

Главный редактор
академик НАН КР Ж. ШАРШЕНАЛИЕВ

Ответственный секретарь
кандидат технических наук В.И. ЗАМАЙ

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 А.Б. БАКАСОВА, (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

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

УДК 517.977.54-57

Ж.Ш. Шаршеналиев

Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР

Бишкек, Кыргызстан.

E-mail: avtomatika_nankr@mail.ru

О ПРОБЛЕМАХ СИНТЕЗА ОПТИМАЛЬНЫХ И АГРЕГИРОВАННЫХ РЕГУЛЯТОРОВ В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

В статье рассматриваются особенности синтеза оптимальных и агрегированных регуляторов в динамических SISO и MIMO системах.

Ключевые слова: синтез регуляторов, физическая теория управления, АКОР, АКАР.

Основным устройством в структуре динамических систем управления является регулятор. Исторически значительно важные результаты решения задачи простейших регуляторов были разработаны еще в 40-50 годах XX века в работах В.В. Солодовникова, Б.Н. Петрова, Т. Чесната, А.А. Фельдбаума и др., посвященных проблеме выбора вида и параметров корректирующих устройств, главным образом для линейных SISO объектов.

Практически это такие объекты, которые имеют адекватное описание в виде дифференциальных уравнений и передаточных функций. Общеизвестны регуляторы, широко применяемые на практике для управления «простыми» объектами: пропорциональные (П), пропорционально-дифференциальные (ПД), пропорционально-интегральные (ПИ) и пропорционально-интегрально-дифференциальные (ПИД) регуляторы, функционирующие с учетом параметрических и структурных изменений в системе.

Рассмотрим следующую математическую постановку задачи управления: пусть для движущегося объекта управления вида «летательный аппарат» (ЛА), имеем модель в виде

$$\dot{x}_i(t) = f_i(x_1, \dots, x_n, u_1, \dots, u_m, t), \quad (1) \\ i = \overline{1, n}, m \leq n,$$

где x_i – параметры полета: высота, скорость полета ЛА, угол тангажа и т.д.

u_r – управляющие воздействия ($r = \overline{1, m}$),

f_i – составляющие действующих обобщенных сил.

Различные задачи управления объектом (1) сводятся к двум основным постановкам задачи.

1. Задача программирования траекторий движения

2. Задача синтеза регуляторов

Обе постановки позволяют стабилизировать движение объекта вдоль программной траектории с помощью выбранного критерия качества.

Согласно задаче программирования траекторий в системе ищутся такие управления $U_{r \text{ пр}}(t)$ ($r = \bar{l}, \bar{m}$), которые переводят объект из начального состояния x_{i0} в конечное состояние x_{ik} с минимизацией некоторого критерия оптимальности, например, минимума «энергосберегающих» критериев, минимума затрат энергии или топлива, минимума времени перевода и т.д.

Об «Энергосберегающих» критериях качества

Допуская, что система (1) удовлетворяет условиям существования и единственности решений, ставится задача оптимального управления: найти допустимое управление U , обеспечивающее перевод системы (1) из начального состояния в конечное состояние $x(t)$ и минимизирующее общий критерий качества

$$J_{\min} = \int_0^T f_0(x, u) dt. \quad (2)$$

Частными критериями - энергосберегающими критериями качества являются [1]:

$$J_1 = \int_0^T dt \quad - \text{минимизация времен и переходных процессов};$$

$$J_2 = \int_0^T \sum_{k=1}^n c_k^2 |u_k| dt \quad - \text{минимизация расхода энергии};$$

$$J_3 = \int_0^T \left[\sum_{k=1}^n a_k^2 x_k^2 + c_k^2 u_k^2 \right] dt \quad - \text{минимизация расхода энергии при высокой точности управления};$$

$$J_4 = \int_0^t \left[J + \sum_{k=1}^n C_k(u_k) \right] dt \quad - \text{комбинированные критерии}.$$

Здесь $a_k = \text{const}$, $c_k = \text{const}$

О классических методах теории оптимального управления

В классической теории оптимального управления известны принцип максимума Понтрягина, методы динамического программирования Беллмана и метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР) Летова-Калмана.

Во всех этих методах и принципах рассматриваются задачи управления по заданным критериям, обеспечивающим, например, максимальное быстродействие, точность движения, минимальные затраты энергоресурсов и т.д.

В таких задачах часто используется принцип максимума Понтрягина. Для решения стационарного (автономного) случая нестационарной системы вида (1) принцип максимума Понтрягина доставляет только **необходимые условия** оптимальности при обеспечении минимума критерия качества $\min_{u \in U} J(u)$.

В соответствии с принципом максимума наряду с переменными u и x необходимо ввести вспомогательный вектор $\varphi = (\varphi_1, \dots, \varphi_n)$, неположительную постоянную $\varphi_0 \leq 0$ и функцию Гамильтона-Понтрягина $H_0(\varphi, x, u)$.

Необходимое условие оптимальности обеспечивается, если $\min J[u(t)]$ определяется нетривиальным решением присоединенной системы дифференциальных уравнений

$$\dot{\varphi}_i = -\frac{\partial H_0}{\partial x_i} = -\sum_{k=1}^n \frac{\partial f_k(x_i, u)}{\partial x_i} \varphi_k,$$

$$i = \overline{1, n}$$

или

$$\frac{d\varphi}{dt} = -\frac{\partial H}{\partial x}, H = \varphi_1 f_1 + \varphi_2 f_2 + \dots + \varphi_n f_n.$$

Оптимальное управление для каждого момента времени определяется из выражения

$$u(t) = \arg \max_{u \in U} H[x(t), \varphi(t), u].$$

Функция $H_0(\varphi, x, u)$ – представляет собой полную энергию системы $\dot{x}_i(t)$ с обобщенными координатами, $\varphi_i(t)$ – обобщенными импульсами. Однако, невозможность точного определения начальных условий x_{i0} и возникающих неожиданных возмущений затрудняют реализацию программного движения $x_{\text{ипр}}(t)$ объекта в системе с разомкнутым управлением $U_{\text{пр}}(t)$.

Вторая задача – это задача синтеза регулятора с использованием законов обратных связей, обеспечивающих гашение возмущающего воздействия в соответствии с заданным критерием качества.

В принципе максимума Понтрягина имеется трудность решения краевых задач с учетом ограничений в виде неравенств. А в методе динамического программирования Беллмана задача представляется как многошаговый процесс, описываемый соотношением

$$x_{n+1} = f(x_n, u_n, n),$$

где n – номер одного из множества возможных состояний системы, в которое она переходит по завершении n -го шага. Предполагается, что структурная задача не должна изменяться при изменении расчетного количества шагов N . При этом выбор управления на любом шаге не должен отрицать выбора управления на предыдущих шагах.

При синтезе регулятора ставится проблема, которая решала бы задачу математически путем синтеза закона оптимального управления.

В 60-х годах XX века в работах А.М. Летова, Р. Калмана, А.А. Красовского, М.М. Атанса, И.П. Фалба и многих других получила свое развитие теория аналитического конструирования оптимальных регуляторов (АКОР).

Задача оптимального синтеза управления, в общем, является чрезвычайно сложной. Практически удается построить лишь программное оптимальное управление. Под «синтезом управления» понимается управление, которое не выбирается заранее, а корректируется в каждый текущий момент на основании информации о состоянии системы, т.е. для системы

$$\begin{aligned} u &= \varphi(x, t), \\ \dot{x} &= A_x + B_u \end{aligned} \quad (3)$$

А.М.Летов предложил метод АКОР, доставляющий минимум функционала

$$J = \int_0^{\infty} (u^2 + m_1 x_1^2 + \dots + m_n x_n^2) dt . \quad (4)$$

Летов доказал, что система уравнений для уравнений связи (1) и функционала (2) является системой $2n$ линейных уравнений с постоянными коэффициентами, и управление описывается выражением

$$u = \sum_{k=1}^n k_i x_i , \quad (5)$$

где k_i – постоянные коэффициенты. Методика вычисления была разработана Летовым.

Выбор весовых коэффициентов n_1, m_2, \dots, m_n в функционале (2) позволяет получить различные варианты управления.

В соответствии с определением Летова «...в проблеме аналитического конструирования мы отказываемся от ... подхода, основанного на инженерной интуиции. Нашей целью будет получить закон регулирования чисто аналитическим путем, исходя из единых требований к качеству переходного процесса, которые можно сформулировать заранее. Из всех требований к качеству переходного процесса мы выбираем лишь одно – минимизацию некоторой меры возмущенного движения» [2].

Задача синтеза закона управления, где требование минимума критерия качества на траекториях движения объекта из произвольного начального состояния в заданное конечное состояние достигается с помощью обратных связей, решается методом конструирования оптимальных регуляторов (АКОР). Однако этот метод имеет следующие недостатки:

1. Для систем высокого порядка возникают большие трудности, связанные с необходимостью решения нелинейных уравнений в частных производных.
2. Даже для линейных стационарных объектов и квадратичных функционалов приходится иметь дело с нелинейными алгебраическими уравнениями вида Риккати.
3. Основной недостаток с инженерной, прикладной точки зрения – это косвенные квадратичные критерии качества с заданной структурой и заданными весовыми коэффициентами.
4. В АКОР не рассматриваются инженерные прямые показатели качества синтезируемых систем, т.е. происходит чрезмерная математическая формализация процедур синтеза.

По этому поводу основоположник теории оптимизации нелинейных динамических систем по неклассическим критериям обобщённой работы академик А.А. Красовский отмечает, что эти методы необходимо считать методами поиска оптимальной структуры и критерия качества желаемой совокупности инженерных требований к системе.

Общеизвестна сложность проблемы оптимального синтеза систем управления **нелинейными объектами**. Это связано с необходимостью решения функционального нелинейного дифференциального уравнения в частных производных и связано с огромными вычислительными трудностями при использовании методов АКОР Летова-Калмана. К тому же нерешенным остается выбор весовых коэффициентов критерия

качества в зависимости от требований к динамическим свойствам даже для систем второго-третьего порядков.

Академик А.А. Красовский предложил метод аналитического конструирования по **критерию обобщенной** работы, имеющий полуопределенный вид. При этом методе функциональное уравнение является **линейным дифференциальным** уравнением в частных производных. Следовательно, здесь для линейных объектов можно найти закон управления в аналитической форме, а что касается нелинейных объектов, то можно построить определенный вычислительный алгоритм синтеза.

Для нелинейных объектов отсутствуют способы учета ограничений, что создает большие трудности применения методов АКОР.

О современных подходах теории оптимального управления.

Современные сложные супер ММО объекты и системы являются многомерными, нелинейными и многосвязными. Для таких объектов использование классических методов оптимального управления **практически невозможно**. Это связано с внутренним взаимодействием фазовых координат состояния и возникновением сложных нелинейных процессов в открытых (в термодинамическом смысле) системах со спонтанной самоорганизацией.

Математическая модель классических систем автоматического управления (КСАУ) включает в себя управление, задающее и возмущающие воздействия, т.е. внешние силы. Математическая модель синергетической теории управления (СТУ) имеет другую структуру и составляет основу нового метода АКАР (аналитическое конструирование агрегированных регуляторов) и концепции единства процессов самоорганизации и управления (КЕПСУ). Основная идея в разработанной А.А. Колесниковым новой концепции единства процессов самоорганизации и управления (КЕПСУ) состоит в следующем [2,4].

1. Необходимо соответствующим образом включить внешние силы внутри нового расширенного исходного уравнения.
2. Необходимо, чтобы включенные в уравнение системы внешние силы оказались для нее внутренними взаимодействиями (взаимодействиями) общей замкнутой системы.
3. Цель – нахождение закона управления $U(x_1, x_2, \dots, x_n)$ в функции координат состояния замкнутой расширенной системы, охваченной прямыми и обратными связями.

Эти силы становятся **внутренними взаимодействиями** (взаимодействиями) и через такую систему будут протекать энергия или вещество и информация от соответствующего источника, носителями, которых являются синтезируемые явления. Эти условия создают основу организации и неравновесных ситуаций, вследствие чего возникает **процесс самоорганизации**. Из-за неустойчивости по отношению к начальным условиям и параметрам в нелинейных системах возникает динамический хаос. Хотя процесс выглядит случайным, но он определяется детерминистическими законами. При использовании синергетической теории управления главными базовыми основами являются следующие:

1. Обмен с внешней средой энергией, веществом и информацией, т.е. система должна быть открытой.
2. Когерентность и кооперативность протекающих процессов.

3. Осуществление нового механизма генерации отрицательных и положительных обратных связей. Такие базовые явления являются новым направлением в КТАУ, формирующим направленную самоорганизацию и динамическую декомпозицию систем на так называемых притягивающих, *инвариантных многообразиях* (ИМ) для достижения желаемых аттракторов – асимптотически устойчивого конечного состояния в их пространстве состояний, где отражаются требуемые технологические режимы систем. Аттрактор – это совокупность точек, к которым притягиваются все близкие траектории движения системы – притягивающие многообразия, причем эта совокупность имеет размерность, меньшую размерности исходной системы.
4. При образовании аттракторов уменьшается *число степеней свободы*, выделяются несколько доминирующих координат, к которым подстраиваются остальные, и происходит динамическая декомпозиция фазового пространства. При этом выделяются параметры порядка – макропеременные, к которым стремятся все остальные координаты.
5. Каждый аттрактор имеет свою область притяжения на границах разделения этих областей. Существенно то, что малое изменение начальных условий вблизи указанной границы может привести к качественным изменениям исходной системы.

Важнейшей областью современной прикладной теории управления является так называемая *физическая теория управления*. При этом необходимо учесть два вида фундаментальных процессов – *обратимые* (согласно Ньютоновской механике), где невозможна эволюция, и *необратимые* термодинамические процессы, способствующие образованию упорядоченных структур с учетом возникших эволюций в направлении увеличения энтропии.

Сюда можно отнести совокупность закономерностей, инвариантов и ограничений процессов управления, связанных физическими законами реального мира.

С другой стороны, в современную теорию управления глубоко проникли идеи и методы нелинейной динамики: бифуркация, аттрактор и т.д.

По этому поводу академик А.А.Красовский отмечает, что «... под физической теорией будем понимать такую теорию управления, которая базируется на фундаменте физических законов, учете ресурсов и приоритетах реального мира». Отличие физической теории управления от абстрактно-математической начинается с математических моделей и критериев систем и процессов управления.

В физической теории модели и критерии создаются в физических (физически значимых, с физическими размерностями) величинах и терминах. Эти модели должны учитывать законы сохранения энергии и другие законы природы и технологии. В абстрактно-математических моделях учет многих ограничений, факторов и закономерностей, как правило, отсутствует. Физическая теория строится так, чтобы заложенные в математических моделях и критериях реальные факторы и ограничения фигурировали и в конечных результатах, определяя границы возможного и невозможного в управлении [3].

Как указывал академик А.А.Красовский, синергетическое управление в этом отношении ближе к реальности, чем все другие постановки проблем в современной тео-

рии управления. Поэтому синергетическое управление сегодня занимает одно из центральных мест в современной теории управления».

Методологическим ядром СТУ является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), разработанный профессором А.А. Колесниковым.

АКАР позволяет организовать синтез законов управления для нелинейных объектов, в том числе многомерных и многосвязных.

АКАР осуществляет двухэтапный алгоритм управления:

На 1-м этапе – асимптотически устойчивые модели объекта сначала стремятся из произвольного начального состояния к *притягивающему многообразию (ПМ)*, затем на 2-м этапе – вдоль ПМ движутся к началу координат фазового пространства. Замечательным является то, что динамика изменения макропеременных описывается дифференциальными уравнениями первого порядка.

Допустим, что система описывается моделью [4] :

$$X(t) = F(x, U, g, J, M), \quad (6)$$

где $x(t)$ – координаты состояния, $U(t)$ – управление, $g(t), M(t), J(t)$ – задающие, внешние и параметрические возмущения.

Для формирования уравнений *самоорганизации* необходимо иметь *расширенную модель* синтеза системы. В этом случае $g(t), J(t), M(t)$ становятся частными решениями некоторых дополнительных дифференциальных уравнений. Закон управления представляет собой проблему поиска взаимодействия между компонентами расширенной системы:

$$U(x_1, \dots, x_2, z_1, \dots, z_r),$$

где z_1, \dots, z_2 – координаты моделей задающих, внешних и параметрических возмущающих воздействий в виде:

$$\dot{Z}(t) = \varphi(x, z). \quad (7)$$

Уравнения (6) и (7) в совокупности и составляют новую модель синергетического синтеза систем управления. Здесь внешние воздействия на объект управления становятся внутренними силами расширенной системы. Только в этой ситуации система является открытой (в термодинамическом смысле), и объект, получая энергию или вещество, будет склонен к неравновесному режиму при наличии большого числа степеней свободы. В системе асимптотическая декомпозиция и редукция осуществляются соотношением:

$$\dim \Sigma = n + r - \lambda m,$$

Где $(n + r)$ – размерность расширенной системы,

m – размерность вектора управления,

λ – число вводимых инвариантных многообразий (ИМ).

При этом первую очередь необходимо создать избыточные степени свободы, а затем редуцировать степени свободы в процессе управления за счет внутреннего взаимодействия связей в направлении понижения размерности ($\psi_1 = 0, \dots, \psi_m = 0$) и далее стремиться к конечному ИМ.

В процессе перехода системы из одного ИМ к другому происходит своего рода «игнорирование» части переменных, число которых равно числу ИМ и $\psi_k = 0$, последовательно (или параллельно) вводимых в процессе синтеза системы управления... Это

есть процесс сжатия пространства состояний. В математическом плане указанный процесс сжатия реализуется путем последовательного вложения друг в друга S интегралов движения замкнутой системы. Так, при **скалярном управлении** ($m = 1$) осуществляется последовательный каскадный переход от одного ИМ к другому:

$$\Psi_1(X_1, \dots, X_n) = 0 \rightarrow \Psi_2(\Psi_1, X_1, \dots, X_{n-1}) = 0 \rightarrow \dots \rightarrow \Psi_s(\Psi_1, \dots, \Psi_{s-1}, X_1, \dots, X_{n-s}) = 0$$

$$S \leq n - 1.$$

В случае же **векторного управления** ($m > 1$) сначала осуществляется параллельное введение совокупности интегралов движения, т.е.

$$\Psi_1(X_1, \dots, X_n) = 0, \dots, \Psi_m(X_1, \dots, X_n) = 0.$$

Далее на пересечении этих ИМ осуществляется аналогично скалярному управлению последовательное вложение интегралов движения друг в друга, т.е.

$$\Psi_{m-1}(X_1, \dots, X_{n-m}) = 0 \rightarrow \Psi_{m+2}(\Psi_{m+1}, X_1, \dots, X_{n-m-1}) = 0 \rightarrow$$

$$\rightarrow \Psi_r(\Psi_{m+1}, \dots, \Psi_{n-m-r}, X_1, \dots, X_{n-m-r}) = 0,$$

$$r \leq n - m - 1.$$

Иначе говоря, при последовательном ($m = 1$) введении интегралов движения образуется **один общий интеграл** $\Psi_s = 0$ – целевое ИМ, а при параллельно-последовательном ($m > 1$) введении образуется m интегралов движения будущей замкнутой системы. [4]

В СТУ в качестве исследуемых объектов рассматриваются **неустойчивые, неравновесные, открытые, когерентные, диссипативные объекты**. Здесь исследуются не только структуры, но и принципы организации, возникновения, развития, самоусложнения или упрощения и разрушения объекта как системы. Появляющиеся точки бифуркации, переходы от порядка к хаосу и наоборот, **наличие отрицательных и положительных обратных связей** способствуют организации нелинейной, неравновесной динамики систем.

Хотя способы и парадигмы использования регуляторов в КТАУ и СТУ различны, они составляют основу синтеза SISO и MIMO динамических систем

Литература

1. Современная прикладная теория управления. Под ред. А.А. Колесникова. Таганрог, 2000, – 400с.
2. Летов А.М. Динамика полета и управление. – М.: Наука.– 1969.
3. Красовский А.А. Проблемы физической теории управления // «Автоматика и телемеханика».–1990.– № 11.
4. Колесников А.А., Кобзев В.А. Динамика полета и управление: синергетический подход. – Таганрог: Изд-во ТТИЮФУ.– 2009. – 198 с.

РЕШЕНИЕ МОДЕЛЬНЫХ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ УРАВНЕНИЯ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ТИПА С ПЕРЕМЕННЫМИ КОЭФФИЦИЕНТАМИ

В статье рассматривается уравнение гиперболического типа, частными случаями которого являются уравнения колебательных процессов, возникающих во многих областях физики, техники, технологии, в природных явлениях – землетрясениях, цунами, т.е. в волновых процессах и других задачах.

Ключевые слова: землетрясение, цунами, уравнение с частными производными, уравнение гиперболического типа.

Введение. Как известно, знание общего решения обыкновенного дифференциального уравнения n -го порядка, содержащего n произвольных постоянных C_1, C_2, \dots, C_n , дает возможность получить любое требуемое частное решение из общего решения при соответствующем выборе этих постоянных.

Для уравнения с частными производными общее решение может быть найдено значительно реже и дело здесь обстоит сложнее. Как мы знаем, простейшее уравнение гиперболического типа $u_{tt} = a^2 u_{xx}$ исследовано Л.Эйлером и Ж.Даламбером, и ими впервые было получено общее решение в виде

$$u(x, t) = f(x + at) + g(x - at),$$

где f и g – произвольные функции своих аргументов.

В дальнейшем вопрос отыскания общих решений тех или иных уравнений с частными производными был предметом исследований многих выдающихся математиков (П.Лаплас, Б.Риман и др.).

Математические модели многих технических и инженерных задач вынуждают рассматривать более общее уравнение гиперболического типа как с постоянными, так и с переменными коэффициентами. Найти общее решение подобных уравнений с помощью ранее известных методов удается редко. В настоящей работе мы используем методы, основанные на простейшей идее.

В некоторых случаях мы обнаружили теснейшую связь между заданным уравнением и его решением в том смысле, что, зная решение, можно восстановить исходное уравнение. Так, например, если известны корни многочлена, то, применяя формулу Виета, можно выразить коэффициенты уравнения через его корни, т.е. можно восстановить исходный многочлен [1]. Далее, можно составить линейную систему обыкновенных дифференциальных уравнений по данной фундаментальной системе ее решений [2]. Аналогичную идею применяем и для уравнений гиперболического типа.

Рассмотрим сумму более общих бегущих волн. Зная решение некоторого уравнения гиперболического типа, постараемся восстановить исходное уравнение.

Постановка задачи. В настоящей работе найдем уравнение гиперболического типа, для которого

$$u(x, t) = \Psi(x) [e^{\beta_1 t} f(\varphi(x) + t) + e^{\beta_2 t} g(\varphi(x) - t)] \quad (1)$$

служит общим решением, где β_1, β_2 – постоянные числа, φ, Ψ, f, g – произвольные, дважды непрерывно дифференцируемые функции, $\varphi'(x) \neq 0, \Psi(x) \neq 0$.

Решение. Допустим, что бегущая волна (1) удовлетворяет некоторому уравнению гиперболического типа

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = a_1 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + a_2 \frac{\partial u}{\partial x} + a_3 \frac{\partial u}{\partial t} + a_4 u, \quad (2)$$

где a_1, a_2, a_3, a_4 – неизвестные функции, подлежащие определению.

Дифференцируя функцию (1), получим

$$u_t = \Psi(x) \{ e^{\beta_1 t} [\beta_1 f(\varphi(x) + t) + f'(\varphi(x) + t)] + e^{\beta_2 t} [\beta_2 g(\varphi(x) - t) - g'(\varphi(x) - t)] \}, \quad (3)$$

$$u_{tt} = \Psi(x) \{ e^{\beta_1 t} [\beta_1^2 f(\varphi(x) + t) + 2\beta_1 f'(\varphi(x) + t) + f''(\varphi(x) + t)] + e^{\beta_2 t} [\beta_2^2 g(\varphi(x) - t) - 2\beta_2 g'(\varphi(x) - t) + g''(\varphi(x) - t)] \}, \quad (4)$$

$$u_x = e^{\beta_1 t} [\Psi'(x) f(\varphi(x) + t) + \Psi(x) \varphi'(x) f'(\varphi(x) + t)] + e^{\beta_2 t} [\Psi'(x) g(\varphi(x) - t) + \Psi(x) \varphi'(x) g'(\varphi(x) - t)], \quad (5)$$

$$u_{xx} = e^{\beta_1 t} \times \{ \varphi''(x) f(\varphi(x) + t) + [\Psi(x) \varphi''(x) + 2\Psi'(x) \varphi'(x)] f'(\varphi(x) + t) + \Psi(x) [\varphi'(x)]^2 f''(\varphi(x) + t) \} + e^{\beta_2 t} \{ \Psi''(x) g(\varphi(x) - t) + [\Psi(x) \varphi''(x) + 2\Psi'(x) \varphi'(x)] g'(\varphi(x) - t) + \Psi(x) [\varphi'(x)]^2 g''(\varphi(x) - t) \}. \quad (6)$$

Где u_t, u_{tt}, u_x, u_{xx} , – частные производные по t, x соответствующего порядка

Подставляя $u(x, t)$ из (1) и производные u_t, u_{tt}, u_x, u_{xx} из (3) – (6) в уравнение (2), получим

$$\begin{aligned} & \Psi(x) \{ e^{\beta_1 t} [\beta_1^2 f(\varphi(x) + t) + 2\beta_1 f'(\varphi(x) + t) + f''(\varphi(x) + t)] + \\ & + e^{\beta_2 t} [\beta_2^2 g(\varphi(x) - t) - 2\beta_2 g'(\varphi(x) - t) + g''(\varphi(x) - t)] \} = \\ & = a_1 \{ e^{\beta_1 t} [\varphi''(x) f(\varphi(x) + t) + [\Psi(x) \varphi''(x) + 2\Psi'(x) \varphi'(x)] f'(\varphi(x) + t) + \\ & + \Psi(x) [\varphi'(x)]^2 f''(\varphi(x) + t)] + \\ & + e^{\beta_2 t} [\Psi''(x) g(\varphi(x) - t) + [\Psi(x) \varphi''(x) + 2\Psi'(x) \varphi'(x)] g'(\varphi(x) - t) + \\ & + \Psi(x) [\varphi'(x)]^2 g''(\varphi(x) - t)] \} + \\ & + a_2 \{ [\Psi'(x) f(\varphi(x) + t) + \Psi(x) \varphi'(x) f'(\varphi(x) + t)] + \\ & + e^{\beta_2 t} [\Psi'(x) g(\varphi(x) - t) + \Psi(x) \varphi'(x) g'(\varphi(x) - t)] \} + \\ & + a_3 \{ \Psi(x) [e^{\beta_1 t} (\beta_1 f(\varphi(x) + t) + f'(\varphi(x) + t)) + e^{\beta_2 t} (\beta_2 g(\varphi(x) - t) - g'(\varphi(x) - t))] \} \\ & + a_4 \{ \Psi(x) [e^{\beta_1 t} f(\varphi(x) + t) + e^{\beta_2 t} g(\varphi(x) - t)] \}. \end{aligned}$$

Приравнивая коэффициенты при $f(\varphi(x) + t), f'(\varphi(x) + t), f''(\varphi(x) + t), g(\varphi(x) - t), g'(\varphi(x) - t), g''(\varphi(x) - t)$ в левых и правых частях полученного равенства, имеем

$$\begin{cases} \beta_1^2 \Psi(x) = a_1 \Psi''(x) + a_2 \Psi'(x) + a_3 \beta_1 \Psi(x) + a_4 \Psi(x), \\ 2\beta_1 \Psi(x) = a_1 [\Psi(x) \varphi''(x) + 2\Psi'(x) \varphi'(x)] + a_2 \Psi(x) \varphi'(x) + a_3 \Psi(x), \\ \Psi(x) = a_1 \Psi(x) [\varphi''(x)]^2, \\ \beta_2^2 \Psi(x) = a_1 \Psi''(x) + a_2 \Psi(x) + a_3 \beta_2 \Psi(x) + a_4 \Psi(x), \\ -2\beta_2 \Psi(x) = a_1 [\Psi(x) \varphi''(x) + 2\Psi'(x) \varphi'(x)] + a_2 \Psi(x) \varphi(x) - a_3 \Psi(x), \\ \Psi(x) = a_1 \Psi(x) [\varphi'(x)]^2. \end{cases}$$

Из этой системы видно, что неизвестные функции a_1, a_2, a_3, a_4 следует определить из следующей системы уравнений:

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{[\varphi'(x)]^2}, \\ 2\beta_1 = \left(\varphi''(x) + 2\varphi'(x) \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)} \right) \cdot \frac{1}{[\varphi'(x)]^2} + a_2 \varphi'(x) + a_3, \\ -2\beta_2 = \left(\varphi''(x) + 2\varphi'(x) \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)} \right) \cdot \frac{1}{[\varphi'(x)]^2} + a_2 \varphi'(x) - a_3, \\ \beta_1^2 = \frac{1}{[\varphi'(x)]^2} \cdot \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)} + a_2 \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)} + a_3 \beta_1 + a_4, \\ \beta_2^2 = \frac{1}{[\varphi'(x)]^2} \cdot \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)} + a_2 \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)} + a_3 \beta_2 + a_4. \end{cases} \quad (7)$$

Из первых трех уравнений системы (7) найдем a_1, a_2, a_3 :

$$\begin{cases} a_1 = \frac{1}{[\varphi'(x)]^2} \\ a_2 = \frac{1}{\varphi'(x)} \left[\left(\beta_1 - \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)} \right) - \left(\beta_2 - \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)} \right) \right] - \frac{\varphi''(x)}{[\varphi'(x)]^3}, \\ a_3 = \beta_1 + \beta_2 = \left(\beta_1 - \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) + \left(\beta_2 + \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) = \text{const.} \end{cases} \quad (8)$$

Используя найденные значения a_1, a_2, a_3 из четвертого уравнения системы (7) найдем a_4 . Тогда, после некоторых вычислений, получим

$$a_4 = - \left\{ \left(\beta_1 - \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) \left(\beta_2 + \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) + \frac{1}{\varphi'(x)} \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) \right\}. \quad (9)$$

Определение a_4 из пятого уравнения из системы (7) также приводит к результату (9), так что система (7) совместна. Таким образом, доказана следующая теорема.

Теорема. Уравнение гиперболического типа

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = & \frac{1}{[\varphi'(x)]^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left\{ \frac{1}{\varphi'(x)} \left[\left(\beta_1 - \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) - \left(\beta_2 - \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) \right] - \frac{\varphi''(x)}{[\varphi'(x)]^3} \right\} \frac{\partial u}{\partial x} \\ & + (\beta_1 + \beta_2) \frac{\partial u}{\partial t} + \left\{ \left(\beta_1 - \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) \left(\beta_2 + \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) + \frac{1}{\varphi'(x)} \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) \right\} \cdot u \end{aligned} \quad (10)$$

допускает общее решение вида (1). Совершенно аналогично можно доказать, что уравнение

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = & \frac{1}{[\varphi'(x)]^2} \cdot \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \left\{ \frac{1}{\varphi'(x)} \left[\left(\beta_1 - \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) - \left(\beta_2 - \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) \right] - \frac{\varphi''(x)}{[\varphi'(x)]^3} \right\} \frac{\partial u}{\partial x} + \\ & + (\beta_1 + \beta_2) \frac{\partial u}{\partial t} + \left\{ \left(\beta_1 - \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) \left(\beta_2 + \frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) + \frac{1}{\varphi'(x)} \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{\Psi'(x)}{\Psi(x)\varphi'(x)} \right) \right\}. \end{aligned}$$

и допускает общее решение вида

$$u(x, t) = e^{\Psi(x)+\beta_1 t} f_1(\varphi(x) + t) + e^{\Psi(x)-C\varphi(x)+\beta_2 t} f_2(\varphi(x) - t).$$

где $\beta_1, \beta_2, \beta_3, C$ – произвольные постоянные числа, φ, Ψ, f_1, f_2 – произвольные, дважды непрерывно дифференцируемые функции своих аргументов, $\varphi'(x) \neq 0$.

Вывод. Выбор величин β_1, β_2, C и функций $\varphi(x), \Psi(x)$ позволяет получить различные уравнения, часто встречающихся в прикладных, технических и инженерных науках.

Литература

1. Окунев Л.Я. Высшая алгебра.– СПб.: Лань.– 2009. – 336 с.
2. Петровский И.Г. Лекции по теории обыкновенных дифференциальных уравнений. М.: МГУ.– 2000.– 212 с.
3. Самойленко А.М., Кривошев С.А. Дифференциальные уравнения. Киев: Высшая школа 1990.– 383 с.
4. Дженалиев М.Т. Краевые задачи для нагруженных параболического и гиперболического уравнений с производными по времени в граничных условиях // Дифференциальные уравнения. – 1992. –Т.28, №4.– С.661–666.
5. Филиппов А.Ф. Введение в теорию дифференциальных уравнений.– М.: КомКнига 2007.– 240 с.
6. Агафонов С.А. Дифференциальные уравнения.– М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана.– 2004.– 348 с.

*Ж.Ш.Шариеналиев, Т.П. Самохвалова. sam_tp@mail.ru
Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР
У.А.Сактанов. sam_tp@mail.ru
Ошский технологический университет. Кыргызстан*

АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ РАЗНОТЕМПОВОГО ОБЪЕКТА, ОСНОВАННЫЙ НА МЕТОДЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Построен упрощенный алгоритм управления линейной разнотемповой системой с сосредоточенными параметрами. Алгоритм основан на методе динамического программирования Р.Беллмана и методе характеристик.

Ключевые слова: полная система, редуцированная система, оптимальное управление, стабилизация, метод характеристик.

Введение. В данной статье изложена разработка и апробация способа расчетов в задачах оптимального управления с обратной связью в рамках метода динамического программирования на примере движения судна на воздушной подушке [1].

В работе [1] модель объекта рассмотрена как разнотемповая, в работе [2] последовательно понижена размерность модели объекта, метод редуцирования использован формально в варианте $\mu > 1$, (вопреки обычному требованию) $\mu \ll 1$, получены 1- и 2-мерные модели. В данной работе в задаче синтеза оптимального управления применяются эти модели, разработан алгоритм управления по приближенному решению уравнения Беллмана методом характеристик [3 – 6]. Предварительная разработка и численные расчеты [7, 8] показали возможность применения предлагаемого алгоритма управления на основе метода характеристик.

1. Постановка задачи.

В работе [1] «путем прогонов программы выбраны подходящие коэффициенты матриц». Основным параметр управления – угол δ_b отклонения аэроулей, управление $u = \delta_b$. Приведем обозначения из [1]: z – линейное боковое смещение корабля на воздушной подушке; σ – приращение путевого угла, введена замена $\sigma = \varphi - \beta$; φ – блок движения рыскания; β – угол дрейфа (скольжения); $\omega_y = \frac{d\varphi}{dt}$ – угловая скорость вращения корабля вокруг вертикальной оси; вектор состояния объекта $x = (z \ \sigma \ \varphi \ \omega_y)^T$, символ $()^T$ – транспонирование.

В данной работе использованы обозначения: $x = (x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4)^T$ – состояние объекта, $x_1 = z$, $x_2 = \sigma$, $x_3 = \varphi$, $x_4 = \omega_y$. Математическую модель движущегося объекта запишем в виде

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

где A, B, x – матрица и вектор-столбцы размерности $n \times n, n \times 1$ соответственно, $t_k = 180$; $bet = 0.01$; $\gamma_1 = 0.5$; $\gamma_2 = 0$; $n = 4$; $u(t)$ – управляющая функция из множества допустимых управлений;

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 47 & 0 & 0 \\ 0.0001 & -0.0138 & 0.0914 & 0.2161 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ -0.0005 & -0.3583 & -0.1084 & -1.4862 \end{pmatrix}; \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.0520 \\ 0 \\ 0.0313 \end{pmatrix}; \quad Q = \begin{pmatrix} 0.0001 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix};$$

$F = Q$; $F(1,1) = 1$. Данная 4-мерная система асимптотически устойчива при $u(t) \equiv 0$.
Корни характеристического уравнения при $u(t) \equiv 0$:

$$\lambda_1 = -1.3694; \quad \lambda_{2,3} = -0.0329 \pm 0.1319i; \quad \lambda_4 = -0.0648.$$

В численных расчетах для удовлетворительного достижения заданного состояния $g(t)$ объекта использована минимизация квадратичного критерия качества

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

где $\gamma_1, \gamma_2, g \geq 0$, $t_k, \beta > 0$ – постоянные.

Оптимальное управление в соответствии с методом динамического программирования Р.Беллмана определяется по формуле

$$u^0(t, x(t)) = -\frac{1}{2\beta} B^T \frac{\partial S(t, x(t))}{\partial x}, \quad (1.3)$$

где $S(t, x_1(t), \dots, x_n(t))$ – функционал Беллмана, сложная функция, $\frac{\partial S}{\partial x} = \left(\frac{\partial S}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial S}{\partial x_n} \right)^T$

– вектор-столбец.

Уравнение Беллмана с обращенным временем t имеет вид

$$\frac{\partial S(t, x(t))}{\partial t} = (Ax)^T \frac{\partial S(t, x(t))}{\partial x} + \gamma_1 (x - g)^T Q (x - g) - \frac{b^2}{4\beta} \left(\frac{\partial S(t, x(t))}{\partial x} \right)^T \frac{\partial S(t, x(t))}{\partial x}, \quad (1.4)$$

начальное условие запишем в виде

$$S(0, x) = \gamma_2 (x(0) - g)^T F (x(0) - g). \quad (1.5)$$

Задача. Найти методом характеристик приближенное решение функционального уравнения Беллмана (1.4), (1.5) в системе с сосредоточенными параметрами (1.1), (1.2).

2. Метод характеристик.

Изложим кратко построение решений дифференциальных уравнений в частных производных первого порядка по методу характеристик, разработанному в [4 – 6].

Пусть дано линейное неоднородное уравнение в частных производных с начальным условием [4 – 6]

$$U_t(t, x) + axU_x(t, x) = f(x), \quad U(0, x) = \varphi(x). \quad (2.1)$$

Составим соответствующее (2.1) однородное уравнение

$$u_t(t, x) + axu_x(t, x) = 0, \quad u(0, x) = \varphi(x). \quad (2.2)$$

Функции $f(x), \varphi(x)$ заданы и удовлетворяют условиям, изложенным в [4], $a = const$, $t, x \in R_1$. Учитывая вид уравнения (2.2), обозначим $P = 1$, $Q = ax$ и составим уравнения характеристик в параметрической форме

$$\frac{dt}{d\tau} = P, \quad \frac{dx}{d\tau} = Q, \quad \tau \in R_1, \quad t|_{\tau=0} = t_0, \quad x|_{\tau=0} = x_0.$$

Запишем уравнение $\frac{dx}{dt} = \frac{Q}{P} = ax$ и, решив его, получим $x = ce^{at}$, где c – постоянная

интегрирования, $c = xe^{-at}$. Решение однородного уравнения (2.2) равно

$$u(t, x) = \varphi(xe^{-at}). \quad (2.3)$$

Далее строится уравнение [4 – 6]

$$p_t(\tau, t, x) + axp_x(\tau, t, x) = 0, \quad p(t, t, x) = x. \quad (2.4)$$

Функция $p(\tau, t, x) = xe^{-a(t-\tau)}$ удовлетворяет (2.4) и является аргументом для построения решения $U(t, x)$ неоднородного уравнения (2.1) [4]:

$$U(t, x) = \varphi(p(0, t, x)) + \int_0^t f(p(s, t, x)) ds. \quad (2.5)$$

В данном случае

$$U(t, x) = \varphi(xe^{-at}) + \int_0^t f(xe^{-a(t-s)}) ds. \quad (2.6)$$

Пусть теперь дано линейное неоднородное уравнение в частных производных первого порядка с двумя переменными x_1, x_2 и с начальным условием:

$$U_t(t, x_1, x_2) + a_1x_1U_{x_1}(t, x_1, x_2) + a_2x_2U_{x_2}(t, x_1, x_2) = f(x_1, x_2), \quad U(0, x_1, x_2) = \varphi(x_1, x_2). \quad (2.7)$$

Составим соответствующее (2.7) однородное уравнение

$$u_t(t, x_1, x_2) + a_1x_1u_{x_1}(t, x_1, x_2) + a_2x_2u_{x_2}(t, x_1, x_2) = 0, \quad u(0, x_1, x_2) = \varphi(x_1, x_2). \quad (2.8)$$

Решением однородного уравнения (2.8) является

$$u(t, x_1, x_2) = \varphi(x_1e^{-a_1t}, x_2e^{-a_2t}). \quad (2.9)$$

Решение неоднородного уравнения (2.7) равно

$$U(t, x_1, x_2) = \varphi(x_1e^{-a_1t}, x_2e^{-a_2t}) + \int_0^t f(x_1e^{-a_1(t-s)}, x_2e^{-a_2(t-s)}) ds. \quad (2.10)$$

3. Линеаризация в одномерной задаче.

При $n = 1$ в одномерной задаче (1.4), (1.5) используем последовательные приближения и линеаризацию. Первое приближение в (1.4) выразим по условию (1.5):

$$S_1(t, x) = \gamma_2 F(x - g)^2. \quad (3.1)$$

По (1.3) запишем первое приближение оптимального управления $u^0(t, x)$ в виде

$$u_1^0(t, x(t)) = -\frac{B}{2\beta} (2\gamma_2 F(x - g)).$$

Дифференцируя $S_1(t, x)$ по x , по (1.4) запишем уравнение для второго приближения

$$\frac{\partial S(t, x(t))}{\partial t} = Ax \frac{\partial S(t, x(t))}{\partial x} + \gamma_1 Q(x - g)^2 - \frac{B^2}{\beta} \gamma_2^2 F^2(x - g)^2$$

с условием (3.1). Последнее уравнение запишем в виде

$$\frac{\partial S(t, x)}{\partial t} - Ax \frac{\partial S(t, x)}{\partial x} = \left(\gamma_1 Q - \frac{B^2}{\beta} \gamma_2^2 F^2 \right) (x - g)^2, \quad S(0, x) = \gamma_2 F(x - g)^2. \quad (3.2)$$

Требуется решить линеаризованное уравнение Беллмана (3.2) относительно второго приближения $S_2(t, x)$. При обозначениях

$$a = -A, \quad k = \gamma_1 Q - \frac{B^2}{\beta} \gamma_2^2 F^2, \quad f(x) = k(x - g)^2, \quad \varphi(x) = \gamma_2 F(x - g)^2, \quad U = S, \quad (3.3)$$

уравнение (3.2) совпадает с (2.1). По формулам (2.5), (2.6) запишем решение (3.2) в новом общем виде

$$S(t, x) = U(t, x) = \varphi(p(0, t, x)) + \int_0^t f(p(s, t, x)) ds. \quad (3.4)$$

В данном случае

$$S(t, x) = \gamma_2 F(xe^{-at} - g)^2 + \int_0^t k(xe^{-a(t-s)} - g)^2 ds. \quad (3.5)$$

По формуле (1.3) запишем второе приближение оптимального синтезирующего управления в новом общем виде

$$u_2^0(t, x(t)) = -\frac{B}{2\beta} \left\{ \varphi'_p(p(0, t, x)) \cdot p'_x(0, t, x) + \int_0^t f'_p(p(s, t, x)) \cdot p'_x(s, t, x) ds \right\}. \quad (3.6)$$

В данном случае

$$u_2^0(t, x(t)) = -\frac{B}{\beta} \left\{ \gamma_2 F(xe^{-at} - g) \cdot e^{-at} + \int_0^t k(xe^{-a(t-s)} - g) \cdot e^{-a(t-s)} ds \right\}. \quad (3.7)$$

Из (3.7) получим

$$\begin{aligned} u_2^0(t, x(t)) &= -\frac{B}{\beta} \left\{ \gamma_2 F(xe^{-at} - g)e^{-at} + k \int_0^t (xe^{-2a(t-s)} - ge^{-a(t-s)}) ds \right\} = \\ &= -\frac{B}{\beta} \left\{ \gamma_2 F(xe^{-at} - g)e^{-at} + kx \frac{1}{2a} (1 - e^{-2at}) - kg \frac{1}{a} (1 - e^{-at}) \right\}. \end{aligned}$$

Отсюда можем записать приближенно-оптимальное управление (3.7) в виде

$$u_2^0(t, x(t)) = k_1(t)x(t) + k_2(t), \quad (3.8)$$

где

$$k_1(t) = -\frac{B}{\beta} \left[\gamma_2 F e^{-2at} + \frac{k}{2a} (1 - e^{-2at}) \right], \quad k_2(t) = \frac{B}{\beta} \left[\gamma_2 F g e^{-at} + \frac{kg}{a} (1 - e^{-at}) \right].$$

В данном примере $a > 0$. Перейдя в коэффициентах (3.8) к пределу, получим коэффициенты стабилизирующего управления

$$\bar{u}_2(x(t)) = \bar{k}_1 x(t) + \bar{k}_2, \quad (3.9)$$

где
$$\bar{k}_1 = \lim_{t \rightarrow \infty} k_1(t) = -\frac{Bk}{2a\beta}, \quad \bar{k}_2 = \lim_{t \rightarrow \infty} k_2(t) = \frac{Bkg}{a\beta}, \quad k = \gamma_1 Q - \frac{B^2}{\beta} \gamma_2^2 F^2.$$

Используя алгоритм (3.9) для управления полной системой (1.1), сравним алгоритм (3.9) с другими алгоритмами управления.

По методу редуцирования в [2] была последовательно понижена размерность системы (1.1), получена одномерная редуцированная система

$$\dot{v}(t) = -0.6110v(t) - 3.7929u(t), \quad v_0 = 6.5. \quad (3.10)$$

Стабилизирующее управление (3.9) для модели (3.10) равно

$$\bar{u}_2(v(t)) = -0.0155v(t) + 3.1038 \cdot 10^{-4}. \quad (3.11)$$

Стабилизирующее управление, полученное в [2] по уравнениям Риккати, равно

$$\bar{u}(v(t)) = -0.0011v(t) + 2.2573 \cdot 10^{-4}. \quad (3.12)$$

Алгоритмы (3.11), (3.12) используем в полной системе (1.1) в виде

$$\bar{u}_2(x(t)) = -0.0155x_1(t) + 3.1038 \times 10^{-4}, \quad (3.13)$$

$$\bar{u}(x_1(t)) = -0.0011x_1(t) + 2.2573 \times 10^{-4}. \quad (3.14)$$

На рис. 1, 2 приведены графики полного стабилизирующего управления $u(x_1(t), x_2(t), x_3(t), x_4(t))$ и линейного бокового смещения $x_1(t)$ полной системы (1.1), $n = 4$. Время управления 180 с.

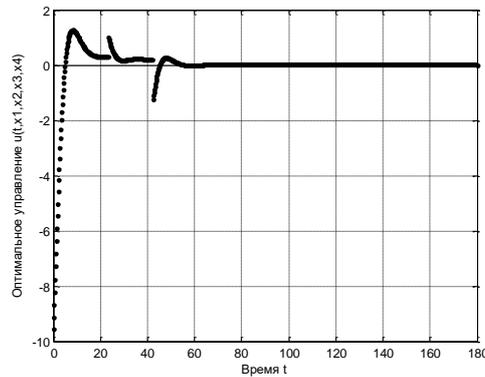


Рис. 1. Полное стабилизирующее управление $u(x(t))$.

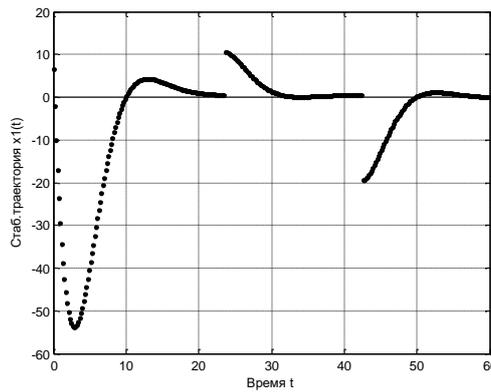


Рис. 2. Компонента $x_1(t)$ при полном управлении $u(x(t))$.

На рис. 3, 4 приведены графики управления $\bar{u}_2(x_1(t))$ (3.13) и линейного бокового смещения $x_1(t)$ полной системы (1.1), $n = 4$.

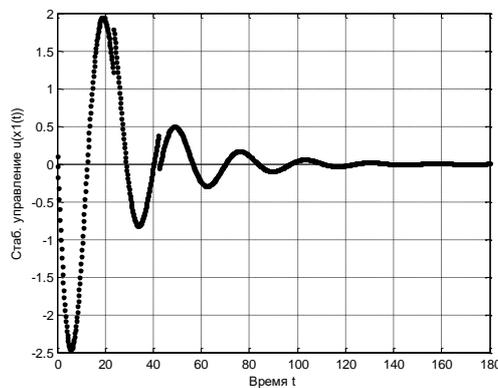


Рис. 3. Стабилизирующее управление $\bar{u}_2(x_1(t))$.

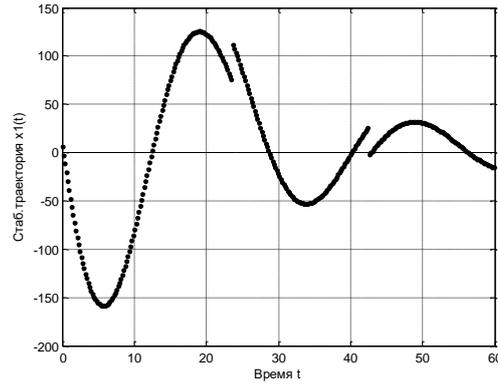


Рис. 4. Компонента $x_1(t)$ при управлении $\bar{u}_2(x_1(t))$.

В таблице 1 приведено сравнение алгоритмов управления.

Таблица 1.

Время приближения к нулю компоненты $x_1(t)$ полной системы (1.1).

Методы решения	$ x_1(t) < 1$	$ x_1(t) < 0.1$	$ x_1(t) < 0.01$	$ x_1(t) < 0.001$	$ x_1(t) < 0.0001$
Метод характеристик $n = 1$; управл. (3.13)		172 с	175 с	–	–
Метод уравнений Риккати $n = 1$; управл. (3.14)	24 с	148 с	> 180 с	–	–
Нулевое управление $u(t) \equiv 0$; $n = 4$	179 с	> 180 с	–	–	–
Оптимальное управление, $n = 4$	9 с	71 с	127 с	170 с	173 с
Стабилизирующее управление, $n = 4$	20 с	71 с	128 с	> 180 с	–

Из таблицы 1 видно, что линеаризованный (3.13) и редуцированный (3.14) одномерные алгоритмы значительно уступают полному оптимальному и полному стабилизирующему алгоритмам и оказывают меньшее влияние на управляемый объект.

Выводы. Рассчитаны различные режимы стабилизации разнотемпового объекта методами редуцирования, линеаризации и характеристик по линейной модели. Получены предварительные результаты численных расчетов.

Литература

1. Козырев В.Г. Асимптотическое приближение закона терминального управления выходом систем с сингулярными возмущениями // XII Всероссийское совещание по проблемам управления (ВСПУ-2014), Москва, 16 – 19 июня 2014. – М.: Ин-т проблем управления РАН, 2014. С. 714 – 724.
2. Шаршеналиев Ж.Ш., Самохвалова Т.П., Сактанов У.А. Приближенные алгоритмы управления движением разнотемпового объекта / Материалы II Междунар. конфер. «Проблемы управления и информационных технологий», 25 – 26 сентября 2015 // Проблемы автоматизации и управления. – 2015. № 1(28). С. 11 – 22.
3. Гюнтер Н.М. Интегрирование уравнений в частных производных первого порядка. – Л.-М.: ОНТИ, 1934.
4. Иманалиев М.И. Нелинейные интегро-дифференциальные уравнения с частными производными. – Бишкек: Илим, 1992. – 112 с.
5. 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.
6. Иманалиев Т.М. Обоснование и развитие метода дополнительного аргумента для решения дифференциальных уравнений в частных производных. Автореферат дисс. на соискание ученой степени д.ф.-м.н. – Бишкек: Изд-во Турар, 2000. – 25 с.
7. Самохвалова Т.П. Приближенное решение уравнения Беллмана методом характеристик // Проблемы автоматизации и управления. – 2016. № 2 (31). С. 51 – 56.
8. Самохвалова Т.П. Приближенное решение уравнения Беллмана / Материалы Международной научной конфер. «Механика твердых, жидких и газообразных сред», посвящ. 80-летию д.ф.-м.н., проф. Я.И. Рудаева, 2 – 3 декабря 2016 // Вестник КРСУ. – 2017. Т. 17. № 1. – С. 52 – 54.

УДК: 621.311.24

*Ш.А. Акчалов, Р.Р. Рыскулов У.Ш. Шукуров, Ш.К. Толукбаев,
У.Б.Аскарбеков. tolukbaev@bk.ru
Институт автоматизи и информационных технологий НАН КР
Бишкек, Кыргызстан*

ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА ЛОПАСТИ ВЕТРОТУРБИНЫ

Рассмотрены силы, действующие на ветротурбину. Показано, что улучшением обтекаемости лопастей и состояния поверхности можно значительно уменьшить силы сопротивления и трения.

Ключевые слова: ветровой поток, обтекаемость, подъемная сила, ветротурбина, угол заклинения, частота вращения.

Введение. Ветровой поток, набега на лопасти ветротурбины (ВТ), приводит их во вращение. ВТ преобразует кинетическую энергию ветра в кинетическую энергию вращения. При этом в зависимости от пространственного положения вала, вращающей силой может быть или сила сопротивления, или подъемная сила. Последняя характеризуется большим коэффициентом мощности, в связи с чем в настоящее время применяются ветроустановки, использующие подъемную силу.

Сила сопротивления, или лобовое сопротивление ВТ, направлена вдоль оси ветрового потока и зависит от силы трения воздуха о поверхность лопасти, от разности давления передней и задней поверхностей лопасти, а также от обтекаемости последней. Поэтому для достижения поставленной цели, т.е. улучшения обтекаемости и уменьшения силы трения о поверхность лопасти, необходимо изучить силы, действующие на лопасти ВТ.

Силы, действующие на лопасти ветротурбины. При обтекании лопасти ветровым потоком слой воздуха в непосредственной близости от поверхности лопасти (пограничный слой) вследствие вязкости затормаживаются, т.е. частицы воздуха прилипают к поверхности лопасти. При этом нарушается ламинарность ветрового потока, и в нем образуются вихри. Это характерно для шероховатой поверхности. Таким образом, величина силы сопротивления зависит от состояния поверхности (гладкая или шероховатая) и обтекаемости лопасти.

Для решения практических задач аэродинамики ветроколеса воспользуемся критерием подобия аэродинамических коэффициентов (лобового сопротивления c_x , подъемной силы c_y), которые зависят не только от формы и углов ориентировки лопасти на ветер, но и от других факторов. При этом достаточно соблюдения приближенного подобия.

В ветроэнергетике ввиду сравнительно небольших скоростей набегающего на ВТ ветра (до 40 м/с) таким критерием является число Рейнольдса (Re), оценивающее вязкость среды

$$Re = \frac{v\iota}{\nu}, \quad (1)$$

где v – скорость ветра, м/с ;

ι – линейные размеры тела, м;

ν – коэффициент кинематической вязкости среды (воздуха), м²/с.

Проведенные опыты показали [1], что при обтекании лопасти ламинарность ветрового потока может сохраняться до достижения критического числа Re , выше которого поток переходит в турбулентный. Коэффициент лобового сопротивления

c_x у лопасти, имеющей турбулентный пограничный слой, значительно выше, чем у лопасти с ламинарным пограничным слоем, т.е. силы трения в первом случае больше, чем во втором.

Лопасть ВТ имеет форму половины разрезанного вдоль цилиндра, имеет выпуклую и вогнутую поверхности (рис.1), и устанавливается вогнутой стороной на ветер.



Рис.1. Форма лопасти.

При обтекании лопасти ветровым потоком скорость потока над лопастью больше, чем под лопастью, т.е. над лопастью пониженное давление, а под лопастью – повышенное. Подъемная сила, действующая на лопасти, образуется за счет сил давления (Y_p) и импульса ($Y_{и}$) [1]

$$Y = Y_p + Y_{и}. \quad (2)$$

Сила давления Y_p определяется уравнением

$$Y_p = \frac{\rho l v \Gamma}{2}, \quad (3)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м³;

l – длина лопасти, м;

Γ – циркуляция скорости, м/с.

Сила импульса $Y_{и}$ определяется формулой

$$Y_{и} = \frac{\rho l v \Gamma}{2}. \quad (4)$$

Подставив формулы (3) и (4) в формулу (2), получаем

$$Y = \frac{\rho l v \Gamma}{2} + \frac{\rho l v \Gamma}{2} = \rho l v \Gamma. \quad (5)$$

Из уравнения (5) видно, что половина подъемной силы обеспечена за счет давления, а половина - за счет импульса.

Подъемная сила Y направлена перпендикулярно ветровому потоку и выполняет полезную работу. Поэтому при конструировании лопастей необходимо, чтобы при работе лопасти давали возможно большую подъемную силу Y и минимальную силу сопротивления X . При работе ветроустановки на лопасти набегают ветровой поток не со скоростью v , с которой дует ветер, а с относительной скоростью W , состоящей из скорости ветра v и окружной (линейной) скорости элемента лопасти ωr .

$$W = \sqrt{\omega^2 r^2 + v^2},$$

где ω – угловая скорость, $\frac{1}{с}$;

r – расстояние элемента лопасти от оси вращения, м.

Относительная скорость W набегания ветрового потока с ростом r возрастает и на конце лопасти имеет максимальное значение, т.е. ВТ работает за счет косо́го удара ветрового потока при движении лопастей перпендикулярно направлению скорости этого потока. Лопасты ВТ закреплены на оси так, что образуют с плоскостью вращения некоторый угол φ , (угол заклинения).

Теоретически установлено и опытным путем подтверждено, что подъемная сила имеет максимальную величину при углах атаки от 2° до 6° в зависимости от профиля лопасти. Для того, чтобы выдерживать наивыгоднейшее значение угла атаки по всей длине лопасти, необходимо уменьшить угол заклинения φ каждого сечения лопасти по мере удаления его от оси вращения. Лопасть, изготовленная с переменным углом заклинения φ , приобретает винтообразную форму [2]. Как показал расчет, угол заклинения φ по мере удаления от оси вращения уменьшается с 14° до $3,5^\circ$.

Мощность, развиваемая миниветроэнергетической установкой. Вследствие асимметричной формы и наклонного расположения лопастей (под углом заклинения φ) относительно ветра, создается подъемная сила значительной величины, и ВТ вращается с большей частотой, развивая большую мощность [3].

Ветровой поток с поперечным сечением S обладает кинетической энергией E

$$E = \frac{mv^2}{2}, \quad (6)$$

где m – масса воздуха, протекающего через поперечное сечение S за одну секунду со скоростью v , т.е.

$$m = \rho S v, \quad (7)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м^3 .

Мощность ветрового потока

$$P = \frac{\rho S v^3}{2}, \quad (8)$$

а мощность P_k , отобранная ветроколесом, определяется отношением произведенной работы к времени, в течение которого совершена работа

$$P_k = \frac{A}{t} = \frac{Fs}{t} = Fv, \quad (9)$$

где A – работа, Дж;

s – перемещение, м;

t – время, сек.

F – сила, Н.

Отношение P_k к P дает коэффициент мощности ветроколеса c_p

$$c_p = \frac{P_k}{P}, \quad (10)$$

или коэффициент использования энергии ветра ξ . Теоретически максимальное значение коэффициента c_p (или ξ) может достигать 0,593. В реальности ветроустановки не достигают этого значения. Современные ветроустановки имеют коэффициент c_p (или ξ) примерно 0,46–0,5.

Как видно из уравнения (5), мощность ветрового потока прямо пропорциональна кубу скорости, а скорость возрастает с ростом высоты над земной поверхностью, поэтому на скорость ветра оказывают очень большое влияние различные препятствия и

рельеф местности. Если препятствия имеют хорошо обтекаемую форму, то при прохождении над препятствиями скорость ветра значительно повышается. Поэтому ВЭУ устанавливаются на такой высоте, где возмущение воздушного потока значительно ослаблено.

Однако, при выборе высоты мачты необходимо учитывать технико-экономические соображения, условия эксплуатации и другие факторы.

Высота мачты ВЭУ рассчитывается по формуле

$$H=h+c+r_b, \quad (11)$$

где h – высота препятствий вблизи ВЭУ, м;
 c – расстояние от вершины препятствия до нижней точки поверхности, ометаемой ВТ, м (принимается $1,5 \div 2$ м)
 r_b – радиус ветроколеса, м
 Мощность ВЭУ в функции скорости определяется по формуле

$$N=N_0\left(\frac{v}{v_0}\right)^3, \quad (12)$$

а в функции высоты мачты

$$N=N_0\left(\frac{H}{H_0}\right)^{0,6}, \quad (13)$$

где N_0 – мощность ВЭУ на высоте H_0 , Вт,
 N – мощность ВЭУ на высоте H , Вт.
 Скорость ветра на высоте H

$$v = v_0\left(\frac{H}{H_0}\right)^{0,2}. \quad (14)$$

Проведенные расчеты показывают, что при скорости ветра $v_0=3$ м/с на высоте $H_0=2$ м на высоте $H=8$ м, согласно уравнению (10), скорость ветра будет равна

$$v = v_0\left(\frac{H}{H_0}\right)^{0,2} = 3\left(\frac{8}{2}\right)^{0,2} = 3 * 1,32 \approx 4 \text{ м/с},$$

а мощность ВЭУ при этом

$$N = N_0\left(\frac{H}{H_0}\right)^{0,6} = N_0\left(\frac{8}{2}\right)^{0,6} = N_0 2,3,$$

т.е. мощность ВЭУ увеличивается как минимум в два с лишним раза. Такой же результат получаем по уравнению (8)

$$N=N_0\left(\frac{v}{v_0}\right)^3=N_0\left(\frac{4}{3}\right)^3 = N_0 2,3.$$

Как было отмечено выше, ВЭУ с горизонтальной осью вращения работает за счет косоугольного удара ветрового потока при движении лопастей перпендикулярно к направлению скорости ветрового потока. При этом ветровой поток с относительной скоростью W действует на лопасть с силой F под углом атаки α . Величина подъемной силы F зависит от угла заклинивания φ лопасти.

Для изучения влияния угла заклинивания на частоту вращения ВТ была определена зависимость частоты вращения ВТ от угла заклинивания φ лопасти (рис 2). Проведенные

измерения показали, что при установке лопастей под углом 0° (прямая 1) относительно плоскости вращения и при скорости ветра 2 м/с частота вращения составляет 0,12 об/с, а при установке под углом 14° (прямая 2) относительно плоскости вращения – 0,21 об/с. Это доказывает, что правильный выбор угла заклинения при постоянном угле атаки ветрового потока позволяет получать большие обороты и значительно большую мощность ветрогенератора.

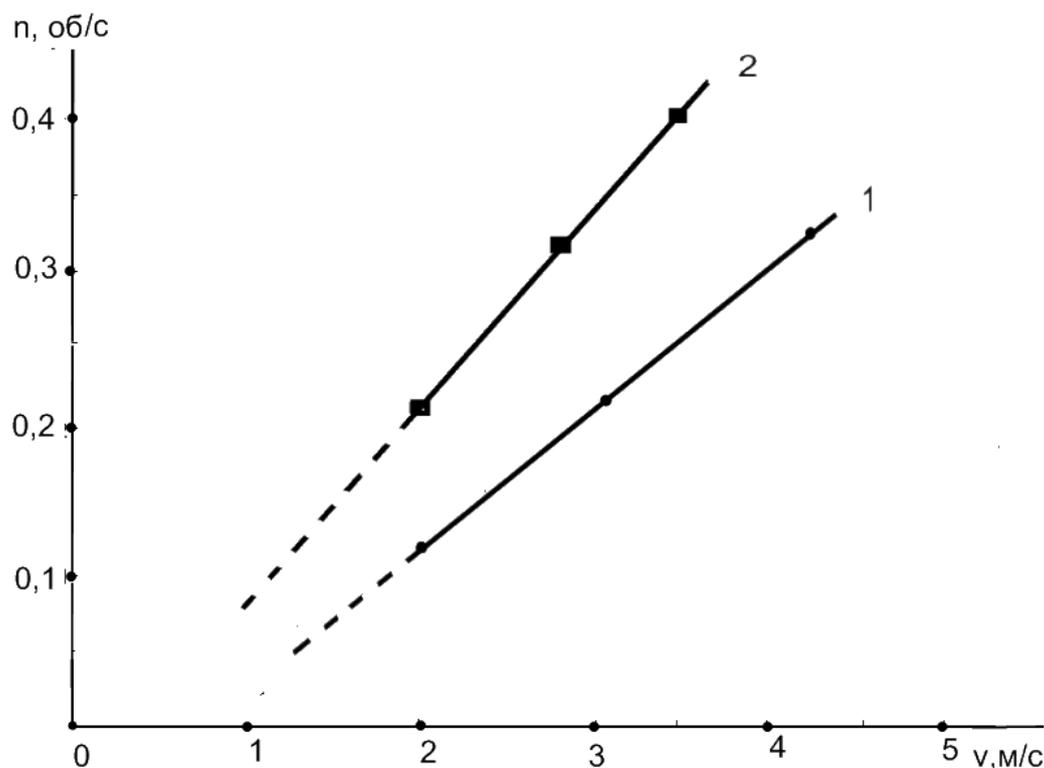


Рис.2. Зависимость частоты вращения ВТ от скорости ветра и угла заклинения.

Таким образом, улучшением обтекаемости лопасти можно добиться значительного уменьшения силы сопротивления, а уменьшением шероховатости поверхности лопастей добиться уменьшения силы трения.

Заключение. Изучение сил, действующих на лопасти, показало, что сила сопротивления, или лобовое сопротивление, ВТ зависит от сил трения воздуха о поверхность лопасти, от обтекаемости лопасти и других факторов. Поэтому лопасти должны иметь обтекаемую каплевидную форму и незначительную шероховатость, в результате чего уменьшается лобовое сопротивление, и ВТ развивает значительно большую мощность.

Литература

1. Фатеев Е.М. Ветро двигатели и ветроустановки. – М.: Сельхоз. изд.–1957.– 536 с.
2. Акчалов Ш.А., Рыскулов Р.Р., Рысмендеева А.Р. Влияние профиля лопастей ветротурбины на вращающий момент ветроустановки // Проблемы автоматизации и управления.– 2014.– №1(26). – С.169–173.
3. Акчалов Ш.А., Рыскулов Р.Р., Толукбаев Ш.К. Динамическая характеристика ветротурбины, работающей при малых скоростях ветра // Проблемы автоматизации и управления.– 2015.– №2(29). – С.90–95.

И.Б. Кошмурзаев – kisb62@gmail.com

Ошский государственный университет, г.Ош, Кыргызстан

О ЕДИНСТВЕННОСТИ РЕШЕНИЯ КРАЕВЫХ ЗАДАЧ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ЧЕТВЕРТОГО ПОРЯДКА С ДВУМЯ НЕЗАВИСИМЫМИ ПЕРЕМЕННЫМИ

Методом положительно определенных интегралов доказаны теоремы единственности решения двух краевых задач для уравнений четвертого порядка с двумя независимыми переменными.

Ключевые слова: краевые задачи, единственность решения, краевые и начальные условия, уравнения в частных производных.

1. Введение. Исследования физики атмосферы, задачи геофизики, динамики однородных и неоднородных жидкостей и ряда других явлений и процессов, происходящих в реальном мире, проводятся с использованием краевых задач для уравнений в частных производных четвертого порядка с двумя независимыми переменными.

В работе рассмотрены вопросы единственности решений краевых задач уравнения четвертого порядка с двумя независимыми переменными.

2. Постановка задачи. Решить задачу в области $D = \{(x, y): 0 < x < l, 0 < y < h\}$ с вершинами $A(0,0)$, $B(l,0)$, $B_0(l,h)$, $A_0(0,h)$ для уравнения

$$L(u) \equiv u_{xxxx} + au_{xxy} + bu_y + cu = f(x, y), \quad (1)$$

где a, b, c, f -заданные гладкие функции, зависящие от двух переменных x и y .

Известно, что для общего уравнения четвертого порядка со старшими производными

$$Au_{xxxx} + Bu_{xxx} + Cu_{xxy} + Du_{xyy} + Eu_{yyy} = f(x, y)$$

уравнение характеристик записывается в виде [1]

$$A(dy)^4 - B(dy)^3 dx + C(dy)^2(dx)^2 - Ddy(dx)^3 + E(dx)^4 = 0.$$

Поэтому уравнение характеристик для уравнения (1) имеет вид

$$-(dy)^3 dx = 0.$$

Отсюда заключаем, что прямая $x = const$ является однократной действительной характеристикой, а прямая $y = const$ – трехкратной действительной характеристикой. Следовательно, граница области D состоит из характеристик уравнения (1), поэтому рассматриваемую область можем назвать характеристическим прямоугольником.

В области D для уравнения (1) изучим следующие задачи.

Задача 1. В области D найти функцию $u(x, y) \in C(\bar{D}) \cap C^{3+1}(D)$, удовлетворяющую уравнению (1), краевым условиям

$$u(0, y) = \varphi_1(y), u_x(0, y) = \varphi_2(y), 0 \leq y \leq h, \quad (2)$$

$$u(l, y) = \varphi_3(y), 0 \leq y \leq h \quad (3)$$

и начальному условию

$$u(x, 0) = \tau(x), 0 \leq x \leq l, \quad (4)$$

где $\varphi_i(y)$ ($i = \overline{1,3}$), $\tau(x)$ - заданные функции, удовлетворяющие условиям гладкости

$$\varphi_i(y) \in C^1[0, h], \tau(x) \in C^3[0, l] \quad (5)$$

и условиям согласования

$$\tau(0) = \varphi_1(0), \tau(l) = \varphi_3(0), \tau'(0) = \varphi_2(0). \quad (6)$$

Задача 2. В области D найти функцию $u(x, y) \in C(\bar{D}) \cap C^{3+1}(D)$, удовлетворяющую уравнению (1), краевым условиям

$$u(0, y) = \varphi_1(y), u(l, y) = \varphi_2(y), u_x(l, y) = \varphi_3(y), 0 \leq y \leq h \quad (7)$$

и начальному условию

$$u(x, 0) = \tau(x), 0 \leq x \leq l, \quad (8)$$

где $\varphi_i(y)$ ($i = \overline{1, 3}$), $\tau(x)$ – заданные функции, удовлетворяющие условиям гладкости

$$\varphi_i(y) \in C^1[0, h], \tau(x) \in C^3[0, l] \quad (9)$$

и условиям согласования

$$\tau(0) = \varphi_1(0), \tau(l) = \varphi_2(0), \tau'(0) = \varphi_3(0). \quad (10)$$

Краевые задачи для уравнений вида (1) рассмотрены в работах [1, 2]. В настоящей работе изучим единственность решений указанных задач.

3. Теорема единственности для задачи 1. Сначала докажем единственность решения задачи 1. Допустим, что существует два решения этой задачи $u_1(x, y)$ и $u_2(x, y)$. Рассмотрим разность $\vartheta(x, y) = u_1(x, y) - u_2(x, y)$. Тогда функция $\vartheta(x, y)$ удовлетворяет однородному уравнению

$$L(\vartheta) \equiv \vartheta_{xxxx} + a\vartheta_{xxy} + b\vartheta_y + c\vartheta = 0, \quad (11)$$

однородным краевым условиям

$$\vartheta(0, y) = 0, \vartheta_x(0, y), \vartheta(l, y) = 0, 0 \leq y \leq h \quad (12)$$

и однородному начальному условию

$$\vartheta(x, 0) = 0, 0 \leq x \leq l. \quad (13)$$

Докажем, что функция $\vartheta(x, y)$ тождественно равна нулю. Для этой цели будем использовать метод положительно определенных интегралов [3]. Суть этого метода заключается в следующем: умножая уравнение (11) на функцию $\vartheta_y(x, y)$ и дважды интегрируя по области D , получим соотношение

$$\iint_D \vartheta_y(x, y) [\vartheta_{xxxx} + a\vartheta_{xxy} + b\vartheta_y + c\vartheta] dx dy = 0. \quad (14)$$

Преобразуем подинтегральные выражения следующим образом:

$$\begin{aligned} \vartheta_y \vartheta_{xxxx} &= \left(\vartheta_y \vartheta_{xxy} - \frac{1}{2} \vartheta_{xy}^2 \right)_x, \\ \vartheta_y \cdot a \vartheta_{xxy} &= \left(a \vartheta_y \vartheta_{xy} - \frac{1}{2} a_x \vartheta_y^2 \right)_x + \frac{1}{2} a_{xx} \vartheta_{xy}^2 - a \vartheta_{xy}^2, \\ \vartheta_y \cdot b \vartheta_y &= b \vartheta_y^2, \quad \vartheta_y \cdot c \vartheta = \frac{1}{2} (c \vartheta^2)_y - \frac{1}{2} c_y \vartheta^2. \end{aligned}$$

Тогда соотношение (14) примет вид

$$\begin{aligned} &\iint_D \left[\left(\vartheta_y \vartheta_{xxy} - \frac{1}{2} \vartheta_{xy}^2 + a \vartheta_y \vartheta_{xy} - \frac{1}{2} a_x \vartheta_y^2 \right)_x - \right. \\ &\left. - \left(-\frac{1}{2} c \cdot \vartheta^2 \right)_y - a \vartheta_{xy}^2 + \left(\frac{1}{2} a_{xx} + b \right) \vartheta_y^2 - \frac{1}{2} c_y \vartheta^2 \right] dx dy = 0 \end{aligned}$$

Отсюда, используя формулу Грина

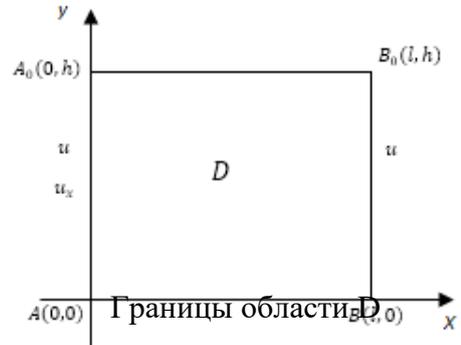
$$\int_{\partial D} P(x, y)dx + Q(x, y)dy = \iint_D \left(\frac{\partial Q}{\partial x} - \frac{\partial P}{\partial y} \right) dx dy$$

получим соотношение:

$$\int_{\partial D} \left(-\frac{1}{2} \right) c \vartheta^2 dx + \left(\vartheta_y \vartheta_{xxy} - \frac{1}{2} \vartheta_{xy}^2 + a \vartheta_y \vartheta_{xy} - \frac{1}{2} a_x \vartheta_y^2 \right) dy + \\ + \iint_D \left[-a \vartheta_{xy}^2 + \left(\frac{1}{2} a_{xx} + b \right) \vartheta_y^2 - \frac{1}{2} c_y \vartheta^2 \right] dx dy = 0. \quad (15)$$

Вычислим криволинейные интегралы области D,

показанной на рисунке:



$$\int_{\partial D} = \int_{AB} + \int_{BB_0} + \int_{B_0A_0} + \int_{A_0A}$$

1). Уравнение границы AB имеет вид

$$y = 0, 0 \leq x \leq l.$$

Тогда $dy=0$.

Следовательно

$$\int_{AB} = \int_0^l \left(-\frac{1}{2} \right) c(x, 0) \vartheta(x, 0) dx = 0,$$

так как по условию (13) $\vartheta(x, 0) = 0, 0 \leq x \leq l$.

2). На отрезке BB_0 имеем $x = l$. Тогда $dx = 0$.

Поэтому

$$\int_{BB_0} = \int_0^h \left[\vartheta_y(l, y) \vartheta_{xxy}(l, y) - \frac{1}{2} \vartheta_{xy}^2(l, y) + a(l, y) \vartheta_y(l, y) \vartheta_{xy}(l, y) - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} a_x(l, y) \vartheta_y^2(l, y) \right] dy.$$

Из третьего условия (12) имеем $\vartheta_y(l, y) = 0, 0 \leq y \leq h$. Тогда из предыдущего соотношения получим

$$\int_{BB_0} = -\frac{1}{2} \int_0^h \vartheta_{xy}^2(l, y) dy.$$

3). На отрезке B_0A_0 $dy = 0$, так как уравнение линии B_0A_0 $y = h$. Учитывая направление интегрирования, из (15) получим:

$$\int_{B_0A_0} = - \int_0^l \left(-\frac{1}{2} \right) c(x, h) \vartheta^2(x, h) dx = -\frac{1}{2} \int_0^l c(x, h) \vartheta^2(x, h) dx.$$

4). Уравнение линии A_0A имеет вид $x = 0$, тогда $dx = 0$. С учетом направления интегрирования имеем

$$\int_{A_0A} = - \int_0^y \left[\vartheta_y(0, y) \vartheta_{xxy}(0, y) - \frac{1}{2} \vartheta_{xy}^2(0, y) + \right. \\ \left. + a(0, y) \vartheta_y(0, y) \vartheta_{xy}(0, y) - \frac{1}{2} a_x(0, y) \vartheta_y^2(0, y) \right] dy.$$

Из первых двух условий (12) следует, что

$$\vartheta_y(0, y) = 0, \quad \vartheta_{xy}(0, y) = 0, \quad 0 \leq y \leq h.$$

Тогда $\int_{A_0A} = 0$.

Объединяя результаты 1) ÷ 4) из (15) получим

$$\frac{1}{2} \int_0^h \vartheta_{xy}^2(l, y) dy + \frac{1}{2} \int_0^l c(x, h) \vartheta^2(x, h) dx + \\ + \iint_D \left[a \vartheta_{xy}^2 - \left(\frac{1}{2} a_{xx} + b \right) \vartheta_y^2 + \frac{1}{2} c_y \vartheta^2 \right] dx dy = 0. \quad (16)$$

Пусть для коэффициентов уравнения (1) выполняются следующие условия:

$$\forall (x, y) \in \bar{D}: a(x, y) \geq 0, \\ \frac{1}{2} a_{xx}(x, y) + b(x, y) \leq 0, \\ c_y(x, y) \geq 0, c(x, h) \geq 0. \quad (17)$$

Тогда все подынтегральные слагаемые в (16) становятся неотрицательными. Поэтому равенство может быть выполнено только лишь при условиях

$$\vartheta_{xy}(l, y) \equiv 0, \vartheta(x, h) \equiv 0, \forall y \in (0, h), \forall x \in (0, l), \\ \vartheta_{xy}(x, y) \equiv 0, \vartheta_y(x, y) \equiv 0, \vartheta(x, y) \equiv 0, \forall (x, y) \in D.$$

Отсюда с учетом условий (10) и (11) заключаем, что

$$\forall (x, y) \in \bar{D}: \vartheta(x, y) \equiv 0.$$

Следовательно, если существует две функции $u_1(x, y)$ и $u_2(x, y)$, удовлетворяющие всем условиям задачи, то при выполнении условий (17) имеем

$$\forall (x, y) \in \bar{D}: u_1(x, y) \equiv u_2(x, y).$$

Таким образом, доказана **теорема 1** единственности для задачи 1. при выполнении условий (5), (6) и (17).

Нетрудно заметить, что множество функций, удовлетворяющих неравенствам (17), не пусто. Например, если

$$a(x, y) = x^2, \quad b(x, y) = -y^2 - 2, \quad c(x, y) = -e^{-2y},$$

то неравенства (17) выполняются.

Уравнение (16) имеет вид

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \int_0^h \vartheta_{xy}^2(l, y) dy + \frac{1}{2} \int_0^l e^{-2h} \vartheta^2(x, h) dx + \\ & + \iint_D [x^2 \vartheta_{xy}^2 + (1 + y^2) \vartheta_y^2 + e^{-2y} \vartheta^2] dx dy = 0 \end{aligned}$$

Отсюда, нетрудно заключить, что $\forall (x, y) \in \bar{D} : \vartheta(x, y) \equiv 0$.

4. Единственность решения задачи 2. Поступая в задаче 2 таким же образом, как и в задаче 1, будем иметь тождество, аналогичное (16):

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} \int_0^h \vartheta_{xy}^2(0, y) dy + \frac{1}{2} \int_0^l c(x, h) \vartheta^2(x, h) dx + \\ & + \iint_D \left[-a \vartheta_{xy}^2 + \left(\frac{1}{2} a_{xx} + b \right) \vartheta_y^2 - \frac{1}{2} c_y \vartheta^2 \right] dx dy = 0. \end{aligned} \quad (18)$$

Отсюда заключаем, что если

$$\begin{cases} \forall (x, y) \in \bar{D}: a(x, y) \leq 0, \\ \frac{1}{2} a_{xx}(x, y) + b(x, y) \geq 0, \\ c_y(x, y) \leq 0, \\ c(x, h) \geq 0, \end{cases} \quad (19)$$

то из (18) будем иметь, что

$$\forall (x, y) \in \bar{D} : \vartheta(x, y) \equiv 0.$$

Это означает, что решение задачи 2 единственно. Таким образом, доказана **теорема 2**, если выполнены условия (9), (10) и (19).

Заключение. В работе методом положительно определенных интегралов доказаны теоремы единственности решений двух краевых задач для уравнений четвертого порядка с частными производными.

Литература

1. Джураев Т.Д., Сопуев А. К теории дифференциальных уравнений в частных производных четвертого порядка. – Ташкент: Фан, 2000. – 144 с.
2. Асылбеков Т.Д. Начально-краевые задачи для гиперболических уравнений четвертого порядка // Дис. к.ф.-м.н.: 01.01.02. – Бишкек, 2003. – 119 с.
3. Смирнов М.М. Уравнения смешанного типа. – М.: Наука, 1970. – 296 с.
4. Тихонов А.Н., Самарский А.А. Уравнения математической физики. – М.: Наука, 1977. – 736 с.

*Г.К. Керимкулова - к.ф.-м.н., Г.О. Аскалиева gulsaat@mail.ru
Институт автоматики и информационных технологий НАН КР
Бишкек, Кыргызстан*

К ОЦЕНКЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОТОКА ВОДЫ МАЛЫХ РЕК ГОРНО-ПРЕДГОРНОЙ ЗОНЫ КЫРГЫЗСТАНА

Введены понятия балластного слоя речных отложений и естественной шероховатости дна водотока. Установлены ограничения применимости O^u профилей скорости воды К. Загустина, логарифмического, Тэйлора-2, Ю.А. Ибад-Заде (приближение «0» и «П») по соответствующим критериям. 5 рассмотренных рек Кыргызстана идентифицированы профилем скорости воды Ю.А. Ибад-Заде (приближение «I») и 3 из них – эллиптическим распределением скорости.

Ключевые слова: слой речных отложений, балластный, естественная шероховатость, профиль скорости воды, ограничения применимости профилей скорости.

Введение. При исследовании материалов некоторых рек Кыргызской Республики (Чон Каинды, Бозшук, Бор Дюбе, Джергалчак, Туюк) [1] с уклонами дна водотока в интервале от 0,037 до 0,063 мы столкнулись с аномально большими значениями ($d_{отл}/H$ от 0,32 до 0,48) толщины слоя речных отложений, которые, на наш взгляд, не могут соответствовать относительной шероховатости дна водотока, участвующей в формировании эмпирического распределения относительной скорости воды по глубине потока. Поэтому этот вопрос нуждается в более тщательном анализе.

Постановка задачи исследований. Общую толщину слоя речных отложений можно представить в виде совокупности двух слоев: первого (нижнего), где элементы речных отложений образуют компактную массу с минимально возможными зазорами между отдельными элементами, куда если и проникает вода, то в малых количествах, и она находится практически в неподвижном состоянии («балластный» слой – условно); второго (верхнего), где отдельные элементы речных отложений располагаются менее компактно (более свободно) с достаточно заметными зазорами между ними, в которых нижний слой потока воды перемещается более свободно по сравнению с «балластным» слоем, поэтому этот верхний слой речных отложений участвует в формировании шероховатости (условно – «естественная» шероховатость) и эмпирического распределения относительной скорости воды по глубине потока.

Толщину «балластного» слоя можно оценить, опираясь на применяемый в практической гидравлике принцип измерения глубины наполнения водотока, отсчет которой ведется от половины высоты выступа шероховатости дна водотока. Согласно этому относительная указанная величина составляет, по крайней мере, 0,2. Поэтому «естественная» шероховатость дна водотока может быть определена по формуле

$$\left(\frac{d_{отл}}{H}\right)_e = \left(\frac{d_{отл}}{H}\right)_и - 0,2, \quad (1)$$

где $d_{отл}$ – средний диаметр русловых отложений, м; H – глубина наполнения водотока, м; индекс «е» – означает принадлежность соответствующих характеристик к «естественной» шероховатости, «и» – к исходной (общей) толщине слоя речных отложений.

Задача исследований. Провести оценку основных кинематических параметров

упомянутых водотоков на основе введенного понятия «естественной» шероховатости дна водотока и осуществить анализ полученных результатов.

Решение поставленной задачи. Восстановленные исходные данные по указанным объектам и значения отношения динамической скорости к максимальной приведены в таблицах 1, 2 и 3 соответственно.

Таблица 1

Исходная информация (5 рек Кыргызстана)

Река	Средне-годовой расход воды $Q_{\text{ср,год}}$, $\text{м}^3/\text{с}$	Уклон дна водотока i	Глубина наполнения водотока H , м	Средний диаметр русловых отложений $d_{\text{отл}}$, м	Толщина слоя речных отложений $\left(\frac{d_{\text{отл}}}{H}\right)_и$	Средняя скорость воды \bar{u} , м/с
Чон Каинды (с)	2,0	0,0370	0,40	0,167	0,42	0,80
Бозшук (м)	2,2	0,0540	0,41	0,167	0,41	0,85
Бор Дюбе (м)	1,1	0,0630	0,37	0,176	0,48	0,75
Джергалчак (м)	2,1	0,0450	0,40	0,138	0,34	0,85
Туюк (м)	2,2	0,0430	0,41	0,132	0,32	0,85

Примечание: в первой графе индекс «с» – средняя река, «м» – малая река.

На первом этапе анализа (сравнение эмпирических и расчетных значений средней по сечению потока скорости воды) – (табл. 4) выявляются отрицательные расчетные значения указанного параметра по профилю К. Загустина.

Обратимся к формуле для средней скорости воды по К. Загустину

$$\bar{u} = u_m \cdot \int_0^1 \left[1 - \frac{2 \cdot u_*}{\kappa \cdot u_m} \cdot \arctg \left(\frac{1 - \tilde{y}}{\tilde{y}} \right)^{\frac{3}{2}} \right] \cdot d\tilde{y}, \quad (2)$$

где u_m – максимальная скорость потока, м/с; κ – параметр Кармана; u_* – динамическая скорость водного потока, м/с; \tilde{y} – относительная вертикальная координата.

Проанализируем вычитаемое подынтегральной функции

$$\frac{2 \cdot u_*}{\kappa \cdot u_m} \cdot \arctg \left(\frac{1 - \tilde{y}}{\tilde{y}} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (3)$$

Из формулы (2) следует, что условием положительности подынтегральной функции является неравенство

$$5 \cdot \frac{u_*}{u_m} \cdot \arctg \left(\frac{1 - \tilde{y}}{\tilde{y}} \right)^{\frac{3}{2}} \leq 1, \quad (4)$$

и прогнозируемое значение отношения $\frac{u_*}{u_m}$ примет вид

$$\frac{u_*}{u_m} \leq \frac{1}{5 \cdot \arctg \left(\frac{1 - \tilde{y}}{\tilde{y}} \right)^{\frac{3}{2}}}. \quad (5)$$

Таблица 2

Восстановленные значения параметров и характеристик 5 рек Кыргызстана

Река	$\left(\frac{d_{отп}}{H}\right)_и$	$\left(\frac{d_{отп}}{H}\right)_е$	C_2^e , м ^{1/2} /с	$C_1^и$, м ^{1/2} /с	C_{cp}^e , м ^{1/2} /с	$m(C_{cp}^e)$	$m_1(C_{cp}^e)$, м ^{1/2} /с	u_M , м/с	$(u_d / u_M)_e$		
									«0»	«I»	«II»
Чон Каинды	0,42	0,22	25	9	17,0	3,2	8,95	1,09	0,04	0,01	0,10
Бозщук	0,41	0,21	26	8	17,0	3,2	8,95	1,15	0,10	0,02	0,14
Бор Дюбе	0,48	0,28	23	8	15,5	3,0	8,43	1,02	0,10	0,02	0,14
Джергалчак	0,34	0,14	28	9	18,5	3,4	9,48	1,15	0,08	0,0003	0,12
Туюк	0,32	0,12	30	9	19,5	3,4	9,83	1,15	0,09	0,005	0,12

Таблица 3

Значения отношения $\frac{u_*}{u_M}$ для выбранной группы объектов

Река	i	H, м	u_* , м/с	u_M , м/с	$\frac{u_*}{u_M}$
Чон Каинды (с)	0,0370	0,40	0,38	1,09	0,350
Бозщук (м)	0,0540	0,41	0,47	1,15	0,407
Бор Дюбе (м)	0,0630	0,37	0,44	1,02	0,432
Джергалчак (м)	0,0450	0,40	0,42	1,15	0,364
Туюк (м)	0,0430	0,41	0,42	1,15	0,364

Таблица 4

Сравнение \bar{u}^s с \bar{u}^p для выбранной группы объектов

Река	\bar{u}^s , м/с	Расчетная средняя скор., м/с									
		параб.	$\Delta\bar{u},\%$	элл.	$\Delta\bar{u},\%$	логар.	$\Delta\bar{u},\%$	К.Заг.	$\Delta\bar{u},\%$	И-3 «0»	$\Delta\bar{u},\%$
Чон Каинды	0,80	0,58	27,0	0,69	13,4	0,73	8,87	-0,32	60,4	0,74	7,35
Бозшук	0,85	0,62	27,0	0,74	13,4	0,77	8,87	-0,55	35,8	0,85	0
Бор Дюбе	0,75	0,53	29,1	0,67	10,5	0,67	10,3	-0,49	35,0	0,76	-1,30
Джергалчак	0,85	0,64	25,2	0,71	15,9	0,78	7,67	-0,44	47,7	0,82	3,84
Туюк	0,85	0,65	24,1	0,70	17,4	0,79	6,98	-0,47	45,0	0,83	2,64

Продолжение табл.4

Река	\bar{u}^s , м/с	Расчетная средняя скор., м/с									
		Ю.А. Ибад-Заде				Карман	$\Delta\bar{u},\%$	Т-1	$\Delta\bar{u},\%$	Т- 2	$\Delta\bar{u},\%$
		«I»	$\Delta\bar{u},\%$	«II»	$\Delta\bar{u},\%$						
Чон Каинды	0,80	0,85	-5,99	0,98	-22,8	0,51	36,8	0,44	45,2	0,84	-5,08
Бозшук	0,85	0,95	-11,6	1,12	-31,2	0,48	44,0	0,39	54,5	0,85	0
Бор Дюбе	0,75	0,85	-13,0	1,00	-32,8	0,43	42,9	0,38	49,5	0,75	0
Джергалчак	0,85	0,91	-7,57	1,08	-26,6	0,48	43,3	0,36	57,5	0,87	-2,26
Туюк	0,85	0,92	-8,55	1,09	-27,9	0,46	46,1	0,32	62,7	0,86	-1,22

Оценим значения упомянутого отношения для отдельных точек по вертикали потока

➤ $\tilde{y} = 0$ (дно потока)

$$\frac{u_*}{u_m} \leq 0,314;$$

➤ $\tilde{y} = 0,5$ (середина потока)

$$\frac{u_*}{u_m} \leq 0,157;$$

➤ $\tilde{y} = 1$ (поверхность потока)

$$\frac{u_*}{u_m} \leq \infty.$$

Сравнив фактические значения $\frac{u_*}{u_m}$ (табл. 3) с прогнозируемыми, установим, что

для

➤ $\tilde{y} = 0$, $\frac{u_*}{u_m}(\phi) = 0,350 \dots 0,432 > \frac{u_*}{u_m}(\pi)$, следовательно, в этой точке средняя

скорость отрицательна ($\bar{u} < 0$);

➤ $\tilde{y} = 0,5$, $\frac{u_*}{u_m}(\phi) > \frac{u_*}{u_m}(\pi)$, т.е. в этой точке также $\bar{u} < 0$;

➤ $\tilde{y} = 1$, $\frac{u_*}{u_m}(\pi) \leq \infty$, т.е. в этом случае средняя скорость может быть и отри-

цательной, и положительной, и равной нулю.

Следовательно, профиль скорости К. Загустина для условий рассматриваемых объектов применять не имеет физического смысла.

На втором этапе анализа (сравнение расчета и эксперимента по распределениям скорости воды) выявлены следующие факты:

➤ для логарифмического распределения скорости воды по глубине потока установлены (как и следовало ожидать) отрицательные значения относительной скорости воды в нижней части потока;

➤ для профиля скорости Тэйлора-2 также выявлено подобное обстоятельство;

➤ для приближений «0», «II» распределения Ю.А. Ибад-Заде вид полученных расчетных профилей отличается от их реального типа.

Из выражения логарифмического профиля

$$\tilde{u}(\tilde{y}) = 1 + \frac{u_*}{k \cdot u_m} \cdot \ln \tilde{y} \quad (6)$$

следует, что условием положительности относительной скорости воды является

$$\frac{u_*}{u_m} \leq \frac{1}{2,5 \cdot |\ln \tilde{y}|}. \quad (7)$$

Аналогично для распределения Тэйлора-2

$$\tilde{u}(\tilde{y}) = -4,15 \cdot \frac{u_*}{u_m} \cdot \left\{ \arcsin \sqrt{1 - \tilde{y}} - \sqrt{\tilde{y}} \cdot \sqrt{1 - \tilde{y}} \right\} + 1 \quad (8)$$

следует, что условие положительности скорости имеет вид

$$\frac{u_*}{u_m} \leq \frac{1}{4,15 \cdot \left\{ \arcsin \sqrt{1 - \tilde{y}} - \sqrt{\tilde{y}} \cdot \sqrt{1 - \tilde{y}} \right\}}. \quad (9)$$

Произведем вычисления по формулам (7) и (9) – табл. 5

Таблица 5

Прогнозируемые значения $\frac{u_*}{u_m}$ для логарифмики (7) и распределения скорости по профилю Тэйлора-2 (9)

\tilde{y}	$\frac{u_*}{u_m}$ по условию (7)	$\frac{u_*}{u_m}$ по условию (9)
0,1	0,174	0,254
0,2	0,249	0,341
0,3	0,332	0,452
0,4	0,437	0,608
0,5	0,577	0,844
0,6	0,783	1,237
0,7	1,121	1,985
0,8	1,793	3,786
0,9	3,796	11,08

Из сравнения фактических значений $\frac{u_*}{u_m}$ (табл. 3) с прогнозируемыми действительно видно, что скорости воды в нижней части потока отрицательны.

Определим границу \tilde{y}_r между положительными и отрицательными значениями относительной скорости воды по формулам логарифмики (7) и по профилю Тейлора 2 (9).

Результаты расчетов приведены в табл.6.

Таблица 6

Граничные значения между отрицательными и положительными относительными скоростями воды для выбранной группы объектов

Чон Каинды	Бозщук	Бор Дюбе	Джергалчак	Туюк
\tilde{y}_r по условию (10)				
0,32	0,37	0,40	0,33	0,33
\tilde{y}_r по условию (11)				
0,21	0,26	0,29	0,22	0,22

Указанные данные подтверждают выявленные обстоятельства.

Интересно отметить, что (ср. данные табл.4 и 6) для упомянутых профилей скорости воды достаточно неплохие отклонения расчета от эксперимента по средней скорости сочетаются с неудовлетворительными отклонениями по распределениям скорости, а ни логарифмика, ни профиль Тэйлора-2 не проходят через этап дополнительных физических ограничений [2], т.к. они не удовлетворяют ограничениям на отклонения расчета от эксперимента в придонной части потока (по относительной скорости воды).

Что касается рекомендуемого к применению приближения профилей Ю.А. Ибад-Заде (рис. 1), то оказалось, что минимум отношения $\frac{u_d}{u_m}$ соответствует именно приближению «I» рассматриваемого распределения.

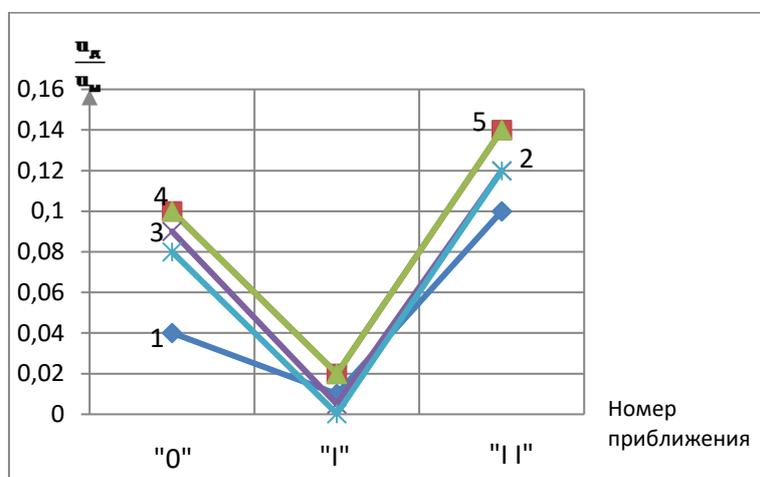


Рис.1. Схема выбора приближения профиля Ю.А. Ибад-Заде, соответствующего реальному распределению относительной скорости воды (реки: 1 – Чон Каинды, 2 – Джергалчак, 3 – Туук, 4 – Бозшук, 5 – Бор Дюбе).

Обсуждение полученных результатов. Примененная нетрадиционная идентификация параметров водотока примечательна, в частности, тем, что на отдельных ее этапах проводимые операции (расчеты необходимых параметров, сравнение расчета с экспериментом, анализ результатов вычислений и отбор профилей, рекомендуемых к применению на последующих этапах идентификации) основаны на новых или вновь выявленных факторах, которые выступают в качестве критериев проводимого анализа. Так, например, введенные нами понятия балластного слоя речных отложений и естественной шероховатости (участвующей в формировании шероховатости дна водотока и эмпирического распределения скорости воды по ее глубине) позволяют (см. например табл. 2) обоснованным образом восстановить значения недостающих кинематических параметров и характеристик потока воды. Также на предварительном этапе учтены следующие обстоятельства:

- максимальная скорость воды оценена согласно показательному профилю скорости воды, который принимается за эмпирическое ее распределение и поэтому указанный профиль изымается из обоймы расчетных распределений;
- аналогично остается за рамками анализа профиль скорости Доу Го-женя, так как для рассматриваемых объектов не выполняется ограничение модели O^{II} ($10 < C/\sqrt{g} < 30$).

Установленные нами в процессе проведения идентификации ограничения, которые – являются вновь выявляемыми факторами применимости для анализа отдельных профилей скорости воды необходимо использовать на предварительном этапе идентификации. В этом случае сразу отсеиваются профиль К. Загустина (в связи с отрицательностью средней скорости воды), распределения логарифмическое и Тэйлора-2 (в связи с отрицательностью относительной скорости воды в придонной части потока), приближения «0» и «II» распределения Ю.А. Ибад-Заде (в связи с их неудовлетворительным видом распределения скорости по вертикальной координате).

Следовательно, к идентификации допускаются лишь 25 вариантов данных (число объектов × количество рекомендуемых распределений).

Кстати, установленное нами ограничение модели O^u , касающееся применимости отдельных распределений скорости воды, связано с:

- видом самих профилей и применяемыми условиями рассматриваемых объектов (профили К. Загустина, Тэйлора-2);
- видом профиля скорости воды – логарифмика (дает отрицательные значения ее в придонной части потока практически для любых условий анализируемых объектов);
- видом приближений «0» и «II» распределения Ю.А. Ибад-Заде, которые приводят к возникновению существенного заглупления (от 0,6 до 0,4 глубины наполнения – отсчет от дна водотока) максимальной скорости воды. Это может быть связано с появлением поперечных циркуляций, хотя подобное в прямолинейном потоке воды достаточно проблематично и требует серьезной эмпирической проверки.

Кроме того, подобно установленному нами в работе [3, с.42] имеют место случаи, когда отсеянные на каком – либо этапе анализа расчетные распределения скорости воды «реабилитируются» на последующем этапе. Согласно табл.4 для рек: Чон Каинды, Бозшук и Бор Дюбе отклонения расчетной средней скорости воды по эллиптической зависимости не превышают 3% ограничения метода O_1 . На втором этапе анализа отклонения расчетного эллиптического распределения от эмпирического почти вдвое меньше ограничения метода O_2 . А на третьем этапе анализа суммарные отклонения для указанных случаев меньше ограничения метода O_3 . Поэтому отсеянные ранее упомянутые 3 варианта данных должны быть «восстановлены» в своих правах.

В результате все 5 рассмотренных рек идентифицированы профилем скорости Ю.А. Ибад-Заде (приближение «I»), который имеет вид [4]:

$$\tilde{u}(\tilde{y}) = 1 + A_4 \cdot (1 - \tilde{y}) + A_5 \cdot (1 - \tilde{y})^2 - 0,67 \cdot \frac{m_1}{\sqrt{g}} \cdot \frac{u_*}{u_m} \cdot (1 - \tilde{y})^3, \quad (10)$$

где $A_4 = 1,107 \cdot \frac{m_1}{\sqrt{g}} \cdot \frac{u_*}{u_m} - 0,67 \cdot \left(1 - \frac{u_d}{u_m}\right)$, $A_5 = -\left[0,447 \cdot \frac{m_1}{\sqrt{g}} \cdot \frac{u_*}{u_m} + 0,34 \cdot \left(1 - \frac{u_d}{u_m}\right)\right]$, коэффициенты

приведены в таблице 7, а сами распределения показали на рис. 2. Следует отметить, что некоторые отклонения указанного профиля от реального распределения лежат в пределах погрешности ($\leq 10\%$) измерений скорости воды в отдельных точках ее потока [5, с. 85].

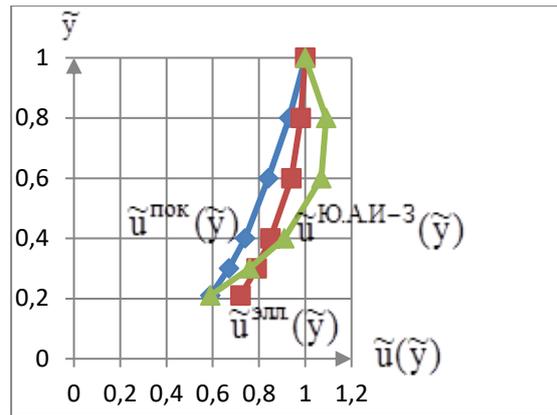
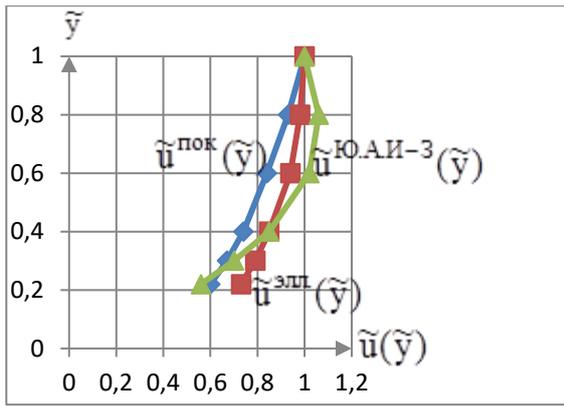
Таблица 7

Коэффициенты A_4 и A_5 к профилю Ю.А. Ибад-Заде

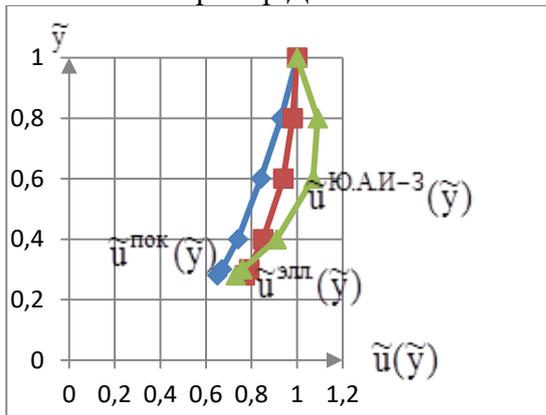
Река	A_4	A_5
Чон Каинды	0,47	-0,79
Бозшук	0,66	-0,86
Бор Дюбе	0,64	-0,85
Джергалчак	0,59	-0,85
Туюк	0,65	-0,87

р. Чон Каинды

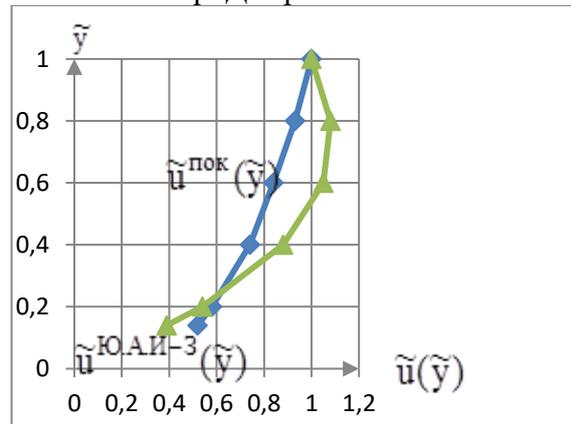
р. Бозшук



р. Бор Дюбе



р. Джергалчак



р. Гуюк

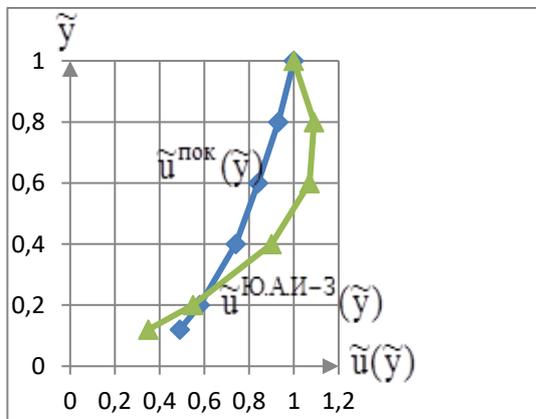


Рис.2. Идентифицированные объекты исследования по распределениям относительной скорости воды: $\tilde{u}^{\text{пок}}(\tilde{y})$ – показательный профиль; $\tilde{u}^{\text{элл}}(\tilde{y})$ – эллиптическое распределение скорости; $\tilde{u}^{\text{Ю.А.И-3}}(\tilde{y})$ – распределение скорости по Ю.А. Ибад-Заде (приближение «I»).

Помимо того 3 объекта из рассмотренных идентифицированы эллиптическим профилем скорости (рис. 2).

В случае необходимости определения наносных характеристик потока идентифицированные объекты описываются диффузионной расчетной схемой наносных характеристик потока.

Заключение. Введены понятия балластного слоя речных отложений и естественной шероховатости дна водотока, участвующих в формировании эмпирического распределения скорости воды по глубине потока.

Установлены ограничения применимости O^u профилей скорости воды К. Загустина, логарифмического, Тэйлора-2, Ю.А. Ибад-Заде (приближение «0» и «Ш») по соответствующим критериям.

Идентифицированы 5 рассмотренных рек Кыргызстана профилем скорости воды по Ю.А. Ибад-Заде (приближение «I») и 3 из них – эллиптическим распределением скорости.

Литература

1. Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О. «О границе применимости показательного профиля мутности воды Е.В. Клевцова» // Информатика и системы управления. – 2017 (в печати).
2. Пресняков К.А. О возможностях дополнительных (физических) ограничений модели нетрадиционной идентификации режимных параметров открытых водотоков // «Проблемы автоматизации и управления». – 2015. – №1(28). – С.197-201.
3. Пресняков К.А., Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О. Река Теджен как объект нетрадиционной идентификации в вариантах изученного и частично изученного водотока // Материалы X Международного симпозиума «Фундаментальные и прикладные проблемы науки». – РАН г. Москва, 2015. – С.37-45.
4. Аскалиева Г.О., Турдумамбетова Э.Б. Преобразование соотношений Ю.А. Ибад-Заде для скорости и мутности потока воды к компактному виду // «Проблемы автоматизации и управления». – 2013. – №1(24). – С. 46–51.
5. Пресняков К.А. Разработка технических средств и устройств гидроавтоматики для очистки воды от наносов: Под. науч. ред. д.т.н., проф., акад. НАН КР Ж.Ш. Шаршеналиева. – Бишкек: Илим, 2009. – 306 с.

Алыбаев Н. К. e mail: atomkg@mail.ru

ОАО “Жалалабатэлектро”, г Жалал-Абад, Кыргызстан.

СОСТАВЛЕНИЕ ВОДНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО БАЛАНСА И ЕГО ПРОГНОЗИРОВАНИЕ

Приведен анализ притока воды в Токтогульское водохранилище. Отмечено, что не наблюдается закономерности притока. Следовательно, для прогнозирования выработки электроэнергии на предстоящие периоды недостаточно имеющейся информации. Предпринята попытка составления уравнения водно-энергетического баланса, приведены таблицы выработки электроэнергии каскадами Токтогульских ГЭС.

Ключевые слова: объем притока, прогнозирование, водно-энергетический баланс, средние значения, потребление электроэнергии.

Для полного понимания водно-энергетического баланса и прогнозирования выработки электроэнергии необходимо рассмотреть месторасположение каскада гидроэлектростанций (ГЭС) в Кыргызстане, которые построены на реке Нарын. Схема расположения ГЭС приведена на рис.1.

Естественно, электроэнергетическая безопасность Кыргызстана напрямую связана с объемом воды в Токтогульском водохранилище, зависящем от соотношения двух параметров: объема естественного притока воды в водохранилище и объема воды, используемой на выработку электроэнергии на Токтогульской ГЭС.

Согласно проектным гидрологическим исследованиям, питание реки Нарын снегово-ледниковое, поэтому объем притока воды в Токтогульское водохранилище полностью зависит от количества осадков (снег, ледники), накопившихся в водосборном бассейне реки Нарын в течение зимнего периода. Площадь водосбора реки Нарын в створе Токтогульской ГЭС составляет 52 500 км², а среднемноголетний годовой объем стока воды в Токтогульское водохранилище равен 12,48 млрд.м³, что составляет 30% от стока реки Сырдарья. Период половодья реки Нарын проходит с апреля по сентябрь, и на него приходится 3/4 годового стока воды.[1]

При рассмотрении объема притока воды в Токтогульское водохранилище с 1988 года по 2014 годы общая закономерность не проявляется, то есть имеющаяся информация недостаточна для прогнозирования накопления воды на предстоящий период.[2]

На рис.2. представлен график изменения объема воды в Токтогульском водохранилище за период с 1988 по 2014 год.

При прогнозировании водно-энергетического баланса на предстоящий период энергетики исходят из средних значений либо значений предыдущего периода, что приводит к неточным результатам и к принятию нерезультативных мер на долгосрочные периоды.

Например, можно рассмотреть фактический водно-энергетический баланс с 2010 года по 2014 год, когда 2010 год был аномально многоводным и годовой объем притока воды в Токтогульское водохранилище составил 19,0 млрд. м³(153% от норм).



Рис. 1. Схема расположения каскада ГЭС на р. Нарын.

Следовательно, во избежание аварийного переполнения и холостых сбросов воды Токтогульского водохранилища необходимо учитывать минимальное внутреннее потребление электроэнергии в вегетационный период (в апреле-сентябре составляет 1/3 от годового потребления), и осуществлять экспорт электроэнергии.

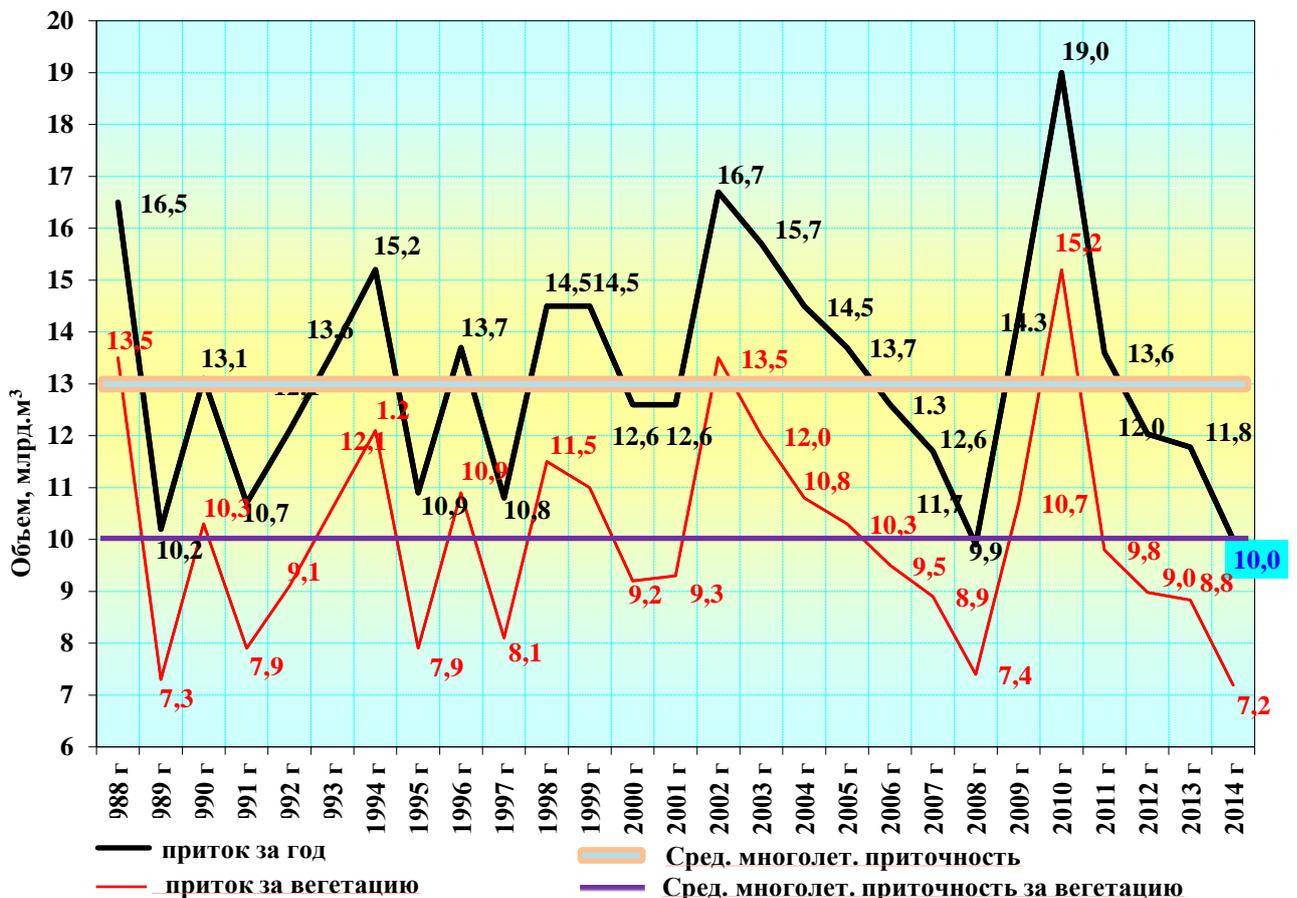


Рис.2. График изменения объема воды в Токтогульском водохранилище за период с 1988 по 2014 год.

На 1 января 2011 года объем воды в Токтогульском водохранилище составил 18,2 млрд. м³, так что был произведен экспорт электроэнергии в объеме 2,634 млрд. кВтч, что позволило к началу октября 2011 года довести объем воды в Токтогульском водохранилище до 19,546 млрд. м³, максимально возможного уровня, то есть объем воды в водохранилище был предельным к началу осенне-зимнего отопительного периода (ОЗП). Средства на приобретение топлива для ТЭЦ г. Бишкек на ОЗП 2012/2013 гг. решено было получить от экспорта электроэнергии Токтогульской ГЭС.

На начало 2012 года объем воды в Токтогульском водохранилище составил 17,3 млрд. м³. В расчетах для удержания объема воды были приняты значения притока воды и внутреннее потребление электроэнергии на уровне 2011 года, однако фактический приток составил 12,0 млрд. м³, а внутреннее потребление электроэнергии повысилось на 1 178,5 млн. кВтч. Это потребовало увеличения попусков воды на выработку электроэнергии больше, чем планировалось, но объем воды на начало октября составил 17,5 млрд. м³, что явилось достаточным для прохождения ОЗП 2012/2013г.

В 2013 году, учитывая опыт прежних лет, объем экспорта электроэнергии был уменьшен до 375 млн. кВтч, что в 4 раза меньше объема 2012 года. При этом, к началу ОЗП 2013/2014 г.г., то есть на начало октября, объем воды в Токтогульском водохранилище составил 16,0 млрд. м³.

В 2014 году приточность составила 10,0 млрд. м³, и была самой низкой за последние 26 лет. Внутреннее потребление в 2014 году по сравнению с 2013 годом выросло на 1,2 млрд кВтч. В результате по завершении ОЗП 2013/2014г. объем воды в Токтогульском водохранилище составил 9,0 млрд. м³, а к началу ОЗП 2014/2015гг. составил 11,9 млрд. м³.

В таблице 1 представлен водный баланс по годам с 2010 по 2014 года [3].

Таблица 1. Водный баланс Токтогульского водохранилища за период с 2010 по 2014г.г.

Годы	Объем на 1 января, млрд. м ³	Приток за год, млрд. м ³	Расход за год, млрд. м ³	Объем на 1 января следующего года, млрд. м ³	Внутреннее потребление, млн. кВтч	Экспорт, млн. кВтч	Импорт, млн. кВтч
2010	11,677	19,038	12,522	18,193	8827,5	1469	0
2011	18,193	13,524	14,466	17,251	10501,5	2634	0
2012	17,251	12,035	14,334	14,952	11680,0	1502	0
2013	14,952	11,783	13,304	13,431	11948,4	375	0
2014	13,431	10,0	14,2	9,255	14690,0	128 (обмен)	333,6

Как видно из приведенного водного баланса, приток воды в Токтогульское водохранилище с каждым годом уменьшался, при этом рост внутреннего потребления ежегодно увеличивался: внутреннее потребление 2014 года выросло в 1,5 раза по сравнению с 2010 годом. Следствием этого явилось снижение уровня воды в Токтогульском водохранилище. Необходимо отметить, что прогнозировать вероятный приток воды на предстоящий период очень сложно, и в расчетах применяются значения от среднемноголетнего притока воды, а прогноз объема внутреннего потребления за предстоящий период берется от фактического потребления предыдущего года с 5% ростом потребления.

Однако, запланированные значения имели большую разницу с фактическими. Это позволило сделать вывод о том, что запас воды в Токтогульском водохранилище уменьшился в зависимости от следующих основных двух факторов[3]:

- низкого притока воды в Токтогульском водохранилище;

- значительного увеличения фактического внутреннего потребления электроэнергии.

Эти два фактора, влияющие на водно-энергетический баланс, являются объектом для дальнейшего исследования.

Водно-энергетический баланс на прогнозируемый период (среднемесячный, среднегодовой) представим следующим уравнением:

$$W_{в.п.} = W_{\Sigma в.эл.эн.} - W_{\Sigma х.н. «ЭС»} - W_{\Sigma потери «НЭСК»} + W_{\Sigma импорт} - W_{\Sigma экспорт}, \quad (1)$$

где $W_{в.п.}$ – ожидаемое потребление электроэнергии распределительными компаниями (РЭКи), крупными промышленными предприятиями (КПП), оптовыми покупателями-перепродавцами (ОПП), потребителями-перепродавцами (ПП) и прочими потребителями электроэнергии на границе ОАО «Национальные электрические сети Кыргызстана»;

$W_{\Sigma в.эл.эн.}$ – суммарная выработанная электроэнергия;

$W_{\Sigma х.н. «ЭС»}$ – суммарное потребление электроэнергии на хозяйственные нужды ОАО «Электрические станции» (вырабатываемые станциями);

$W_{\Sigma потери «НЭСК»}$ – суммарные потери электроэнергии при передаче через сети ОАО «Национальные электрические сети Кыргызстана»;

$W_{\Sigma импорт}$ – импорт электроэнергии;

$W_{\Sigma экспорт}$ – экспорт электроэнергии;

Суммарная выработанная электроэнергия

$$W_{\Sigma в.эл.эн.} = W_{\Sigma КТГЭС} + W_{\Sigma прочие ГЭС} + W_{\Sigma БТЭЦ}, \quad (2)$$

где $W_{\Sigma КТГЭС}$ – суммарная выработанная электроэнергия в Каскаде Токтогульских ГЭС;

$W_{\Sigma прочие ГЭС}$ – суммарная выработанная электроэнергия в прочих ГЭС (Ат-Башинская ГЭС, Камбар-Ата 1-2);

$W_{\Sigma БТЭЦ}$ – суммарная выработанная электроэнергия Бишкекской ТЭЦ.

Структура выработки электроэнергии по указанным станциям представлена в таблице 2.

Суммарную выработанную электроэнергию Каскада Токтогульских ГЭС представим в виде:

$$W_{\Sigma КТГЭС} = W_{ТГЭС} + W_{КГЭС} + W_{ТКГЭС} + W_{ШСГЭС} + W_{УКГЭС}, \quad (3)$$

где $W_{ТГЭС}$ – выработанная электроэнергия Токтогульской ГЭС;

$$W_{ТГЭС} = Q_{ТГЭС} / q_{ср.уд} = Q_{вырТГЭС} \cdot t / 1000000 / q_{ср.удТГЭС}; \quad (4)$$

$W_{КГЭС}$ – выработанная электроэнергия Курпсайской ГЭС;

$W_{ТКГЭС}$ – выработанная электроэнергия Таш-Кумырской ГЭС;

$W_{ШСГЭС}$ – выработанная электроэнергия Шамалды-Сайской ГЭС;

$W_{УКГЭС}$ – выработанная электроэнергия Уч-Курганской ГЭС;

$Q_{вырТГЭС}$ – расход воды на выработку электроэнергии, м³/сек;

t – продолжительность работы гидроагрегата (гидроагрегатов), сек.;

Суммарная выработанная электроэнергия Каскадом Токтогульских ГЭС зависит от расхода воды на выработку электроэнергии Токтогульской ГЭС – $Q_{ТГЭС}$ (млн.м³) и среднего удельного расхода воды $q_{ср.удТГЭС}$ (м³/кВтч).

Таблица 2. Структура выработки электроэнергии каскадом ГЭС в 2014 г.

месяц	Выработка, млн.кВтч	Мощность, МВт
январь	81,84	110,0
февраль	73,92	110,0
март	85,56	115,0
апрель	93,60	130,0
май	96,72	130,0

июнь	93,60	130,0
июль	96,72	130,0
август	96,72	130,0
сентябрь	93,60	130,0
октябрь	89,28	120,0
ноябрь	73,44	102,0
декабрь	61,01	82,0

Далее выработку электроэнергии по ГЭС можно вычислить по следующим формулам:

$$W_{\text{КГЭС}} = (Q_{\text{выр.ТГЭС}} + Q_{\text{вын.сбросТГЭС}} + Q_{\text{пр.рек}}) \cdot t / q_{\text{ср.удКГЭС}}, \quad (5)$$

Где $Q_{\text{вын.сбросТГЭС}}$ – вынужденные сбросы воды Токтогульской ГЭС, м³/сек;

$Q_{\text{пр.рек}}$ – приток воды от других рек, м³/сек;

$q_{\text{ср.удКГЭС}} = 4,18 \text{ м}^3/\text{кВтч}$ – удельный расход воды Токтогульской ГЭС –;

$$W_{\text{ТКГЭС}} = (Q_{\text{выр.ТКГЭС}} + Q_{\text{вын.сбросТКГЭС}} + Q_{\text{пр.рек}}) \cdot t / q_{\text{ср.удТКГЭС}}, \quad (6)$$

$q_{\text{ср.удТКГЭС}} = 7,56 \text{ м}^3/\text{кВтч}$ – удельный расход воды Таш-Кумырской ГЭС ;

$$W_{\text{ШСГЭС}} = (Q_{\text{выр.ШСГЭС}} + Q_{\text{вын.сбросШСГЭС}}) \cdot t / q_{\text{ср.удШСГЭС}}, \quad (7)$$

$q_{\text{ср.удШСГЭС}} = 14,76 \text{ м}^3/\text{кВтч}$ – удельный расход воды Шамылды-Сайской ГЭС;

$$W_{\text{УКГЭС}} = (Q_{\text{выр.ШСГЭС}} + Q_{\text{вын.сбросШСГЭС}} - Q_{\text{спуск на БНКиЛНК}}) \cdot t / q_{\text{ср.удУКГЭС}}, \quad (8)$$

$q_{\text{ср.удУКГЭС}} = 14,4 \text{ м}^3/\text{кВтч}$ – удельный расход воды Уч-Курганской ГЭС;

$Q_{\text{спуск на БНКиЛНК}}$ – спуск воды в Большой Наманганский канал и Левобережный Наманганский Канал, м³/сек;

Исходя из изложенного, учитывая ожидаемые значения и определяя приточность воды р. Нарын ($Q_{\text{пр.реки Нарын}}$) в Токтогульское водохранилище, можно прогнозировать режимы работы энергосистемы, включающие в себя производственно-экономические затраты и доходы, режим работы ТЭЦ Бишкек, ориентированность на экспорт или импорт электроэнергии, а именно:

- потребление электроэнергии внутренними потребителями – $W_{\text{в.п.}}$;
- объем Токтогульского водохранилища на начало расчетного периода – $V_{\text{н.п.}}$;
- спуск воды в Большой Наманганский канал и Левобережный Наманганский Канал – $Q_{\text{спуск на БНКиЛНК}}$;
- приток воды от прочих рек – $Q_{\text{пр.рек}}$;

Алгоритм составления предполагаемого водно-энергетического баланса (режим работы энергосистемы) на анализируемый период следующий:

1. Вводимые значения $Q_{\text{пр.реки Нарын}}$ (м³/сек), $W_{\text{в.п.}}$ (млн.кВтч), $Q_{\text{спуск на БНКиЛНК}}$ (м³/сек), $Q_{\text{пр.рек}}$ (м³/сек).

2. Расчет выработанной электроэнергии Токтогульской ГЭС по формуле (4), где $q_{\text{ср.удТГЭС}}$ зависит от объема водохранилища ТГЭС на начало и на конец периода $V_{\text{н.п.}}$ и $V_{\text{к.п.}}$, при этом не должно нарушаться условие (1), и необходимо соблюдать ограничения объемов водохранилища $6,0 \text{ млрд. м}^3 \leq V_{\text{н.п.}} \leq 19,5 \text{ млрд. м}^3$ и $6,0 \text{ млрд. м}^3 \leq V_{\text{к.п.}} \leq 19,5 \text{ млрд. м}^3$. Объем воды на конец периода рассчитывается по формуле:

$$V_{\text{к.п.}} = V_{\text{н.п.}} + Q_{\text{пр.реки Нарын}} \cdot t / 1000000 - Q_{\text{выр.ТГЭС}} \cdot t / 1000000 -$$

$$-Q_{\text{вын. сброс ТГЭС}} * t / 1000000 \quad (9)$$

3. Расчет выработанной электроэнергии на Курпсайкой ГЭС проводится по формуле (5) с учетом предельной пропускной способности ГЭС, равной 928 м³/сек

4. По остальным ГЭС расчет выработанной электроэнергии производится по аналогии с пунктом 3, с учетом предельных пропускных способностей ГЭС по формулам (6), (7), (8).

5. На каждый рассчитываемый период выработанная электроэнергия прочих ГЭС рассчитывается в соответствии с таблицей 2.

6. Вырабатываемая мощность на ТЭЦ Бишкек указывается в зависимости от технологических возможностей и дефицита мощности в энергосистеме, не превышая при этом 360 МВт.

7. Импортировать или экспортировать электроэнергию. Естественно, что при $V_{\text{н.п}} \leq 6,0$ млрд. м³ необходимо импортировать, а при $V_{\text{н.п}} \geq 19,5$ млрд. м³ – экспортировать электроэнергию.

По этому алгоритму на предполагаемый период получены прогнозные результаты, которые приведены в таблице 3.

Таблица 3. Прогнозные результаты

Наименование	ед. изм	январь
Токтогульская ГЭС		
объем на начало периода	млрд. м ³	9,199
приток воды	м ³ /сек	141
расход воды на выработку эл. эн.	м ³ /сек	588
выработка эл.эн. по расходу воды	млн.кВтч	483,10
объем на конец периода	млрд. м ³	8,00
средний удельный расход воды	м ³ /сек/кВтч	3,26
Курпсайкая ГЭС		
приток воды от ТГЭС	м ³ /сек	588
приток воды от лев. и правобережных рек	м ³ /сек	7
приток воды общий	м ³ /сек	595
предельная пропускная способность	м³/сек	928
расход воды на выработку эл. эн.	м ³ /сек	595
вынужденный сброс воды	м ³ /сек	0,00
выработка эл.эн. по расходу воды	млн.кВтч	381,62
Таш-Кумырская ГЭС		
приток воды от КГЭС	м ³ /сек	595
приток воды от других рек	м ³ /сек	14
приток воды общий	м ³ /сек	609
предельная пропускная способность	м³/сек	945
расход воды на выработку эл. эн.	м ³ /сек	609
вынужденный сброс воды	м ³ /сек	0
выработка эл.эн. по расходу воды	млн.кВтч	215,76
Шамалды-Сайская ГЭС		
приток воды	м ³ /сек	609
предельная пропускная способность	м³/сек	984
расход воды на выработку эл. эн.	м ³ /сек	609
вынужденный сброс воды	м ³ /сек	0
выработка эл.эн. по расходу воды	млн.кВтч	110,51
Уч-Курганская ГЭС		
приток воды	м ³ /сек	609,0
предельная пропускная способность	м³/сек	700
минимальный спуск на БНК и ЛНК	м³/сек	6,0
вынужденный сброс воды	м ³ /сек	0,0
расход воды на выработку эл. эн.	м ³ /сек	603,0
выработка эл.эн. по расходу воды	млн.кВтч	112,16

Общий попуск воды с Уч-Курганского ВДХ	млн. м³	1 631,1
Всего по Каскаду ТГЭС		
выработка эл.эн. по расходу воды	млн.кВтч	1 303,15
Всего: прочие ГЭС		
выработка эл.эн. по расходу воды	млн.кВтч	81,84
вырабатываемая мощность	МВт	110,0
Бишкекская ТЭЦ		
выработка эл.эн.	млн.кВтч	267,84
вырабатываемая мощность	МВт	360,00
Выработано электроэнергии		
Всего выработано электроэнергии	млн.кВтч	1 652,83
Нужды ОАО "ЭС"	млн.кВтч	37,39
Отпущено электроэнергии	млн.кВтч	1 615,44
Импорт электроэнергии	млн.кВтч	199,14
Экспорт электроэнергии	млн.кВтч	
Потери ОАО "НЭСК"	млн.кВтч	132,83
Хоз нужды ОАО "НЭСК"	млн.кВтч	0,78
Отпуск электроэнергии в сети	млн.кВтч	1 681,0
Ожидаемое внутреннее потребление ээ	млн.кВтч	1 681,0

Выводы. Таким образом, предложенный алгоритм составления водно-энергетического баланса каскада Токтогульских ГЭС позволяет оптимизировать режим работы ГЭС каскада, прогнозировать расход воды на выработку электроэнергии и орошение земель, минимизируя вынужденный сброс воды.

Литература

1. Никанорова А.Д. Ландшафтно-геоэкологическое обоснование оптимизации водопользования в орошаемом земледелии Ферганской долины: Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук–Москва, 2015.– 16с http://istina.msu.ru/media/dissertations/dissertation/fd1/03e/10650099/Dissertatsiya_Nikanorova_AD.pdf (дата обращения: 26.11.2015).
2. Официальные материалы коллегии Министерства энергетики и промышленности КР за 2014 год – Бишкек, 2015.
3. Касымова В.М., Эсенгулов М.О. Налаживание межгосударственных интеграционных процессов по рациональному использованию водно-энергетических ресурсов в бассейне р. Нарын-Сырдарья одна из главных задач при вступлении КР в ЕАЭС // <http://energoforum.kg/images/library/352.pdf> (дата обращения: 11.02.2016).

УДК 620.179

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

Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР;

Г.С. Денисов, E-mail: dengs@list.ru

Кыргызско-Российский Славянский университет

Бишкек, Кыргызстан

ФЕРРОЗОНДОВЫЙ ДАТЧИК С УПРУГИМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ СЕРДЕЧНИКА

Рассматриваются особенности проявления различных физических эффектов в упорядочены магнетиках при воздействии акустических волн. Обосновывается новый способ возбуждения сердечника феррозондового датчика с использованием явления индуцированной модуляции магнитной проницаемости его структуры. Предлагается структурная блок-схема физического эффекта и вариант конструктивного решения модулятора для реализации нового способа возбуждения чувствительных элементов феррозондовых датчиков.

Ключевые слова: акустическая волна, акустомагнитоэлектрический эффект, доменные сегменты, индуцированные домены, магнитное и электрическое поля, модулятор, пьезоэлемент, способ возбуждения, упорядоченный магнетик, феррозондовый датчик,

Введение

Известно, что Земля, как космическое тело определенного внутреннего строения, генерирует постоянное магнитное поле, называемое нормальным или первичным. Многие горные породы и руды обладают магнитными свойствами и способны под воздействием этого поля приобретать намагниченность и создавать аномальные, или вторичные, магнитные поля. Следует отметить, что подобные аномалии магнитного поля, традиционно изучаемые одним из самых популярных методов разведочной геофизики – магниторазведкой, несут важнейшую информацию о распределении индуктивной и естественной остаточной намагниченностей горных пород и руд. При этом основной вклад в создание аномалий магнитного поля вносят ферромагнитные минералы и содержащие их горные породы. Выделение этих аномальных полей из наблюдаемого, или суммарного, геомагнитного поля (ГМП), а также их геологическое истолкование являются целью магниторазведки [1].

ГМП на земной поверхности описывается пространственно-временным распределением вектора индукции \mathbf{T} , где пространственная структура ГМП является распределением на поверхности Земли вектора \mathbf{T} в фиксированный момент времени, а временную структуру составляют вековые вариации главного поля и внешнее поле, которое не рассматривается вне временной зависимости. Для изучения пространственно-временной структуры такого ГМП нужны векторные измерения, реализуемые путем регистрации трех элементов вектора \mathbf{T} в системе координат «географический Север-Восток-Вертикаль вниз (С-В-Н)» [2].

Для решения подобной задачи в последнее время находят широкое применение трехкомпонентные магнитометры на основе феррозондовых датчиков (fluxgate) (ФД), каждый из которых имеет два параллельных соленоида с взаимно противоположным направлением обмоток и ферромагнитными сердечниками [3]. Соленоиды создают противоположно направленные собственные магнитные поля. В охватывающей оба

соленоида измерительной катушке генерируется ток, сила которого зависит от величины индукции измеряемого поля и от ориентации системы соленоидов относительно вектора индукции. Датчик имеет высокую чувствительность к индукции поля и его направлению.

В связи с тем, что в целом рассматриваемая магнитная восприимчивость горных пород изменяется в больших пределах (в миллионы раз), интенсивность аномалий магнитного поля варьирует от долей до сотен тысяч гамм ($1\gamma = 1\text{нТ}$). Учитывая данный фактор и возросшую в последнее время необходимость реализации именно прецизионных измерений, можно констатировать, что технические возможности традиционных ФД не в полной мере удовлетворяют возросшим требованиям к качественным показателям геомагнитных измерений.

Фактически, для регистрации аномальных магнитных полей на фоне ГМП необходима специальная аппаратура, имеющая и более высокую чувствительность, и существенно расширенный динамический диапазон измерений. Известные конструктивные и структурные методы повышения точности геомагнитных измерений в подавляющем своем большинстве достигли своего предела как в технологическом, так и в методологическом плане. Поэтому, перед разработчиками магнитометрической аппаратуры, в силу объективной необходимости, встает сложная задача создания датчиков, основанных на новых физических принципах, реализация которых позволит осуществить прецизионные измерения силовых или угловых элементов ГМП, существенно усовершенствовать магнитометрические приборы для навигации, дефектоскопии и для других технических приложений.

Анализ акустических эффектов в упорядоченных магнетиках

Для решения поставленной задачи необходимо рассмотреть на основе метода феноменологической интерпретации широкий круг различных физических явлений в упорядоченных магнетиках, которыми являются стержневые ферромагнитные чувствительные элементы (ЧЭ) ФД.

Одним из функциональных элементов ФД является устройство модулятора (УМ), основным назначением которого можно считать формирование возбуждающего воздействия на ферромагнитную структуру ЧЭ переменным физическим полем, обычно магнитным или электрическим [4].

Определенный интерес при разработке нового принципа построения ФД вызывает исследование возможности использования физических эффектов от воздействия акустическим полем на структуру ЧЭ.

Известно, что акустические волны при распространении в пьезомагнитных материалах создают периодические колебания кристаллической решетки, сопровождающиеся определенными физическими эффектами: изменением модулей упругости, электрострикции, пьезоэлектрических и магнитоупругих модулей и т.п.

Можно предположить, что акустические волны могут также дополнительно индуцировать динамические доменные сегменты (ДС) в однородно упорядоченных магнетиках (ферромагнетики), в которых ширина доменов и доменных границ будет определяться длиной акустической волны и ее амплитудой. Такие «индуцированные домены», имеющие динамический характер, обладают возможностью пространственной или временной перестройки в зависимости от интенсивности или природы внешних воздействий. В этом случае ДС можно рассматривать как систему анизотропных сред, разделенных границами, на которых в зависимости от класса симметрии среды происходит изменение диэлектрических, электрооптических, упругих, пьезоэлектрических или магнитоупругих параметров.

Поэтому используемое понятие "индуцированные домены" можно напрямую связать с возможностью посредством внешних воздействий создавать домены необходимой конфигурации и уже из них формировать соответствующие периодические доменные структуры (ПДС). Подобные индуцированные домены представляют определенный интерес для их использования в качестве инициаторов различных физических эффектов, которые могут быть положены в основу принципов построения измерительных датчиков для задач магнитометрии.

Рассмотрим возможные механизмы образования в упорядоченных магнетиках динамических ДС, индуцированных полем ультразвуковой волны.

Кинетика образования акустически индуцированных доменов качественно отличается от процессов обычного доменообразования в магнетиках. Для рассматриваемого случая соотношение ширины домена d и доменной границы δ будет зависеть от амплитуды деформации u в акустической волне следующим образом:

$$d = (\lambda/2) - \delta$$

где $\delta = (\alpha\lambda/\gamma u)^{1/3}$, λ — константа неоднородного обмена.

Поэтому с увеличением амплитуды u ширина доменной границы уменьшается, ширина домена растет до $\lambda/2$, а сама полосовая доменная структура возникает при $\delta \approx d$.

Причиной существования эффекта индуцированных доменов может являться возникновение дополнительной одноосной магнитной анизотропии, обусловленной магнитострикцией. Этот эффект наиболее сильно должен проявиться вблизи ориентационных магнитных фазовых переходов типа «легкая ось»–«легкая плоскость». При достаточной амплитуде акустической волны будет происходить периодическое изменение значения и знака константы магнитной анизотропии, приводящее к анизотропии "легкая плоскость" в области сжатия и к анизотропии "легкая ось" в области растяжения (при положительном знаке константы магнитострикции).

Выполнение условия значительного преобладания энергии анизотропии над обменной энергией обеспечит разбиение изначально магнитооднородного образца на отдельные слои с чередующимися направлениями намагниченности: вдоль и поперек направления распространения акустической волны.

Магнитоупругие эффекты оказывают сильное влияние также на упругие свойства. Известно, что модуль упругости Юнга есть отношение приложенных напряжений P к относительному удлинению образца $\Delta l/l$. В случае магнитоупорядоченных материалов при приложении напряжений возникает механострикция – дополнительная магнитострикционная деформация $(\Delta l/l)_m$, которая добавляется к обычной $\Delta l/l$. Поэтому значение упругого модуля Юнга изменяется в соответствии с выражением

$$E = \frac{P}{\Delta l/l + (\Delta l/l)_m}.$$

В величину механострикции $(\Delta l/l)_m$ вносят вклады процессы смещения доменных границ и процесс вращения векторов спонтанной намагниченности I_s под действием приложенных механических напряжений.

Известно, что сила F , приложенная к твердому телу, вызывает относительную деформацию

$$\lambda \Delta l/l = F/(ES),$$

где $\Delta l/l$ – относительное удлинение образца длиной l ; S – площадь сечения образца; E – модуль упругости (модуль Юнга).

В магнитоупорядоченных средах распространение акустических волн связано с трансформацией волн на доменных границах и возбуждением связанных магнитоупругих колебаний. Для такого процесса необходимо, чтобы упругие колебания $u(k_n, t)$ сопровождалась колебаниями намагниченности

$$\Delta M_u(k_n, t) = \lambda u(k_n, t),$$

где коэффициент λ зависит от величины магнитоупругого тензора \mathbf{b} , волнового вектора k_n и разности частот спиновой и упругой волн.

Магнитоупругий механизм возбуждения и преобразования акустических волн наиболее эффективен при условии, что амплитуда колебаний намагниченности будет превосходить саму намагниченность или хотя бы будет сравнима с ней:

$$\Delta M_u(k_n, t) / M_u(k_n, t) = \eta(k_n, t) \geq 1,$$

где η – магнитоупругий коэффициент усиления колебаний намагниченности.

В магнетике при распространении бегущей волны индуцированная доменная структура будет перемещаться по образцу со скоростью акустической волны, а при возбуждении стоячей волны периодическая ДС будет иметь устойчивое пространственное распределение, определяемое периодом этой волны. В этом случае стоячая акустическая волна создает пьезоэлектрическое поле, при достаточной интенсивности которого возникает образование структуры инвертированных доменов с периодом, равным периоду стоячей акустической волны.

Сформированные таким образом доменные структуры обладают полосовым акустическим спектром, состоящим из зон полного пропускания и полного отражения, и могут считаться своего рода «фононными кристаллами». На микроскопическом уровне процесс образования доменной структуры можно объяснить тем, что электрическое поле, сопровождающее акустическую волну в пьезомагнитной структуре (пьезоэлектрическое поле), можно считать квазистатической волной.

Таким образом, в магнетиках может возникать соответствующая полосовая доменная структура с 90° -ными доменными границами. Если при этом, время релаксации составляет величину, меньшую периода колебаний, то намагниченность будет успевать подстраиваться под упругие деформации, создаваемые акустической волной. Для реальных магнетиков таким условиям удовлетворяют акустические колебания с частотами до нескольких мегагерц.

Такая спонтанно возникшая доменная структура в магнетике, как правило, является равновесной и соответствует минимуму его энергии. В связи с тем, что домен является областью однородного намагничивания, а реальные ферромагнетики имеют многодоменную структуру, то можно сделать вывод о том, что внутри каждого домена существует анизотропная магнитоэлектрическая деформация, т.е. спонтанная магнитоэлектрическая деформация, которая в свою очередь является результатом локальных деформаций, обусловленных магнитоупругим взаимодействием магнитных электронов с окружающими атомами. Величина такого магнитоупругого взаимодействия определяется зависимостью от межатомных расстояний обменных взаимодействий и взаимодействий электронных магнитных слоев ионов с локальными электрическими полями. В этом случае спонтанная магнитоэлектрическая деформация играет немаловажное значение в рассматриваемых физических процессах.

Акустические волны, распространяющиеся через ДС в упорядоченных магнетиках, вследствие различия в знаках пьезоэлектрических коэффициентов в соседних доменах будут испытывать отражение и преломление. В этом случае границы доменов вносят дополнительный вклад акустической нелинейности в магнитоупорядоченную среду, что в свою очередь расширяет возможности использования таких линейных и нелинейных акустических эффектов, как отражение, преломление и генерация основной и высших гармоник, параметрическое преобразование частоты.

За основу процессов отражения и преобразования акустических мод на доменной структуре магнетиков можно взять высказанное ранее предположение о существовании неоднородных магнитоэлектрических деформаций в объеме доменных границ (ДГ). Возбуждение колебаний ДГ может вызываться как продольной, так и поперечной аку-

стическими волнами. В любом случае, независимо от типа падающей акустической волны по обе стороны от ДГ, будут генерироваться вторичные (рассеянные) продольные и поперечные волны. Следовательно, при рассеянии волн на границе будут происходить взаимные превращения продольных и поперечных акустических волн.

При взаимодействии двух встречных акустических волн возникает ток

$$j_a = q\mu(n_{a1}E_{a1} + n_{a2}E_{a2}),$$

где q – заряд электрона; μ – подвижность электронов; n_a – концентрация электронов, зависящая от интенсивности акустических колебаний и определяемая величиной нелинейного акустоэлектронного взаимодействия; E_a – напряженность пьезоэлектрического поля.

При равенстве частот и напряженностей пьезоэлектрических полей встречных волн ток j_a создает пространственно модулированный электрический потенциал с нулевой частотой и волновым вектором $k_a = 2\omega/V_a$, где V_a – скорость акустической волны.

Таким образом, равномерно акустически генерируемые электроны будут находиться в пространственно модулированном электрическом поле

$$E_d = qgt\mu e t u / (\epsilon\epsilon_0)^2,$$

где g – скорость генерации носителей; t – время действия акустической волны.

Следовательно, индуцированное акустической волной поле пространственного заряда будет пропорционально величине относительной деформации, создаваемой данной акустической волной.

Поскольку в диапазоне частот 10^7 – 10^8 Гц длина свободного пробега электронов во много раз меньше длины акустической волны, то пьезоэлектрическое поле можно рассматривать как источник возмущения начальной равномерной плотности свободных электронов (n_0).

В определенных условиях также возможно преобразование объемных волн в поверхностные волны. Однако число преобразованных волн уменьшается при направлении распространения волны, в котором существуют чистые моды. Коэффициенты отражения и преломления акустических волн, распространяющихся вдоль ДС, можно определять с помощью модели взаимодействующих мод. Например, для поперечных акустических волн коэффициенты отражения и преломления будут определяться углами падения θ волны на доменную структуру и коэффициентами электромеханической связи K . Так, квадрат модуля коэффициента отражения имеет вид

$$|R|^2 = Q^2 \left[Q^2 + \frac{\sin^2(k_1 D)}{\sin^2(Nk_1 D)} \right]^{-1},$$

где $Q^2 = 4K^4 \times \text{tg}^2\theta \times \cos[(k_2 d_A) - K^2 \sin(k_2 d_A)]^2$; k_1 – вектор ПДС; k_2 – акустический волновой вектор; $D = d_A + d_B$ – период ПДС.

Исходя из логики представленной интерпретации следует, что формируемую акустическим полем в пьезомагнетике ПДС можно рассматривать как систему периодически расположенных источников переменных электрических или магнитных полей, которые образованы границами доменов, имеющих противоположные знаки пьезоэлектрических или магнитоупругих коэффициентов. Эффективная генерация возникает при условии совпадения фаз источников, что соответствует совпадению (или кратности) периода ПДС с длиной акустической волны. В этом случае резонанс акустических волн на ПДС возникает на частотах

$$f = nV/D, \quad n = 1, 2, 3, \dots,$$

где V – скорость объемных или поверхностных волн; D – период ПДС.

Причем, несмотря на то, что общая длина ПДС L , хотя и не влияет на параметры резонансных частот, фактически определяет значения коэффициента преобразования M акустической энергии в электрическую энергию:

$$M \sim K^2 N_d$$

где K – коэффициент электромеханической или магнитоупругой связи, N_d – число доменных границ.

В результате взаимодействия между упругими колебаниями и однородной прецессией намагниченности, обусловленной магнитоупругим взаимодействием, можно ожидать аномального усиления описываемых физических эффектов, т.е. магнитоакустический эффект, а максимальное значение самого коэффициента преобразования M акустической энергии в электрическую энергию будет наблюдаться при совпадении частот акустического и ферромагнитного резонансов [6].

Кроме того, важно отметить и наличие эффекта влияния стационарной (фиксированной) доменной структуры феррита на акустическую накачку. В этом случае движущуюся ДГ можно рассматривать как своеобразную волну возмущения (волну параметра), бегущую в покоящейся среде. Сильная подвижность, а также большая нелинейность такой магнитной подсистемы оказывают значительное влияние на акустические характеристики этих материалов. Здесь, в отличие от большинства случаев релаксационных явлений в акустике, появляются возможности управления характеристиками (временем релаксации и т.д.) с помощью внешних магнитных полей. Индуцирование акустической волной на доменной стенке знакопередающихся (с периодичностью, определяемой проекцией волнового вектора падающей волны на ДГ) магнитных полюсов вызывает, в свою очередь, эффективный резонансный отклик магнитной подсистемы посредством полей сопутствующих магнитоэластических колебаний.

Обоснование нового способ возбуждения феррозондов

Для целостного восприятия результатов анализа акустических эффектов в упорядоченных магнетиках воспользуемся элементами теории ФЭ, что позволит в последующем существенно упростить проблему выбора технического решения для рассматриваемого круга задач.

Исходя из определения ФЭ, воздействий, физического объекта и результата воздействия каждый ФЭ можно представить в виде модели черного ящика (рис. 1.), где A – воздействие, B – физический объект, C – результат воздействия (эффект).

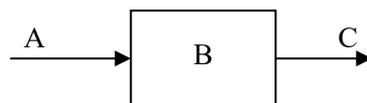


Рис. 1. Модель черного ящика ФЭ.

Функционирование любой технической системы основано на проявлении тех или иных ФЭ. Совокупность взаимосвязанных ФЭ образует физическую основу технической системы, т.е. для нашего случая УМ. Проявление ФЭ осуществляется в три стадии: 1 – начальная стадия, связанная с приложением воздействия; 2 – установившееся проявление результата воздействия; 3 – и конечная стадия, связанная со снятием воздействия.

Такое проявление ФЭ обусловлено следующими причинами: 1 – реакцией на воздействие со стороны физического объекта; она проявляется как по отношению к внешним воздействиям, так и по отношению к взаимодействиям между ФЭ, составляющими, например, физическую основу технической системы; 2 – аккумулярованием физическим объектом некоторой части энергии воздействия, которая проявляет себя после снятия воздействия; 3 – временем протекания процессов на уровне структурных элементов физического объекта.

В рассматриваемом случае следует иметь в виду, что исследуемый объект (сер-

дечник ФД) представляет собой сложную иерархическую систему, характеризующуюся несколькими структурными элементами и связями между ними. Функционирование таких объектов основывается на проявлении множества взаимосвязанных ФЭ.

Принимая во внимание, что ФЭ, как правило, имеют несколько результатов своего воздействия и могут зависеть от ряда параметров дополнительного воздействия, можно синтезировать сложные структуры взаимосвязанных ФЭ, обеспечивающих реализацию исследуемого объекта с несколькими входами и выходами, с обратными связями, с использованием комплексов ФЭ для реализации часто встречающихся функций. Совокупность ФЭ будет представлять собой физическую схему объекта (ФСО), которая дает представление о том, какие заданные входные параметры исследуемого объекта преобразуются в заданные выходные параметры. Элементами ФСО являются физические объекты, на которых проявляются ФЭ. Взаимосвязи между элементами ФСО характеризуют типы преобразований физических величин.

В отличие от электрических и других схем, в которых, как правило, осуществляется преобразование какого-либо одного вида энергии (сигнала), в ФСО могут осуществляться различные преобразования. В этом отношении ФСО имеют много общего с функциональными схемами. Элементы ФСО являются элементами низшего уровня иерархии. Поэтому она является более детальной, чем принципиальная схема, где элементами могут являться сложные объекты техники, функционирование которых основано на использовании ряда ФЭ. Ряд элементов объектов техники (датчики, преобразователи и др.) можно охарактеризовать только с помощью ФСО.

На основе теории ФЭ более подробно опишем принцип действия УМ, реализующего акустоэлектромагнитный эффект возбуждения феррозонда. Для этого, исходя из ранее сделанного анализа возможных механизмов возбуждения ДС, предлагается вариант ФСО (рис. 2), где АП - акустическое поле; ИМП – измеряемое магнитное поле; КР – кристаллическая решетка; ЭПР – электроны проводимости; СП – силовое поле; ЭП – электрическое поле; ЭМП – электромагнитное поле; ММП – магнитомодуляционное поле; ИК – измерительная катушка; ЭДС_{тр} и ЭДС_{мм} – соответственно трансформаторная и магнитомодуляционная электродвижущие силы.

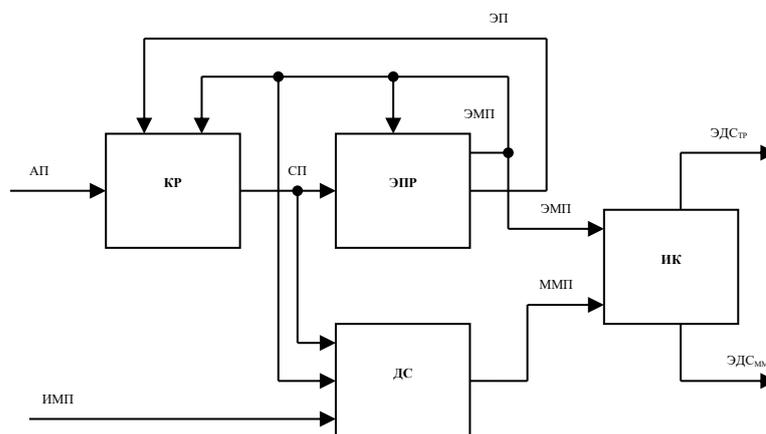


Рис.2. Структурная схема физических эффектов при механической накачке.

Необходимым условием для реализации ФЭ является наличие в физическом объекте структурных элементов – носителей заряда, которые являются носителями ЭП. До приложения акустического воздействия поля этих структурных элементов не имели внешнего проявления. Поскольку результаты воздействия в этих ФЭ отличаются друг от друга (АП, СП, ЭМП), то для обеспечения взаимодействия с внешним воздействием используются разные физические объекты, содержащие соответствующие этим воздействиям структурные элементы. Таким образом, проявление ФЭ, обеспечивающих пре-

образование одних физических полей в другие, обуславливается наличием в составе физических объектов двух типов структурных элементов: 1 – взаимодействующих с внешним воздействием; 2 – обладающих физическим полем, соответствующим результату воздействия. В этом случае преобразования как такового одного физического поля в другое не происходит. Происходит лишь передача энергии одного физического поля через соответствующие структурные элементы другим структурным элементам-носителям другого физического поля, т.е. осуществляются изменения во взаимосвязях между структурными элементами.

При проявлении акустоэлектрического эффекта под действием АП возникают колебания КР, которые рассматриваются как волны упругой деформации (УД) или как источник СП. В этом случае происходит обмен энергией и импульсом между волнами УД и ЭПР. Передача энергии от акустической волны электронам приводит к дополнительному поглощению АП, а передача импульса от акустической волны электронам – к изменению их концентрации и появлению ЭП. Кроме того, пространственные колебания ДС, вызванные внутренними ЭМП и СП, осуществляют процесс модуляции ИМП, что в итоге приводит к появлению ММП. В последующем ЭМП и ММП по закону электромагнитной индукции в ИК одновременно наводят соответственно ЭДС_{тр} и ЭДС_{мм}.

В зависимости от кратности отношения длины составного ферритового сердечника ФД к длине полуволны возбуждаемого в этом сердечнике волнового процесса функционирование магнитометра реализуется в режиме феррозонда-градиентометра (при четной кратности) либо в режиме феррозонда-полемера (при нечетной кратности). Разработанная структурная схема ФЭ для УМ с упругим возбуждением, т.е. посредством акустических волн, подтверждает возможность физической реализации нового типа феррозондового магнитометра с УМ на основе акустоэлектромагнитного эффекта.

Экспериментальная проверка данного предположения показала, что при воздействии первичной акустической волны с определенными параметрами (режим стоячей волны) на ДГ и обеспечении при этом соответствующего резонансного режима для реализации магнитоупругого взаимодействия в ЧЭ ФД, возможно появление эффекта механической генерации большого количества свободных носителей. В этом случае акустическую генерацию можно представить в виде двухэтапного процесса: на первом из них происходит механическое возбуждение большого количества свободных носителей, электрическое поле которых уменьшает величину поля поляризации в каждом из доменов; на втором этапе скачки электрического поля вследствие обратных знаков пьезоэлектрических коэффициентов в соседних доменах создают переменные деформации. При этом процессе на границах доменов будут возникать сильные градиенты переменного электрического поля с частотой ω , соответствующей периоду доменной структуры, а на съемном элементе индукционного преобразователя будут детектироваться непрерывные радиосигналы, соотношенные по времени прохождения на детекторы, как сигналы продольной и поперечной компонент стоячей приповерхностной акустической волны. Максимумы частотного спектра этих типов волн соответствуют условию равенства длины акустической волны периоду доменной структуры.

Исходя из проведенного анализа структурной схемы ФЭ при взаимодействии акустических волн с магнитоупорядоченной структурой, можно констатировать, что отличительная особенность магнитоэлектрических волн в подобных структурах состоит в их локализации границами раздела сред и способностью эффективно удерживаться ДГ [7]. Кроме того, поведение магнитоэлектрических и спиновых волн на движущихся ДГ рассматривается в магнитодинамике именно в связи с проблемой их устойчивости при внешних воздействиях или поступательном перемещении. В этом случае показатель-

ным является факт установления устойчивого режима движения ДГ и характер возмущений, развивающихся по внутренним (структурным) степеням свободы доменных стенок. В отличие от обычных границ раздела сред, ДГ могут перемещаться по ферромагнетику под внешним управляющим воздействием не только магнитного, но и акустического поля [7].

С учетом вышесказанного, можно предположить существование возможности использования именно ДГ в качестве элемента, регулирующего процессы перемагничивания ферромагнитного образца и канализирующего магнитостатические (спиновые) волны, генерируемые внешним энергетическим источником. В этом случае упругое возбуждение магнитоупругой волны в ферромагнитном ЧЭ рассматриваемого варианта ФД может быть осуществлено, например, с помощью пьезоэлектрического преобразователя, плотно контактирующего с поверхностью ЧЭ и возбуждающего в нем линейно поляризованное упругое смещение с частотой подведенного к преобразователю электрического напряжения.

Предложенная интерпретация механизма комплексной трансформации волнового фронта акустических волн на ДГ однородно упорядоченных магнетиков стала основой для разработки нового способа возбуждения ферромагнитного стержня (ЧЭ) ФД.

Вариант конструктивного исполнения УМ для возбуждения ФД схематично представлен на рисунке 3, где 1 – пьезоэлемент; 2' и 2'' – токопроводящие электроды пьезоэлемента 1; 3 – ось геометрической симметрии; 4 – технологическое отверстие для подвода электрического напряжения к токопроводящим электродам пьезоэлемента; соответственно узел и пучность акустической волны; 5 и 6 – диэлектрические цилиндрические втулки, образующие разъемный базирующий элемент; 7 и 8 – ферритовые стержни модулятора; 9 – стоячие акустические волны.

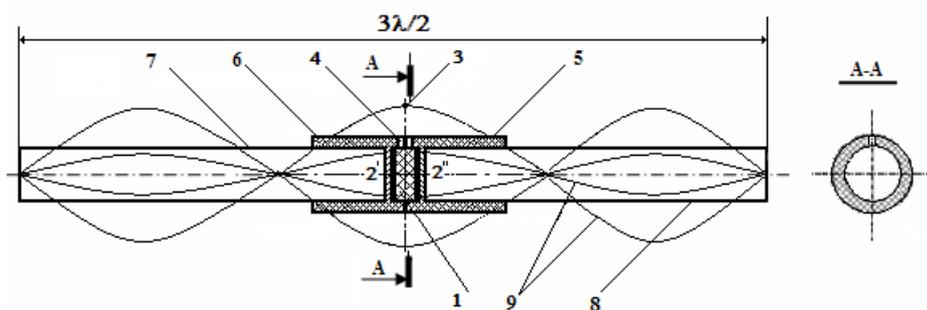


Рис.3. Вариант конструкции варианта модулятора ФД.

При подведении высокочастотного (ВЧ) напряжения к токопроводящим электродам 2' и 2'' пьезоэлемента 1 в нем возникает обратный пьезоэффект. В этом случае, при определенных параметрах возбуждающего ВЧ напряжения, в резонансном режиме в ферритовых стержнях 7 и 8 образуются стоячие акустические волны 9 определенной конфигурации, которые и инициируют локальное возбуждение периодических доменных сегментов в ферритовых стержнях. Магнитомеханические осцилляции доменных сегментов в соответствующих сечениях ферритовых стержней, фактически воспроизводя закон изменения акустических стоячих волн, становятся полным аналогом электромагнитных волн (электромагнитная эмиссия), которые в дальнейшем и определяют последующие эффекты электромагнитной индукции.

Следует отметить тот факт, что любые перемещения ДС в структуре ферритовых стержней (упорядоченные магнетики) 8 и 7 сопровождаются достаточно интенсивной электромагнитной эмиссией, механизм излучения которой связан, скорее всего, с наличием переменных макротоков поляризации в ядре движущегося ДС. Несмотря на то, что коэффициент преобразования механической энергии ДС в электромагнитное излу-

чение есть относительно небольшая величина, однако, возможен быстрый рост интенсивности электромагнитной эмиссии при увеличении частоты и амплитуды колебаний ДС.

Для повышения эффекта электромагнитной эмиссии дислокаций в ферритовых стержнях 8 и 7 необходимо одновременное и согласованное возбуждение большого числа ДС. Такое возбуждение может быть достигнуто только при одновременном наступлении резонансных режимов как для процесса образования электромагнитного излучения, так и для процесса упругого возбуждения (акустической накачки).

Заключение

Проведенные экспериментальные исследования подтвердили существование бегущего ДС, созданного продольной акустической волной в ферритовом цилиндрическом стержне ЧЭ ФД. При этом бегущий ДС перемещался со скоростью бегущей акустической волны, а на самом индуцированном ДС при определенных условиях наблюдалось резонансное усиление акустических колебаний.

Таким образом, при акустическом возбуждении ЧЭ ФД фиксировался устойчивый эффект возникновения осциллирующих и бегущих ПДС, которые модулировали измеряемое постоянное магнитное поле, создавая тем самым стоячую или бегущую электромагнитную волны, что в итоге приводило к индуцированию в измерительных обмотках ФД соответствующих э.д.с., функционально связанных с параметрам измеряемого магнитного поля.

Обобщая, можно констатировать, что результаты исследований эффекта «индуцированных доменов» и его возможного применения позволяют говорить о возникновении в геофизическом приборостроении нового направления, вобравшего в себя совокупность разнообразных свойств электро- и магнитоупорядоченных структур, используемых в качестве материала для ЧЭ ФД нового типа.

На основе полученных результатов научных исследований возможно существенно улучшить технические характеристики ФД, что позволит, в свою очередь, эффективно проводить общую магнитную съемку Земли и палеомагнитные исследования; успешно решать задачи региональной структурной геологии, геологического картирования разных масштабов, поисков и разведки полезных ископаемых; с высокой степенью детализации изучать геолого-геофизические особенности и трещиноватости пород.

Литература

1. Яновский Б. М. Земной магнетизм. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. – 592 с.
2. Федынский В.В. Разведочная геофизика. – М.: Недра, 1964. – 672 с.
3. Афанасьев, Ю.В. Феррозондовые приборы. – Л.: Энергоатомиздат, 1986. – 320 с.
4. Брякин И.В. Способ возбуждения феррозонда и устройство модулятора для его осуществления / Патент КР №1873 G01V 3/00, G01R 33/02 – Оpubл. 30.06.2016, Бюл. №
5. Хорошун Л.П., Маслов Б.П., Лещенко П.В. Прогнозирование эффективных свойств пьезоактивных композитных материалов. – Киев: Наук. думка, 1989. – 208 с.
6. Петров Р.В., Бичурин М.И. и др. Резонансные эффекты в магнитострикционно-пьезоэлектрических композитах для твердотельных электронных устройств // PalmariumAcademic Publishing, 2012. – 264 с.
7. Брякин И.В. К вопросу снижения уровня ложных сигналов в феррозондах // Проблемы автоматики и управления.– 2009.– №2. – С.125–133.

И.В. Бочкарев. E-mail: elmech@mail.ru
Кыргызский государственный технический университет им. И. Раззакова,
К.К. Келебаев. E-mail: msskkk@mail.ru
Бишкекский технический колледж.
г. Бишкек, Кыргызстан.

АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК МЕХАНИЗМОВ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ДЕЙСТВИЯ

Рассмотрены вопросы аппроксимации характеристик «напор – расход» и «КПД – расход» для механизмов центробежного действия с использованием их паспортных данных. Показано, что аналитические зависимости, полученные путем аппроксимации указанных характеристик полиномами третьей степени, дают наиболее точные результаты. Приведено сравнение полученных и известных формул и произведена оценка их точности с использованием коэффициентов корреляции.

Ключевые слова: механизмы центробежного действия, турбомеханизмы, гидравлические характеристики, коэффициент полезного действия, аппроксимация, полином n – го порядка, коэффициент корреляции.

Введение. Силовые механизмы центробежного действия – это установки, которые широко используются практически во всех сферах деятельности человека: на каждом промышленном предприятии независимо от специфики и характера их технологического процесса, в сельском хозяйстве, бытовом секторе и т.д. К таким установкам относят насосные, вентиляционные, компрессорные, воздуходувные установки, дымососы и т.п. [1, 2, 3]. Они используются для перекачивания различных рабочих газообразных сред, жидкостей всех видов, а также механической смеси жидкостей с твердыми и коллоидными веществами. Такие механизмы можно объединить в один класс – турбомеханизмы (ТМ), так как их характеристики с точки зрения условий работы имеют много общего: момент имеет квадратичную зависимость от скорости, а потребляемая мощность приводного двигателя ТМ изменяется в кубической зависимости от частоты вращения.

ТМ имеют определённые технические характеристики, которые характеризуют их эксплуатационные возможности и с помощью которых возможен выбор ТМ для конкретных областей и способов применения. Две главные характеристики ТМ, которые описывают транспортируемую рабочую среду, – это производительность Q (расход) и давление H (напор). Под производительностью понимают объем перемещаемого воздуха или жидкости за единицу времени. Давление ТМ – это "сила", с которой транспортируемая среда выходит из выходного патрубка. Кроме того, одним из основных технических параметров ТМ является коэффициент полезного действия (КПД). Обычно характеристики $H(Q)$ и $\eta(Q)$ для конкретного ТМ задаются заводом-изготовителем в паспортной характеристике в виде таблиц или графиков при постоянных оборотах и свойствах перекачиваемой жидкости.

Для математического описания гидравлических характеристик ТМ как нагрузки приводного двигателя, в инженерных расчетах используют приближенные (обычно квадратичные) зависимости. Однако это приводит к значительным, а в совокупности – к недопустимым погрешностям в проектных, проверочных, сопоставительных расчетах. В то же время применение современных компьютерных приложений позволяет получить более точное аналитическое описание таких функций. Одним из удобных и

точных вариантов является использование математического приложения «Mathcad», позволяющего произвести аппроксимацию зависимостей $H(Q)$ и $\eta(Q)$.

Постановка задачи. Представление совокупности некоторых данных некоторой функцией $y(x)$ является широко распространенной задачей. Задача регрессии заключается в получении параметров этой функции такими, чтобы функция приближала «облако» исходных точек (заданных векторами VX, VY) с наименьшей среднеквадратичной погрешностью. Для проведения различных вариантов регрессии в систему «Mathcad» встроен ряд использованных ниже функций [4]. Применим этот компьютерный математический аппарат для аналитического описания зависимостей «напор – подача» (напорная характеристика $H(Q)$) и «КПД – подача» $\eta(Q)$ ТМ, используя их паспортные данные. Разработка уточненных аналитических выражений для расчета указанных характеристик ТМ является актуальной задачей, имеющей практическую ценность.

Полученные результаты. Изменение напора и КПД механизма при регулировании подачи являются важнейшими характеристиками ТМ. Определяются они по паспортной характеристике, представляемой заводом-изготовителем. Однако, для аналитических расчетов необходимо иметь математическое выражение напорной характеристики. В аналитических расчетах для описания этой кривой используют различные варианты аппроксимации. Мы предлагаем аппроксимировать кривые $\eta(Q)$ полиномом n -го порядка с дальнейшим определением целесообразной величины степени n .

Характеристики центробежного насоса (ЦН), приведенные заводом – изготовителем, представляем в виде матрицы:

$$M := \begin{pmatrix} 0 & 0,144 & 0,288 & 0,432 & 0,576 & 0,720 & 0,854 & 1,008 & 1,152 \\ 1,367 & 1,358 & 1,337 & 1,329 & 1,283 & 1,225 & 1,117 & 1,0 & 0,95 \\ 0 & 0,34 & 0,58 & 0,72 & 0,80 & 0,86 & 0,87 & 0,84 & 0,82 \end{pmatrix}$$

В этой матрице первая строка – это подача Q (о.е.), вторая строка – напор H (о.е.), третья строка – КПД η (о.е.). Соответственно, в транспонированной матрице $M^T := data$ ($:=$ - знак присвоения значения в Mathcad):

$$Q := data^{<0>; H := data^{<1>; \eta := data^{<2>}$$

Выполним одномерную полиномиальную аппроксимацию таблично заданных характеристик ЦН. Вычисление коэффициентов полинома осуществим с помощью встроенной в Mathcad функции $regress(VX, VY, n)$, где VX, VY – векторы с координатами исходных данных, n – порядок полинома. Для построения аппроксимирующей зависимости воспользуемся встроенной функцией $interp(VK, VX, VY, x)$, где VK – вектор коэффициентов, рассчитанных функцией $regress$; x – рассчитываемая точка. Полученный полином наилучшим образом приближается к исходному «облаку» точек с координатами, хранящимися в векторах VX и VY . Подробно рассмотрим аппроксимацию напорной характеристики $H(Q)$ полиномом второго порядка

$$H(Q) = a_0 + a_1 Q + a_2 Q^2.$$

Задаем степень полинома, равной 2, $n=2$, тогда вектор для вычисления полинома будет иметь следующий вид

$$z = regress(Q, H, n).$$

Для вычисления коэффициентов полинома регрессии используем функцию $submatrix$:

$$coeffs := submatrix(z, 3, length(z) - 1, 0, 0).$$

В результате получаем коэффициенты нулевого, первого и второго порядков искомого полинома:

$$coeffs^T = (1,364 \quad 0,055 \quad -0,79).$$

Таким образом, зависимость $H(Q)$ представлена полиномом второй степени

$$H1(Q) := 1,364 + 0,055 \cdot Q - 0,379 \cdot Q^2. \quad (1)$$

Ниже приведены расчеты аппроксимации напорной характеристики полиномом третьего порядка $H2(Q)$, а также аппроксимации зависимости $\eta(Q)$ полиномами второй $\eta1(Q)$ и третьей $\eta2(Q)$ степени:

$$\begin{aligned} n = 3; \quad z1 &= regress(Q, H, n); \quad coeffs := submatrix(z1, 3, length(z1) - 1, 0, 0); \\ coeffs^T &= (1,356 \quad 0,17 \quad -0,643 \quad 0,153); \\ H2(Q) &:= 1,356 + 0,17 \cdot Q - 0,643 \cdot Q^2 + 0,153 \cdot Q^3. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} n = 2; \quad z2 &= regress(Q, \eta, n); \quad coeffs := submatrix(z2, 3, length(z2) - 1, 0, 0); \\ coeffs^T &= (0,047 \quad 2,032 \quad -1,212); \\ \eta1(Q) &:= 0,047 + 2,032 \cdot Q - 1,212 \cdot Q^2. \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} n = 3; \quad z3 &= regress(Q, \eta, n); \quad coeffs := submatrix(z3, 3, length(z3) - 1, 0, 0); \\ coeffs^T &= (4,564 \cdot 10^{-3} \quad 2,66 \quad -2,654 \quad 0,834); \\ \eta2(Q) &:= 4,564 \cdot 10^{-3} + 2,66 \cdot Q - 2,654 \cdot Q^2 + 0,834 \cdot Q^3. \end{aligned} \quad (4)$$

Представляет интерес сравнение полученных результатов с вариантами аппроксимации, предложенными различными авторами ранее.

Напорная характеристика насоса в [5] описывается как

$$H_n(Q) = H_0(1 - C_H Q^2), \quad (5)$$

где H_0 - напор насоса при закрытой задвижке (*o.e.*), т.е. при $Q = 0$; C_H - коэффициент, определяемый по паспортной характеристике насоса.

Коэффициент C_H определяется из условия $H = 1$ при $Q = 1$:

$$C_H = 1 - \frac{1}{H_0}.$$

На рис. 1 приведена кривая, рассчитанная по (5) при паспортном значении $H_0 = 1,367$.

В аналитических расчетах для описания кривой изменения КПД насоса при регулировании подачи используют различные варианты аппроксимации. Так, в [6] предлагается представление зависимости $\eta(Q)$ в виде

$$\eta_n = (2Q - Q^2)\eta_n, \quad (6)$$

где η_n - номинальное значение КПД данного насоса.

На рис. 1а, б представлены результаты расчетов функций, аппроксимирующих зависимости $H(Q)$, $\eta(Q)$ по формулам (1) ÷ (6), причем номер кривой совпадает с номером формулы. Крестиками обозначены зависимости, данные в паспортных характеристиках насоса.

Оценить точность аппроксимации можно, используя значения коэффициента корреляции. С помощью встроенной в приложение «Mathcad» функции «*corr(X, Y)*», которая возвращает скаляр-коэффициент корреляции Пирсона, находим коэффициенты корреляции полученных кривых напорной характеристики и КПД ЦН.

Коэффициенты корреляции в данных случаях равны:

$$\begin{aligned} \text{corr}(\eta n(Q), \eta) &= 0,974 & \text{corr}(Hn(Q), H) &= 0,992 \\ \text{corr}(\eta 1(Q), \eta) &= 0,995 & \text{corr}(H1(Q), H) &= 0,995 \\ \text{corr}(\eta 2(Q), \eta) &= 0,999 & \text{corr}(H2(Q), H) &= 0,996 \end{aligned}$$

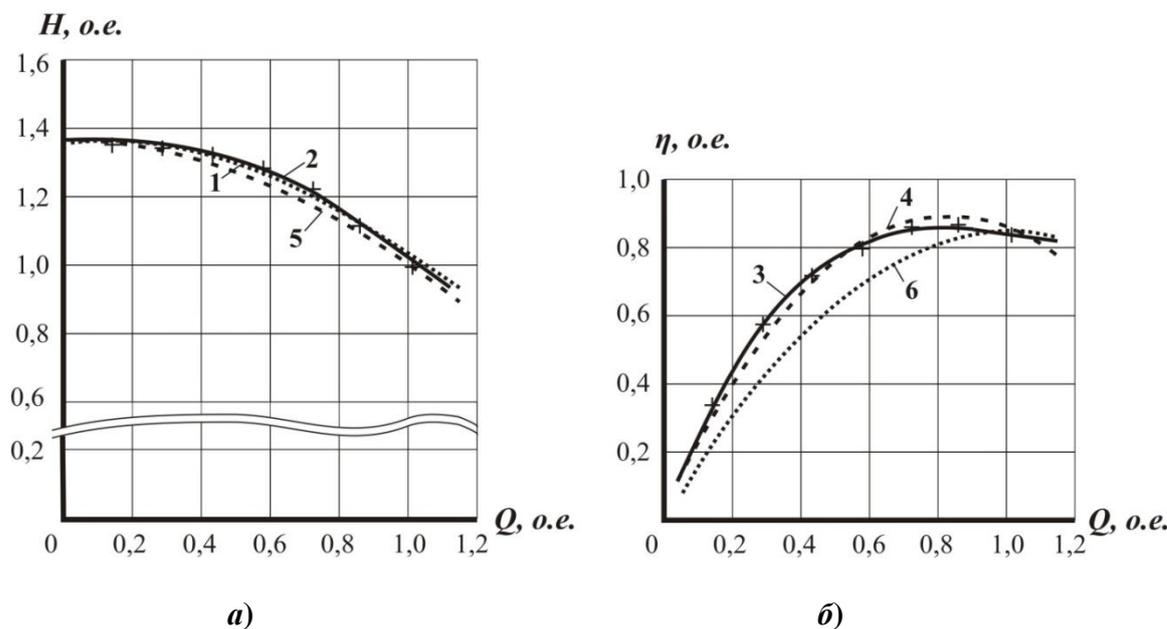


Рис. 1. Характеристики ЦН, рассчитанные по различным аппроксимирующим формулам:

а) – напорная характеристика $H(Q)$; б) – зависимость КПД $\eta(Q)$

Видно, что предложенные аппроксимационные аналитические зависимости для расчета напорной характеристики $H(Q)$ и зависимости $\eta(Q)$ дают наиболее точные результаты по сравнению с известными формулами.

Заключение. В результате проведенного исследования выполнена полиномиальная аппроксимация таблично заданных параметров ТМ, которые завод-изготовитель ТМ получает экспериментальным путем. Получены аналитические зависимости КПД $\eta(Q)$ и напорной характеристики $H(Q)$ в виде полиномов второго и третьего порядка, которые без каких-либо затруднений могут быть использованы в дальнейших аналитических расчетах и исследованиях энергетических характеристик электропривода ТМ.

Литература

1. Черкасский В. М. Насосы, вентиляторы, компрессоры. – М.: Энергоатомиздат. – 1984. – 416 с.
2. Карелин В.Я. Насосы и насосные станции. – М.: Стройиздат. – 1986. – 154с.
3. Колпаков Л.Г. Центробежные насосы магистральных нефтепроводов. – М.: Недра, 1985. – 286 с.
4. Дьяконов В. П. MathCad 8/2000: Специальный справочник. – СПб: Питер. – 2001. – 592 с.
5. Мустафин М.А., Мустафин Е.М. Энергосберегающие системы электропривода центробежных насосных агрегатов. – Алматы. – 2009. – 248 с.
6. Галеев В.Б., Карпачев М.З., Харламенко В.И. Магистральные нефтепродуктопроводы – М.: Недра. – 1988. – 293 с.

Закиров Р.Г., Абдукаюмов А., Абдураимов О.Ш. E-mail: zrg1980@mail.ru
Ташкентский государственный технический университет им. И.А.Каримова,
Ташкент, Узбекистан

ПРЕИМУЩЕСТВА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОГО ГИРОСКОПА НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА САНЬЯКА

В статье приводится анализ применения различных типов гироскопов на воздушных судах гражданской авиации. Проведен анализ недостатков механических и кольцевых лазерных гироскопов. Показаны преимущества волоконно-оптического гироскопа, основанного на эффекте Саньяка. Этот гироскоп имеет более высокую надежность, меньшие, по сравнению с другими типами гироскопов, массоу и габариты, более высокую точность измерения угловых скоростей.

Ключевые слова: механический гироскоп, кольцевой лазерный гироскоп, волоконно-оптический, эффект Саньяка

Введение

Одной из основных систем пилотажно-навигационного комплекса любого современного воздушного судна является инерциальная система, позволяющая измерять навигационные параметры воздушного судна – курс, крен, тангаж, истинную скорость и др. относительно связанной с Землей системы координат.

Основным элементом инерциальной системы является гироскоп. В настоящее время наряду с механическими большое распространение получили кольцевые лазерные гироскопы. Однако, и те и другие обладают достаточно большой массой и габаритами, что снижает экономическую целесообразность использования их в качестве датчиков углов ориентации в инерциальных системах воздушного судна.

Вместе с тем в настоящее время все большее распространение получают волоконно-оптические гироскопы на основе эффекта Саньяка.

В настоящей статье приводится обоснование целесообразности замены кольцевых лазерных гироскопов, применяемых в пилотажно-навигационных комплексах воздушных судов волоконно-оптические.

Формулировка проблемы

Гироскоп – устройство, способное измерять изменение углов ориентации связанного с ним тела относительно инерциальной системы координат. До недавнего времени в системах навигации летательных аппаратов применялись механические гироскопы, работающие на основе эффекта удержания оси вращения тела в одном направлении инерциального пространства (Рис.1) [1].

Это, как правило, трехстепенные гироскопы, измеряющие крен, тангаж и курс воздушного судна.

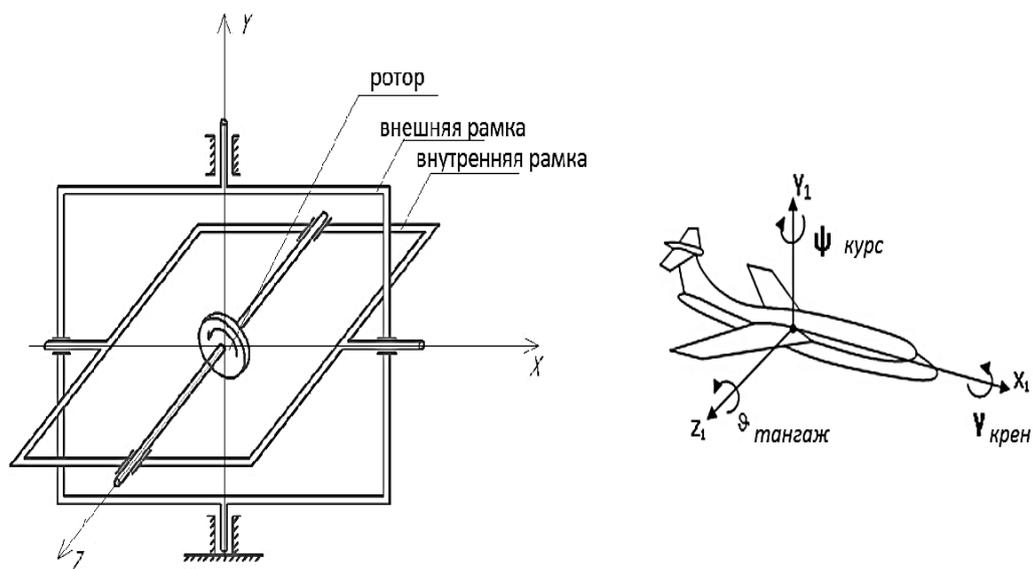


Рис.1 Устройство механического гироскопа

Цена механических гироскопов достаточно высока, так как для их корректной работы требуется высокая точность формы ротора и минимальное трение подшипников. Но, даже при выполнении этих требований, механические гироскопы достаточно недолговечны и ненадежны вследствие износа трущихся частей. Кроме того, со временем у таких гироскопов появляется значительная погрешность измерения углов, влияющая на безопасность полета. Для ее уменьшения требуется производить частую проверку приборов с механическими гироскопами на стенде, что требует значительного расхода средств.

Эти недостатки в значительной мере устраняются за счет применения оптических гироскопов, которые имеют следующие преимущества:

- отсутствие подвижных частей;
- простота и надежность конструкции;
- значительно более высокая чувствительность;
- высокая линейность характеристик;
- низкая потребляемая мощность.

Принцип действия большинства оптических гироскопов основан на эффекте Санныяка, заключающемся в том, что во вращающемся кольцевом интерферометре одна встречная волна приобретает фазовый сдвиг относительно другой встречной волны. Этот сдвиг в общем виде прямо пропорционален угловой скорости вращения, площади, охватываемой интерферометром, и частоте волны. Фазовый сдвиг пропорционален только угловой скорости, так как площадь и частота волны остаются неизменными во время работы гироскопа [2].

В зависимости от конструкции замкнутого оптического контура различают два типа оптических гироскопов

- кольцевой лазерный гироскоп;
- волоконно-оптический гироскоп.

Конструкция кольцевого лазерного гироскопа показана на рис.2 Принцип работы такого гироскопа основан на разности частот двух генерируемых световых волн, распространяющихся в противоположных направлениях по треугольному оптическому пути, возникающей из-за разности оптической длины путей, проходимых лучами при повороте гироскопа. В настоящее время кольцевые лазерные гироскопы являются

наиболее распространенным типом гироскопов, применяемых в авиационных инерциальных системах (Inertial Reference System-IRS), выпускаемых компаниями Honeywell, Allied Signal, Rockwell Collins и др.

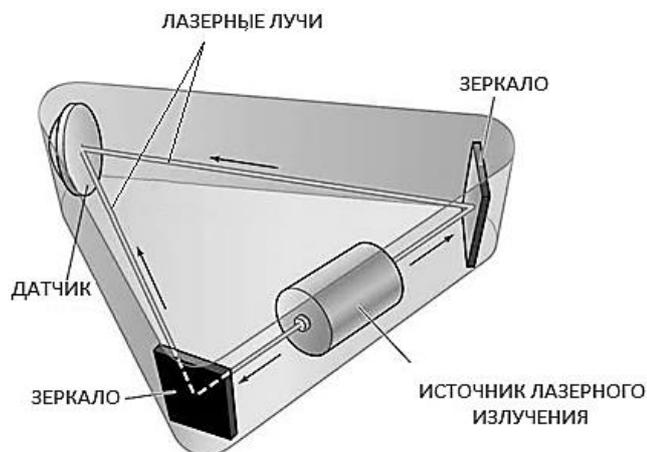


Рис.2 Конструкция кольцевого лазерного гироскопа

Однако, несмотря на большую распространенность, кольцевые лазерные гироскопы также имеют ряд недостатков, основными из которых являются:

- Нелинейность выходного сигнала при малой угловой скорости (влияние синхронизма);
- Колебания выходного сигнала из-за газовых потоков в лазере;
- Кольцевой лазерный гироскоп очень чувствителен к различного рода деформациям оптического волновода, вызванным тепловым расширением, изменением давления и другими факторами.

Предлагаемое решение

Для устранения этих недостатков в инерциальных системах летательных аппаратов предлагается использовать волоконно-оптический гироскоп.

Принцип действия волоконно-оптического гироскопа основан на эффекте Саньяка, который заключается в появлении фазового сдвига встречных электромагнитных волн во вращающемся кольцевом интерферометре.

Схема кольцевого интерферометра Саньяка приведена на рис.3. Луч от источника 1 проходит через полупрозрачное зеркало 2, где он расщепляется на два потока с противоположными направлениями. Оба потока поступают на систему зеркал 3. Если система неподвижна, то оба потока проходят одинаковый путь и создают соответствующую интерференционную картину на фотоприемнике 4.

Фазовый сдвиг создает на фотоприемнике 4 интерференционную картину, расстояние между кольцами которой пропорционально угловой скорости Ω [2].

Волоконно-оптический гироскоп представляет собой интерферометр Саньяка, в котором круговой оптический контур заменен катушкой из длинного одномодового оптического волокна. Главными элементами такого гироскопа, как и в кольцевом интерферометре, являются излучатель, расщепитель луча, многовитковый замкнутый контур из одномодового световода с малым затуханием и фотоприемник (Рис.4).

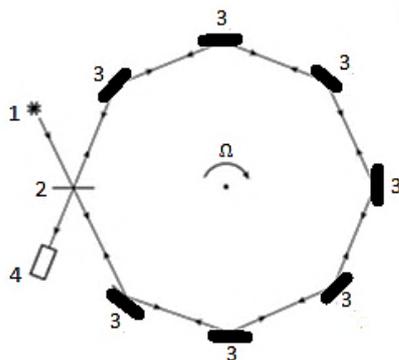


Рис. 3. Кольцевой интерферометр: 1 – источник излучения; 2 – светоделительная пластинка (полупрозрачное зеркало); 3 – зеркала; 4 – фотоприемник. Стрелка указывает направление вращения интерферометра

Изменение геометрических размеров интерферометра под влиянием центробежных сил, а также поперечный сдвиг встречных волн под действием центробежных сил, связанных с кривизной их траектории в интерферометре, можно не учитывать, так как вызванное данными факторами увеличение площади кольца очень незначительно, причем это увеличение одинаково для обеих встречных волн и, следовательно, не приводит к появлению разности фаз между ними.

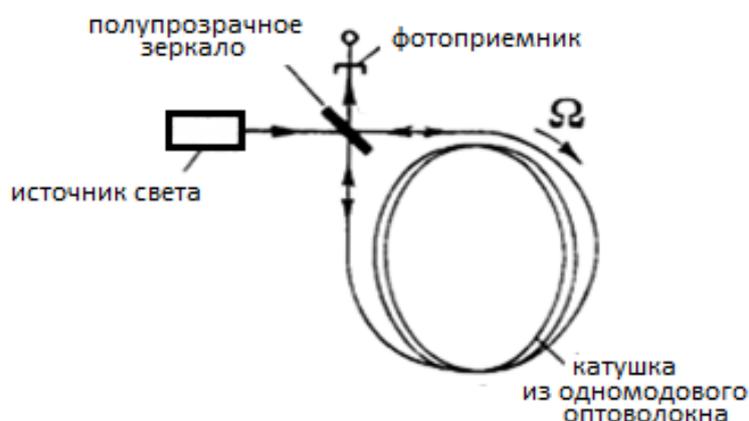


Рис.4 Схема волоконно-оптического гироскопа

В отличие от кольцевых лазерных гироскопов волоконно-оптические гироскопы измеряют угловую скорость, а не её приращение. Соответственно, волоконно-оптические гироскопы имеют преимущества перед кольцевыми лазерными гироскопами:

- из-за использования в качестве среды распространения света оптического волокна, и уменьшения потерь, эффект Саньяка, на котором основан принцип работы прибора, проявляется на порядки сильнее, так как затухание в оптическом волокне на порядки ниже, чем в открытой линии связи. Кроме того, оптоволоконно подводится непосредственно к фотоприемнику, что обеспечивает попадание света на датчик практически на 100 %, в то время, как в кольцевом лазерном гироскопе на датчик попадает не более 50 % световой энергии;
- конструктивно волоконно-оптический гироскоп выполнен в форме твердотельного прибора, что делает его более надежным и простым в эксплуатации;

- этот гироскоп непосредственно измеряет скорость вращения, а не вычисляет ее на основе измерения приращения скорости, как кольцевой лазерный гироскоп.
- Чувствителен к обратному (реверсному) направлению вращения;
- с высокой точностью измеряет малые угловые скорости.

При конструировании волоконных оптических гироскопов, как правило, в качестве излучателей используют полупроводниковые лазеры (лазерные диоды), светодиоды и суперлюминесцентные диоды.

Газовые лазеры в волоконно-оптических гироскопах применяют крайне редко, однако этот факт позволяет значительно удешевить производство волоконно-оптических гироскопов.

Специфика конструкции волоконно-оптических гироскопов предъявляет дополнительные требования к источникам излучения: точное соответствие длины волны излучения номинальной длине волны световода, где потери минимальны; обеспечение высокой эффективности ввода излучения в световод; возможность работы источника излучения в непрерывном режиме без охлаждения; высокий уровень выходной мощности излучателя; долговечность, прочность конструкции, а также минимальные габариты, масса, потребляемая мощность и стоимость [2].

Длина периметра контура определяется исходя из двух предпосылок:

- увеличение длины контура повышает точность системы в целом, так как величина невзаимного фазового сдвига пропорциональна длине волокна;
- для более длинного контура в большей степени на работу системы оказывают влияние параметры затухания и нерегулярности волокна.

При выборе фотодетектора для волоконно-оптического гироскопа необходимо обеспечивать максимальную интегральную чувствительность в требуемом спектральном диапазоне, минимальную эквивалентную мощность шумов и минимальный темновой ток.

Заключение

В работе проанализированы преимущества применения в пилотажно-навигационных комплексах летательных аппаратов волоконно-оптических гироскопов. Главным преимуществом волоконно-оптического гироскопа является значительное по сравнению с другими типами гироскопов уменьшение массы и габаритов, что имеет значительный экономический эффект при проектировании БНК для воздушных судов малой авиации.

Для применения в летательных аппаратах необходимо использовать трехступенной волоконно-оптический гироскоп, оси катушек которого ориентированы по вертикальной, продольной и поперечной осям воздушного судна.

Таким образом развитие разработок в области применения волоконно-оптических гироскопов является перспективным направлением.

Литература

1. Пельпор Д.С. Гироскопические системы. Гироскопические приборы и системы. – 2-е изд. – М.: Высшая школа, 2008. – 424 с.
2. Бутиков Е.И. Динамика вращения твердого тела: Учебное пособие / Санкт-Петербургский технический университет. – Санкт-Петербург. 2007. – 96с.

УДК 504.3+621.398

В.И. Замай, А.Н. Маматов

*Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР
Бишкек, Кыргызстан*

РАЗРАБОТКА ПИЛОТНОЙ ВЕРСИИ ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЯ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПАРАМЕТРОВ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ

Предлагается программное обеспечение пилотной версии веб-приложения автоматизированной системы мониторинга параметров природной среды. Веб-приложение обеспечивает автоматизированное добавление новых пользователей, новых станций системы и сенсоров, добавление возможности экспорта данных мониторинга в excel, csv и др. форматах, а также реализацию управления удаленными станциями через сеть интернет.

Ключевые слова: мониторинг природных катастроф, параметры природной среды, сервер системы мониторинга, оповещение, селе-паводковые угрозы.

Введение. Автоматизированная система мониторинга параметров природной среды (АСМ ППС) горных территорий представляет собой программно-аппаратный комплекс, выполняющий достаточно сложные функции сбора, обработки, хранения и передачи информации, в котором программная составляющая занимает существенное место. Разработка пилотной версии веб-приложения и её применение в АСМ ППС позволит значительно расширить функциональные возможности системы.

Разработка программных средств. Для разработки пилотной версии (ПС) веб-приложения нами был выбран современный прототипно-ориентированный сценарный язык программирования JavaScript и использованы библиотеки и фреймворки. При этом использована среда разработки JetBrainsPyCharm.

JavaScript является реализацией языка ECMAScript (стандарт ECMA-262), обычно используется как встраиваемый язык для программного доступа к объектам приложений и наиболее широкое применение находит в браузерах как язык сценариев для придания интерактивности веб-страницам.

Язык JavaScript похож на Java, но при этом является более лёгким для использования непрограммистами. Привлекательно то, что языком JavaScript не является какой-либо компании или организации, что отличает его от ряда языков программирования, используемых в веб-разработках. Название «JavaScript» является зарегистрированным товарным знаком компании OracleCorporation.

В веб-клиенте системы мониторинга нами использовались следующий библиотеки:

- angular
- moment
- bootstrap
- angular-material
- material-design-icons
- d3
- angular-nvd3

В серверной части использовались библиотеки:

- basic-auth
- bluebird
- body-parser
- bookshelf
- express
- js-md5
- knex
- koa
- koa-bodyparser
- koa-favicon
- koa-json
- koa-qs
- koa-router
- node-static
- pg
- pg-hstore
- sequelize
- ws

Структура базы данных представлена в таблицах 1 – 7, схема базы данных АСМ ППС приведена на рис. 1.

Таблица 1 Таблица stations

Название поля	Описание
id	Идентификатор периферийной станции
name	Название периферийной станции
mac	Mac адрес устройства
data	Дополнительная информация о станции

Таблица 2 Таблица modules

Название поля	Описание
id	Идентификатор сенсорного модуля
name	Название сенсорного модуля
data	Дополнительная информация о модуле
station_id	Идентификатор станции, к которой относится модуль

Таблица 3 Таблица sensors

Название поля	Описание
id	Идентификатор измерительной величины
name	Название измерительной величины
short_name	Короткое название
measure_name	Название на английском
symbol	Обозначение измерительной величины
data	Дополнительная информация

Таблица 4 Таблица sensorlog

Название поля	Описание
id	Идентификатор события
value	Значение измерительной величины

critical	Критическое значение
station_id	Идентификатор станции
module_id	Идентификатор модуля
sensor_id	Идентификатор измерительной величины

Таблица 5 Таблица critical_values

Название поля	Описание
id	Идентификатор критического значения
sensor_id	Идентификатор измерительной величины
module_id	Идентификатор модуля
low	Минимальное значение
high	Максимальное значение

Таблица 6 Таблица users

Название поля	Описание
id	Идентификатор пользователя
username	Логин пользователя
password	Пароль пользователя
data	Дополнительная информация
secure	Секретный ключ
role	Привилегии пользователя

Таблица 7 Таблица user_tokens

Название поля	Описание
id	Идентификатор токена
device	Логин пользователя
imei	Идентификатор устройства
token	Токен
user_id	Идентификатор пользователя

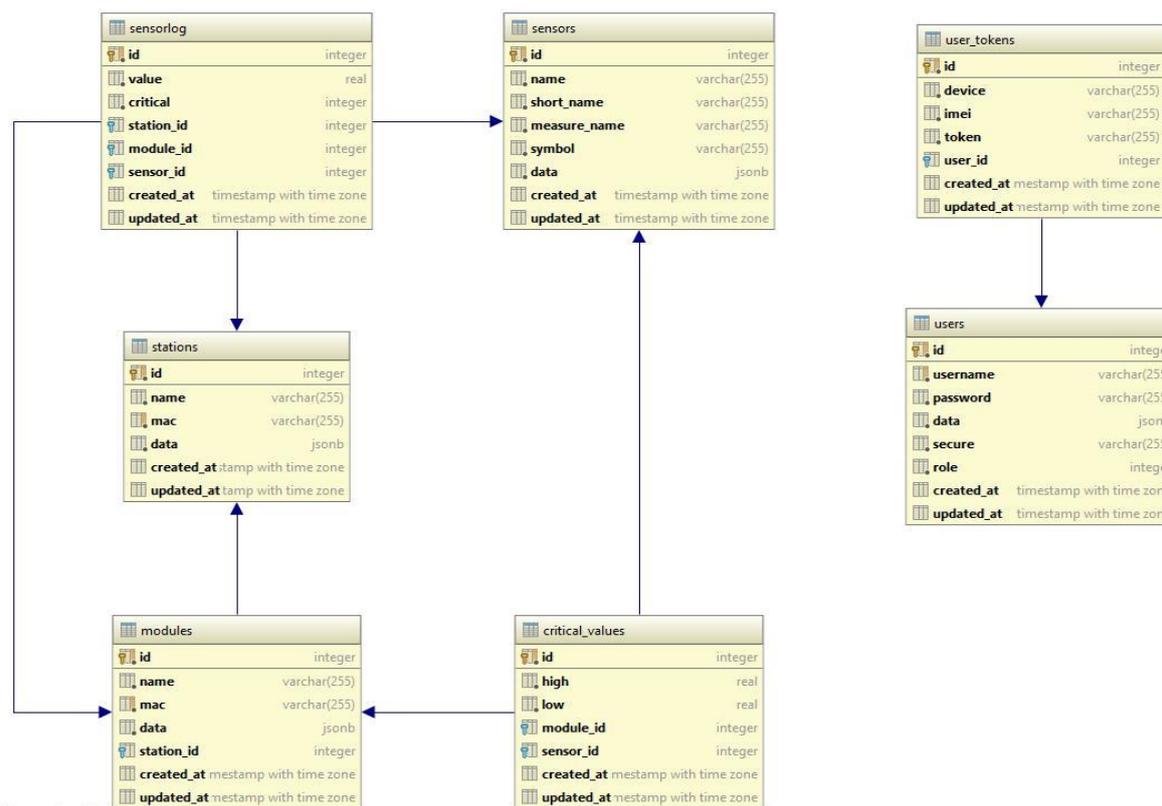


Рис. 1. Схема базы данных АСМ ППС

Веб-приложение системы АСМ ППС

Нами разработан удобный дизайн веб-приложения, для чего оно разбито на страницы. Функциональное назначение каждой страницы приводится ниже.

Карта – данная страница отображает станции и модули АСМ ППС на карте Google. При нажатии на маркер левой кнопкой мыши открывается название станции или модуля, нажав на которое можно посмотреть подробную информацию (Рис. 2).

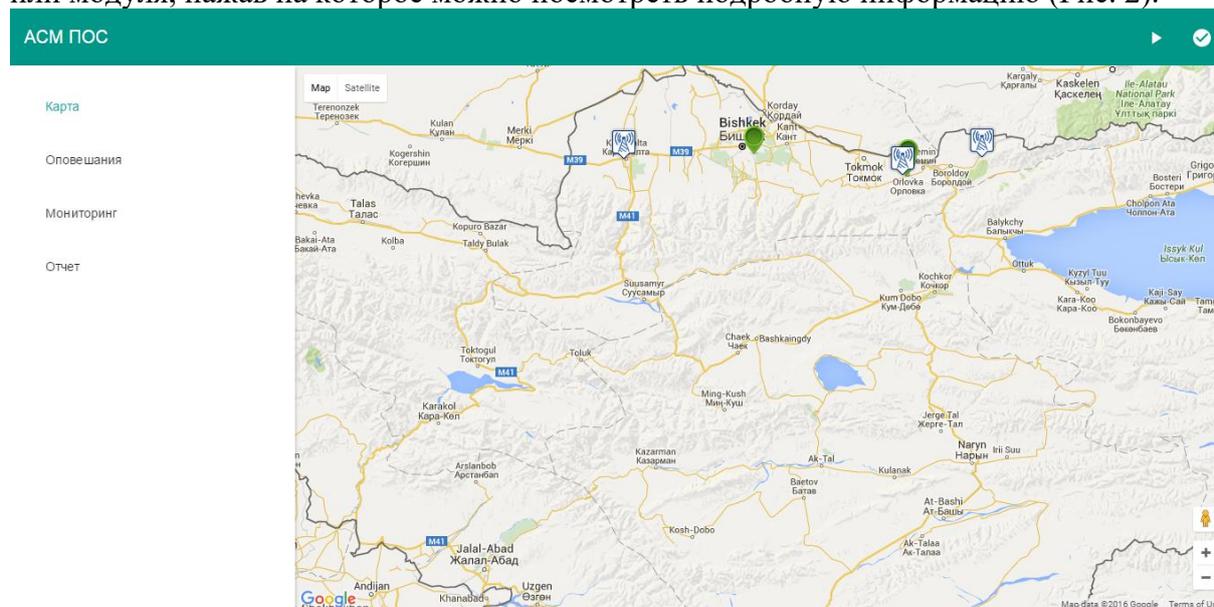


Рис. 2. Страница отображения базовых станций на карте

Оповещения – на данной странице будут отображаться последние полученные критические данные о селе-паводковой угрозе от модулей (Рис. 3).

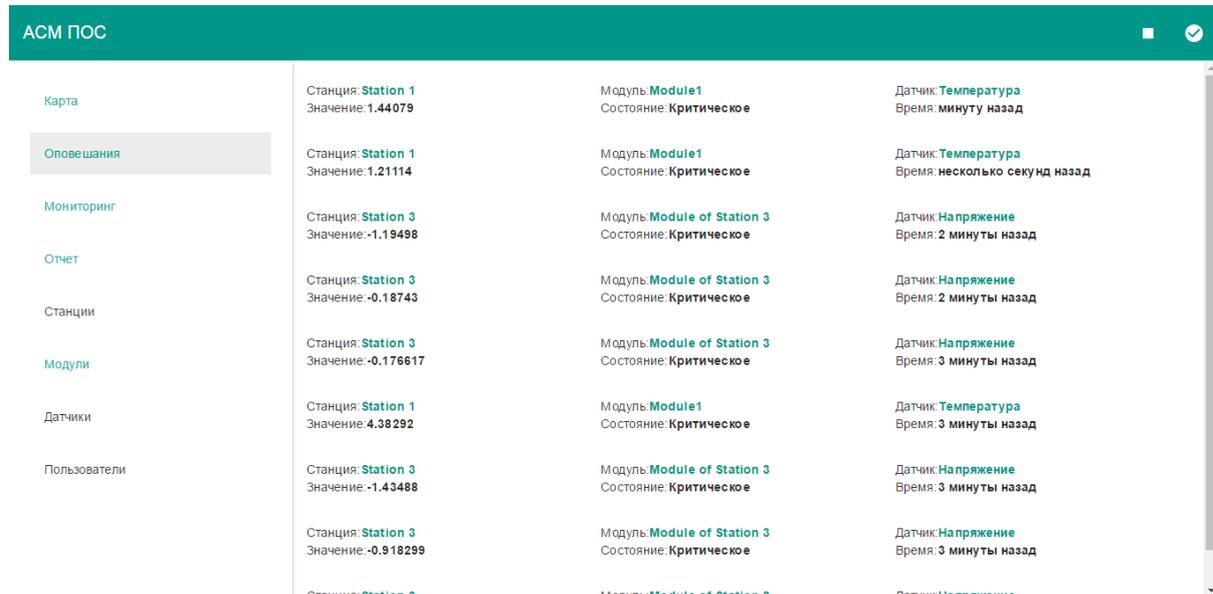


Рис. 3. Страница просмотра последних оповещений

Мониторинг – страница для онлайн мониторинга получаемых от модулей данных. Для выбора модулей, данные которых нужно отображать на графике, необходимо нажать на кнопки «Станции» и «Модули» и в появившемся окне выбрать интересные модули. Для выбора показателя интересующего датчика следует нажать на одну из кнопок с названием датчиков. (Рис. 4 – 6).

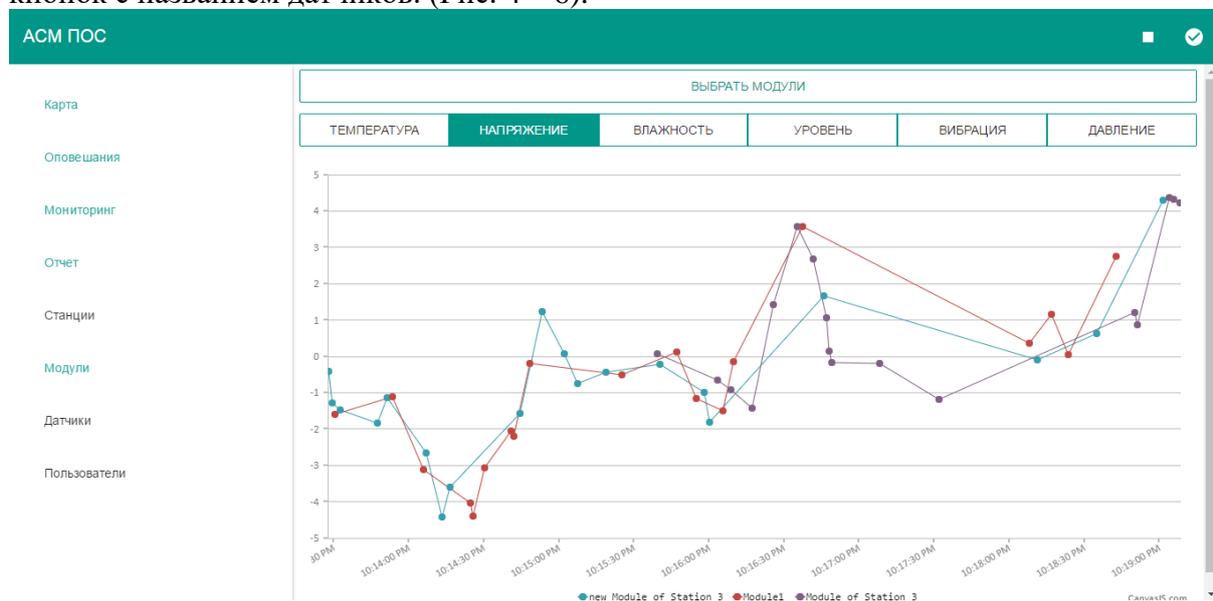


Рис. 4. Страница просмотра показаний датчиков в реальном времени

Отчет – страница для просмотра историй полученных от модулей данных. Принцип работы такой же, как и у страницы мониторинга, только с возможностью выбирать интервал времени, за который будет показан отчет по мониторингу. Для выбора интервала на странице есть два текстовых поля «Начало» и «Конец». Указав в них нужные даты, нажать на кнопку «Показать» (Рис. 5, 6). Кроме того, в странице «Отчет» преду-

смотрены возможности экспорта данных в Excel и CSV и возможность предварительного просмотра отчета в виде таблицы.

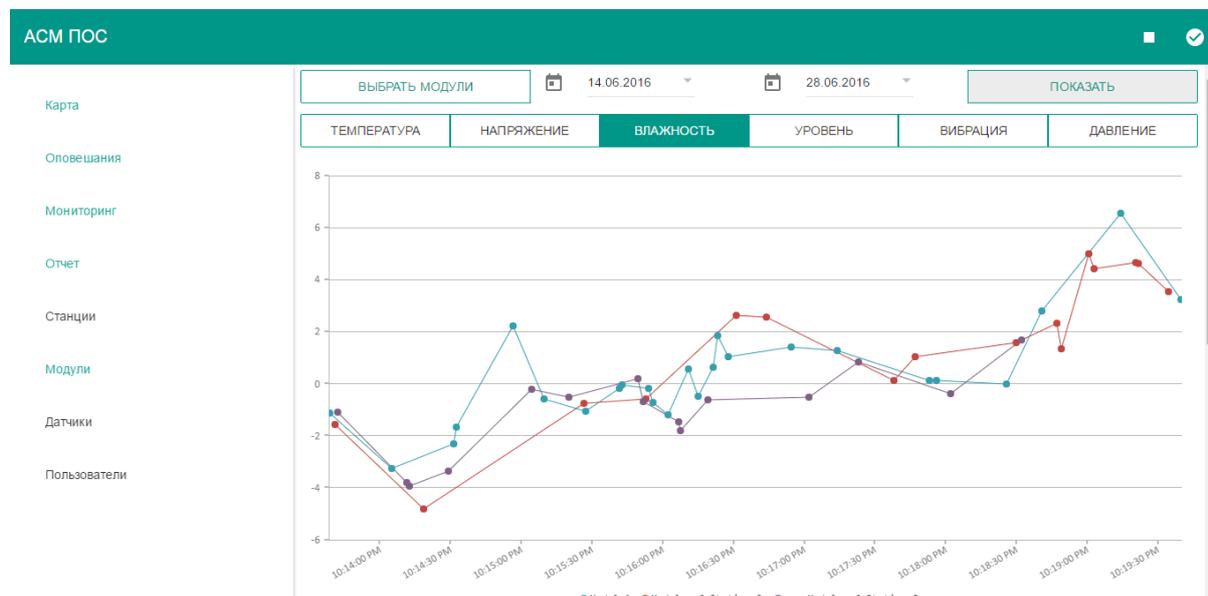


Рис. 5. Страница просмотра отчета показаний датчиков

ID	Значение	Датчик	Модуль	Станция	Дата
4140	3.16827	Влажность	Module1	Station 1	Сегодня в 22:19
4139	3.7367	Влажность	Module of Station 3	Station 3	Сегодня в 22:19
4138	3.21528	Влажность	Module1	Station 1	Сегодня в 22:19
4133	3.53992	Влажность	Module of Station 3	Station 3	Сегодня в 22:19
4121	4.60895	Влажность	Module of Station 3	Station 3	Сегодня в 22:19
4120	4.6428	Влажность	Module of Station 3	Station 3	Сегодня в 22:19
4114	6.54003	Влажность	Module1	Station 1	Сегодня в 22:19
4103	4.41184	Влажность	Module of Station 3	Station 3	Сегодня в 22:19
4101	4.98613	Влажность	Module of Station 3	Station 3	Сегодня в 22:19
4099	3.81458	Влажность	new Module of Station 3	Station 3	Сегодня в 22:18

Рис. 6. Страница просмотра отчета показаний датчиков (продолжение)

Станции – страница просмотра списка станций. Список станций представлен в виде таблицы с полями «ID», «Название станции», «MAC адрес», «Создан», «Обновлен», «Действие». В поле «Действие» есть кнопка «Изменить/Посмотреть» и кнопка «Удалить». После нажатия на кнопку «Изменить» осуществляется переход на страницу с полной информацией о станции, где можно изменять данные о станции и удалять их. Так же на странице просмотра станции отображается список модулей, принадлежащих станции. Для создания новой станции на странице «Станции» необходимо нажать на кнопку «Новая станция» (Рис.7).

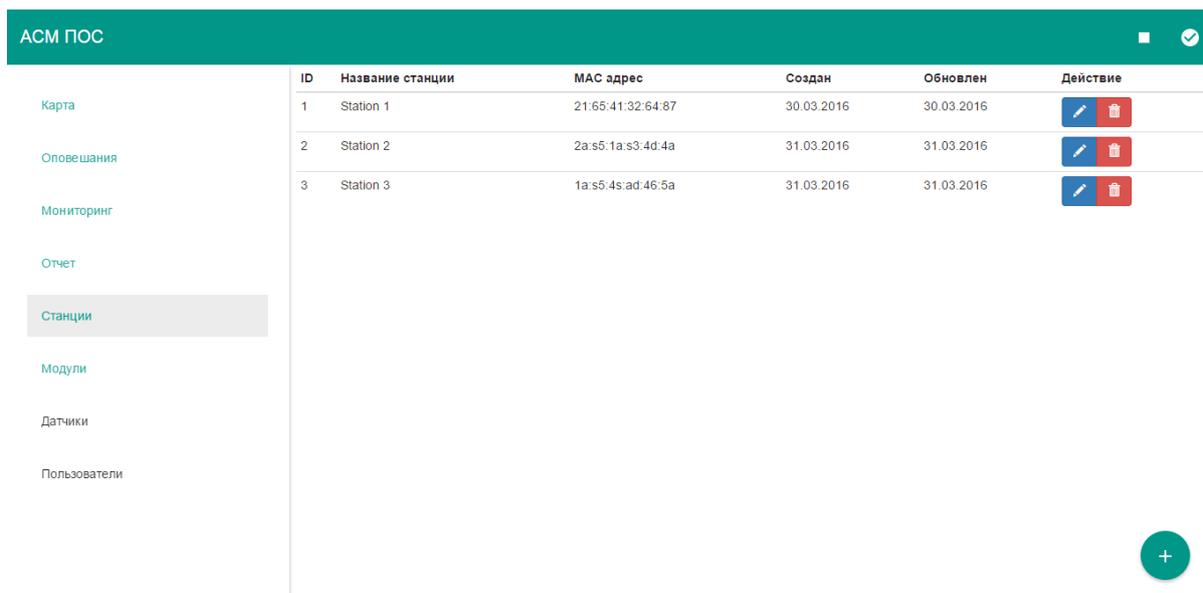


Рис. 7. Страница со списком станций

Модули – данная страница также похожа на страницу «Станции», только в ней отображается список модулей. На этой странице можно указывать критические значения для датчиков модуля. Со страницы просмотра модуля можно переходить на страницу просмотра станции, к которой относится модуль. Новый модуль можно создать так же, как и на странице «Станции». На Рис. 8 представлена страница редактирования параметров модуля, а на Рис.9 – страница редактирования параметров датчика.

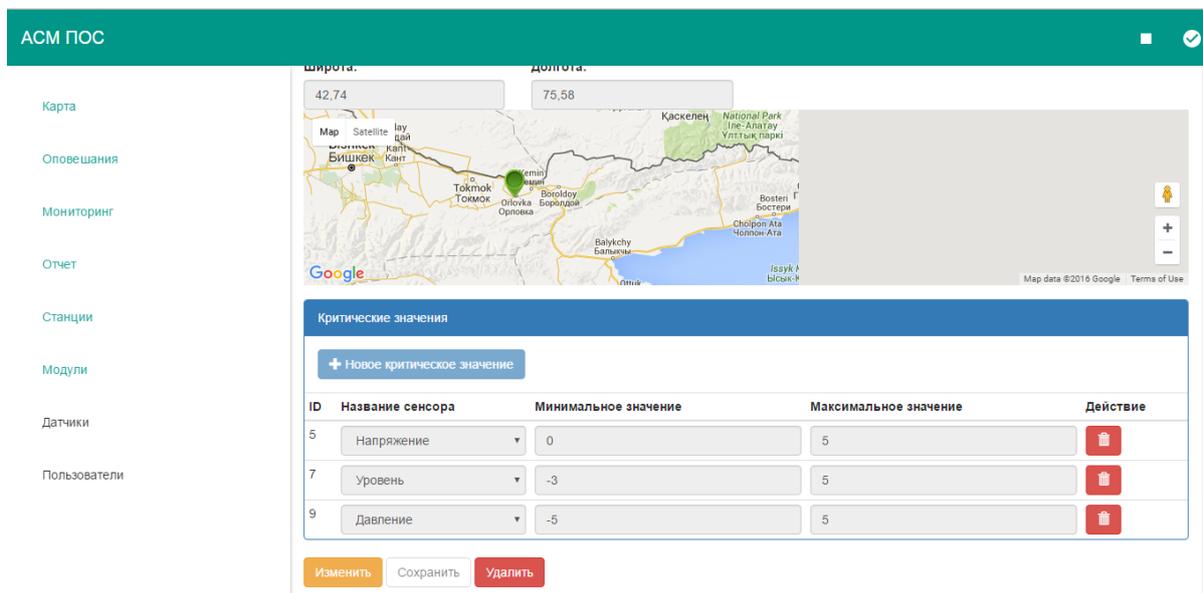


Рис. 8. Страница редактирования параметров модуля

Сенсоры – страница идентична предыдущим двум страницам. Имеет такие же функционалы.

Рис. 9. Страница редактирования параметров датчика

Пользователи – страница по функционалу и виду такая же, как и страницы «Станции», «Модули» и «Сенсоры» (Рис. 10). На странице «Просмотр пользователя» есть возможность указывать привилегии пользователя. Страницы «Карта», «Оповещения», «Мониторинг», «Отчет» не требуют привилегии пользователя или авторизации. Страницы «Станции», «Модули», «Сенсоры» требуют привилегии оператора. Страница «Пользователи» требует привилегии администратора.

Рис. 10. Страница редактирования данных пользователя

В разработанной пилотной версии веб-приложения АСМ ППС все пункты меню для доступа к определенным страницам расположены в левой части страницы.

В итоге, нами для этой версии:

- разработана система аутентификации с ролями, с доступом к определенным функциям веб-приложения;
- поставлено ограничение доступа к определенным страницам;
- веб приложение полностью разделено на пользовательскую часть (front-end) и серверную часть (back-end), которые общаются посредством REST архитектуры;
- улучшена производительность;
- добавлен модуль для моментального оповещения о критических значениях параметров природной среды.

Заключение. Разработанный удобный дизайн веб-приложения, добавление пользователей/ролей и системы аутентификации, автоматизированное добавление новых станций и сенсоров, добавление возможности экспорта данных мониторинга в excel, csv и др. форматах, доработка api для двустороннего обмена данными со станциями и реализация удаленного управления базовыми станциями существенно повышают функциональные возможности созданной в Институте автоматизации и информационных технологий НАН КР автоматизированной системы мониторинга параметров природной среды.

Литература

1. Замай В.И., Добровольский Н.С. Автоматизированная система сбора и передачи данных для целей мониторинга параметров окружающей среды в бассейнах горных рек. // ГеоРиск. – 2012. №4. С. 64–68.
2. Добровольский Н.С., Замай В.И., Баймуратов Б.Б. Разработка прикладного программного обеспечения автоматизированной системы параметров окружающей среды горных территорий // Проблемы автоматизации и управления. – 2014, №1 (26). – С. 30–38.
3. Добровольский Н.С., Замай В.И., Баймуратов Б.Б. Разработка серверного программного обеспечения автоматизированной системы мониторинга параметров окружающей среды горных территорий // Проблемы автоматизации и управления. – 2014, № 1 (26) – С. 39–46.
4. Замай В.И., Маматов А.Н., Добровольский Н.С. Разработка программного обеспечения сервера системы сбора и передачи данных мониторинга параметров природной среды // Проблемы автоматизации и управления. – 2016, – №2 (31) – С. 27–31.

С.Н.Верзунов, Н.М.Лыченко

Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР

г. Бишкек, Кыргызстан

E-mail: verzunov@hotmail.com, nlychenko@mail.ru

МУЛЬТИВЕЙВЛЕТНАЯ ПОЛИМОРФНАЯ СЕТЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ

В работе предложена мультивейвлетная полиморфная сеть для прогнозирования геофизических временных рядов на примере хаотической составляющей временного ряда вариаций превышения продолжительности суток.

Ключевые слова: прогнозирование хаотических временных рядов, параметры вращения Земли, мультивейвлетная полиморфная сеть, превышение продолжительности суток, полиморфный SLOG вейвлет.

Введение. Улучшение точности прогнозирования временных рядов в настоящее время является основной целью многих научных работ в области изучения геофизических процессов [1–3]. Однако, препятствием для успешного решения этой задачи являются ограничения, связанные с нестационарностью большинства рядов, с наличием случайных и, что важнее, кажущихся случайными помех. Помехи могут быть обусловлены как средствами измерений, ошибками наблюдений, так и взаимодействиями данного процесса с остальными процессами геофизической системы, нелинейный характер которых порождает кажущийся на первый взгляд случайным временной ряд.

Для прогнозирования временных рядов в геофизике традиционно использовались различные аналитические модели, основанные на знании физических законов, лежащих в основе изучаемого процесса. Для построения таких моделей необходимо учесть влияние всех значимых для хода процесса факторов, что практически невозможно. В последние десятилетия в работах Дж. Бокса, Г. Дженкинса, М. Кенделла и др. активно развивались различные численные методы прогноза: авторегрессия, ARIMA, GARCH и другие. Каждый из них имеет свои достоинства и ограничения. Так, например, для построения авторегрессионных моделей необходимо, чтобы временной ряд был стационарным или приводился к таковому путем взятия разности первого, второго или большего порядков. Но временные ряды, встречающиеся в сейсмологии, геологии, а также при анализе различных геофизических полей, часто являются нестационарными. Причём нестационарность отражается в проявлении детерминированного или стохастического тренда, изменяющейся со временем дисперсии и ковариации, что требует использования особых методов для построения моделей прогнозирования. Кроме того, как сказано в работе [2]: «повышение точности регистрирующих систем привело к эффекту микроскопа – стали видны реальные, не вызванные ошибками наблюдений почти случайные флуктуации многих геофизических процессов. По этим причинам методы прогнозирования становятся все более изощренными». В связи с этим в последние годы появилось множество работ, посвященных использованию искусственных нейронных сетей для прогнозирования временных рядов. В частности для задач прогноза в настоящее время используются искусственные нейронные сети с элементами временной задержки [4], синтезируемые нечеткие сети [5], сети со случайными связями между нейронами [1]. В последнее время активно развиваются методы прогноза, основанные

на объединении вейвлет- и нейросетевых технологий [6, 7] и, в частности вейвлет-сети, представляющие собой новый класс искусственных нейронных сетей. Вейвлет-сети были предложены в качестве альтернативы сетям прямого распространения и сочетают в себе преимущества вейвлет-технологий и искусственных нейронных сетей. Они нашли применение во многих областях, таких как, например, финансовое моделирование, системы управления и прогнозирование временных рядов [8]. При этом с помощью вейвлет-сетей удастся предсказывать хаотические временные ряды, т.е. такие, в которых текущий отсчет ряда нелинейно зависит от уровней ряда в предыдущие моменты времени [9]. Хаотические временные ряды порождаются нелинейными динамическими системами, чувствительными к начальным условиям, и могут проявлять сложное внешнее поведение так называемого детерминированного хаоса. В работе [3] показано, что в той или иной мере это свойство присуще многим геофизическим временным рядам различной природы: объёмных деформаций, кажущегося сопротивления, концентрации радона, уровней воды в скважинах и относительных вертикальных смещений, зарегистрированных в различных сейсмоактивных регионах, что обусловлено изменениями некоторого числа нелинейно взаимодействующих физических факторов. В настоящей работе в качестве примера таких временных рядов рассматриваются вариации параметров вращения Земли и, в частности, скорости собственного вращения Земли.

Для описания ориентации Земли традиционно используется пять параметров, определяющих положение оси вращения в теле Земли и инерциальной системе координат, а также скорость собственного вращения Земли вокруг оси. Положение оси вращения в инерциальной системе координат – Международной небесной системе отсчёта, связанной с бариоцентром (центром масс) Солнечной системы, задается углами прецессии и нутации. Разница между астрономически определяемой продолжительностью дня и 86400 секундами называется превышением продолжительности суток (ППС). И, наконец, координаты полюса x_p и y_p задают положение мгновенной оси вращения Земли в системе отсчета, связанной с Землёй. Координаты полюса определяются в левосторонней прямоугольной системе, центр которой связан с полюсом, ось X направлена вдоль Гринвичского меридиана, ось Y – по направлению меридиана 90° западной долготы. Данные о параметрах публикуются в бюллетене Международной службы вращения Земли и опорных систем координат в виде так называемого ряда EOPC04, содержащего параметры вращения Земли с 1962 г. по настоящее время с шагом в одни сутки.

Для разных прикладных задач необходим прогноз с различной степенью упреждения. Требуемая длительность прогноза варьируется от нескольких часов, для оперативного обслуживания спутниковых навигационных систем и дифференциальной навигации до нескольких месяцев для морской и космической навигации. Для обеспечения наблюдательных программ в астрономии и космической геодезии требуется прогноз параметров вращения Земли длительностью до нескольких недель, а для некоторых приложений, таких как издание астрономических и навигационных ежегодников, требуется прогноз длительностью до 1-2 лет [10]. Среди пяти параметров вращения Земли особую важность для геофизических приложений, в частности для прогноза сейсмической активности, представляют три: координаты полюса x_p и y_p в системе отсчета, связанной с Землей, и ППС. Наибольшую сложность для прогноза представляет ППС, что обусловлено влиянием на продолжительность суток ряда климатических и геофизических факторов [1].

Для прогноза параметров вращения Земли используются различные методы, в том числе различные авторегрессионные модели, искусственные нейронные сети, и другие. Сравнительный анализ применения этих методов прогноза приведён в работе [11], где показано, что в настоящее время не существует метода прогноза, одинаково эффектив-

ного для всех параметров вращения Земли и интервалов прогнозирования. Поэтому, в настоящее время, повышение точности прогнозирования геофизических временных рядов, в частности скорости вращения Земли, с помощью вейвлет- и нейро- сетевых технологий и определение границ применимости такого прогноза является актуальной задачей.

Мультивейвлетная полиморфная сеть. Вейвлет-сеть представляет собой трёхслойную нейронную сеть, в которой первый слой является входным, второй – скрытым, а третий – выходным. Входной слой служит для ввода в сеть исходных данных. Нейроны скрытого слоя, также называемые вейвлет-нейронами, являются аналогами нейронов с сигмовидной функцией активации в классических нейронных сетях. В скрытом слое входные данные преобразуются с помощью сдвинутого и сжатого материнского вейвлета и, наконец, в выходном слое формируется выходное значение вейвлет-сети, сравнивающееся затем с целевым значением, а расхождение между ними используется для настройки параметров сети.

Были предложены различные структуры вейвлет-сетей, однако, общая их идея заключается в настройке параметров сжатия и сдвига вейвлет-нейронов для наилучшего обучения данным. Так, Чжао и др. предложили [12] мультивейвлетную нейронную сеть, в которой используется многомерный вейвлет в качестве функции активации вейвлет-нейронов в скрытом слое, что позволяет аппроксимировать многомерные функции. А в работе [13] предложена полиморфная вейвлет-сеть, отличающаяся наличием дополнительного настраиваемого параметра материнского вейвлета и позволяющая более точно аппроксимировать нестационарные временные ряды. В настоящей работе предлагается мультивейвлетная полиморфная сеть, объединяющая преимущества рассмотренных в работах [12, 13] вейвлет-сетей.

Выход традиционной мультивейвлетной сети определяется уравнением

$$\hat{y}(\mathbf{x}) = g_{\lambda}(\mathbf{x}; \mathbf{w}) = w_{\lambda+1}^{[2]} + \sum_{j=1}^{\lambda} w_j^{[2]} \cdot \Psi_j(\mathbf{x}) + \sum_{i=1}^m w_i^{[0]} \cdot x_i, \quad (1)$$

где $\Psi_j(\mathbf{x})$ – многомерный вейвлет, задающийся как произведение m скалярных вейвлетов, \mathbf{x} – вектор входных данных, m – количество входов, λ – количество скрытых вейвлет-нейронов и \mathbf{w} – параметры сети: $w_{\lambda+1}^{[2]}$ – вес смещения, $w_i^{[0]}$ – веса линейных связей, $w_j^{[2]}$ – веса нелинейных связей. Многомерный вейвлет в формуле (1) вычисляется как

$$\Psi_j(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^m \psi(z_{ij}), \quad (2)$$

где ψ – материнский вейвлет, и

$$z_{ij} = \frac{x_i - w_{(\xi)ij}^{[1]}}{w_{(\zeta)ij}^{[1]}}. \quad (3)$$

В выражении (3) $i=1, \dots, m, j=1, \dots, \lambda+1$, $w_{(\xi)ij}^{[1]}$ – параметры сдвигов и $w_{(\zeta)ij}^{[1]}$ – параметры масштабов вейвлетов.

В качестве материнского обычно используются такие вейвлеты как [8] первая производная Гауссианы т.н. «WAVE-вейвлет»:

$$\psi(z_{ij}) = z_{ij} e^{-0.5z_{ij}^2}, \quad (4)$$

вторая производная Гауссианы т.н. «Мексиканская шляпа»

$$\psi(z_{ij}) = (1 - z_{ij}^2) e^{-0.5z_{ij}^2}, \quad (5)$$

или вейвлет Морле

$$\psi(z_{ij}) = \cos(5z_{ij}) e^{-0.5z_{ij}^2}. \quad (6)$$

Выбор материнского вейвлета зависит от решаемой задачи и не ограничивается приведенными выше функциями, в частности, можно использовать ортогональные вейвлеты и вейвлет-фреймы. В мультивейвлетной полиморфной сети (рис. 1) используются материнские вейвлеты с дополнительным настраиваемым параметром,

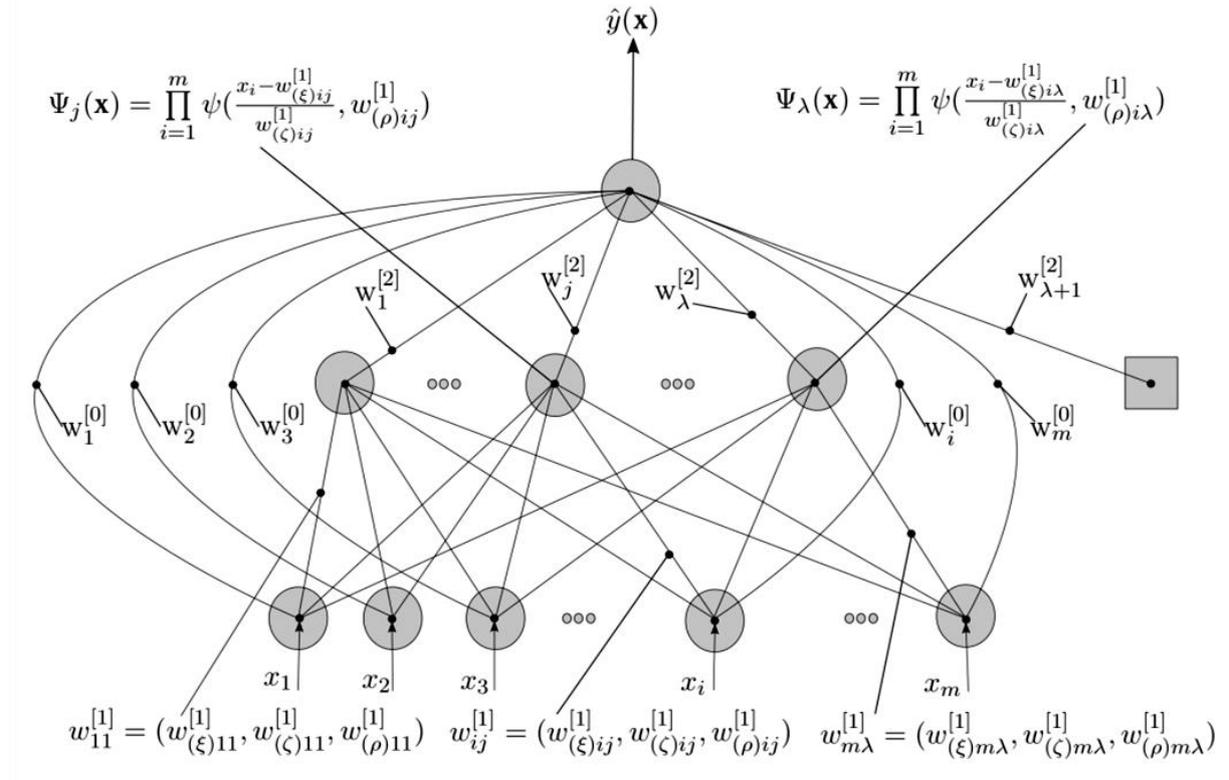


Рис. 1. Мультивейвлетная полиморфная сеть.

изменяющим форму вейвлета способом, отличным от сжатия и сдвига. Например, можно использовать полиморфный материнский вейвлет Superposed LOGistic functions («супрепозиция логистических функций»), известный как SLOG:

$$\psi(z_{ij}, w_{(\rho)ij}^{[1]}) = \frac{1}{1 + e^{-z_{ij} + w_{(\rho)ij}^{[1]}}} - \frac{1}{1 + e^{-z_{ij} + 3w_{(\rho)ij}^{[1]}}} - \frac{1}{1 + e^{-z_{ij} - 3w_{(\rho)ij}^{[1]}}} + \frac{1}{1 + e^{-z_{ij} - w_{(\rho)ij}^{[1]}}},$$

где $w_{(\rho)ij}^{[1]}$ – дополнительный настраиваемый параметр формы вейвлета, определяющий скорость его затухания (рис. 2).

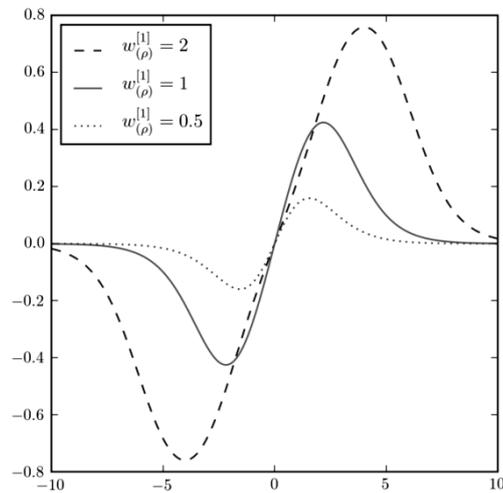


Рис. 2. Полиморфный SLOG вейвлет.

Тогда формула (2) будет иметь вид

$$\Psi_j(\mathbf{x}) = \prod_{i=1}^m \psi(z_{ij}, w_{(\rho)ij}^{[1]})$$

Полный вектор параметров сети включает $\mathbf{w} = (w_i^{[0]}, w_j^{[2]}, w_{\lambda+1}^{[2]}, w_{(\zeta)ij}^{[1]}, w_{(\xi)ij}^{[1]}, w_{(\rho)ij}^{[1]})$. Эти параметры настраиваются в процессе обучения сети путём минимизации среднеквадратической ошибки

$$E = \frac{1}{2n} \sum_{p=1}^n (y_p - \hat{y}_p)^2, \quad (7)$$

где n – количество используемых для обучения сети примеров, y_p – требуемое значение выхода сети, \hat{y}_p – действительное значение выхода сети. Среднеквадратическая ошибка минимизируется одним из итерационных методов многомерной оптимизации с использованием частных производных среднеквадратической ошибки по параметрам сети:

$$\frac{\partial E}{\partial \mathbf{w}} = -\frac{1}{n} \sum_{p=1}^n e_p \frac{\partial \hat{y}_p}{\partial \mathbf{w}}, \quad (8)$$

где $e_p = y_p - \hat{y}_p$. Используя выражение (8), можно найти частные производные среднеквадратической ошибки по всем параметрам сети, так

$$\begin{aligned} \frac{\partial \hat{y}_p}{\partial w_{\lambda+1}^{[2]}} &= 1, \\ \frac{\partial \hat{y}_p}{\partial w_i^{[0]}} &= x_i, i = 1, \dots, m, \\ \frac{\partial \hat{y}_p}{\partial w_j^{[2]}} &= \Psi_j(\mathbf{x}), j = 1, \dots, \lambda, \\ \frac{\partial \hat{y}_p}{\partial w_{(\xi)ij}^{[1]}} &= -\frac{w_j^{[2]}}{w_{(\xi)ij}^{[1]}} \psi(z_{1j}, w_{(\rho)1j}^{[1]}) \dots \frac{\partial \psi(z_{ij}, w_{(\rho)ij}^{[1]})}{\partial w_{(\xi)ij}^{[1]}} \dots \psi(z_{mj}, w_{(\rho)mj}^{[1]}), \\ \frac{\partial \hat{y}_p}{\partial w_{(\rho)ij}^{[1]}} &= -\frac{w_j^{[2]}}{w_{(\rho)ij}^{[1]}} \psi(z_{1j}, w_{(\rho)1j}^{[1]}) \dots \frac{\partial \psi(z_{ij}, w_{(\rho)ij}^{[1]})}{\partial w_{(\rho)ij}^{[1]}} \dots \psi(z_{mj}, w_{(\rho)mj}^{[1]}), \\ \frac{\partial \hat{y}_p}{\partial w_{(\zeta)ij}^{[1]}} &= z_{ij} \frac{\partial \hat{y}_p}{\partial w_{(\xi)ij}^{[1]}}. \end{aligned}$$

В частности, для полиморфного SLOG вейвлета

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi(z_{ij}, w_{(\rho)ij}^{[1]})}{\partial w_{(\xi)ij}^{[1]}} &= -\frac{e^{-z_{ij} + w_{(\rho)ij}^{[1]}}}{a(1 + e^{-z_{ij} + w_{(\rho)ij}^{[1]}})^2} + \frac{e^{-z_{ij} + 3w_{(\rho)ij}^{[1]}}}{a(1 + e^{-z_{ij} + 3w_{(\rho)ij}^{[1]}})^2} + \frac{e^{-z_{ij} - 3w_{(\rho)ij}^{[1]}}}{a(1 + e^{-z_{ij} - 3w_{(\rho)ij}^{[1]}})^2} - \frac{e^{-z_{ij} - w_{(\rho)ij}^{[1]}}}{a(1 + e^{-z_{ij} - w_{(\rho)ij}^{[1]}})^2}, \\ \frac{\partial \psi(z_{ij}, w_{(\rho)ij}^{[1]})}{\partial w_{(\rho)ij}^{[1]}} &= -\frac{e^{-z_{ij} + w_{(\rho)ij}^{[1]}}}{(1 + e^{-z_{ij} + w_{(\rho)ij}^{[1]}})^2} + \frac{3e^{-z_{ij} + 3w_{(\rho)ij}^{[1]}}}{(1 + e^{-z_{ij} + 3w_{(\rho)ij}^{[1]}})^2} - \frac{3e^{-z_{ij} - 3w_{(\rho)ij}^{[1]}}}{(1 + e^{-z_{ij} - 3w_{(\rho)ij}^{[1]}})^2} + \frac{e^{-z_{ij} - w_{(\rho)ij}^{[1]}}}{(1 + e^{-z_{ij} - w_{(\rho)ij}^{[1]}})^2}. \end{aligned}$$

Параметры сети пересчитываются на каждой итерации по формуле

$$\mathbf{w}_{v+1} = \mathbf{w}_v - \eta \frac{\partial E}{\partial \mathbf{w}_v} + \kappa(\mathbf{w}_v - \mathbf{w}_{v-1}), \quad (9)$$

где v – номер итерации, η – параметр скорости обучения и κ – параметр момента. Конкретные значения параметров η и κ зависят от используемого итерационного метода многомерной оптимизации.

Анализ временного ряда. Для анализа используется временной ряд вариаций ППС ЕОРС04 [14]. Как видно из скользящего среднего

$$m_t = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} l_{(t-i)}$$

и скользящего среднеквадратического отклонения

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} (l_{(t-i)} - m_t)^2}$$

со сглаживающим интервалом $n = 100$ этот временной ряд (рис. 3. а) имеет тренд и периодически изменяющееся среднеквадратическое отклонение, а, значит, является нестационарным.

Предположим, что временной ряд вариаций ППС может быть представлен в виде аддитивной модели как

$$l_t = d_t + s_t + x_t,$$

где d_t – трендовая составляющая (тренд), s_t – сезонная составляющая (сезонность), x_t – хаотическая составляющая (остатки). Причём, тренд с достаточной точностью можно аппроксимировать полиномом, а сезонность – рядом Фурье (см. рис. 3. б):

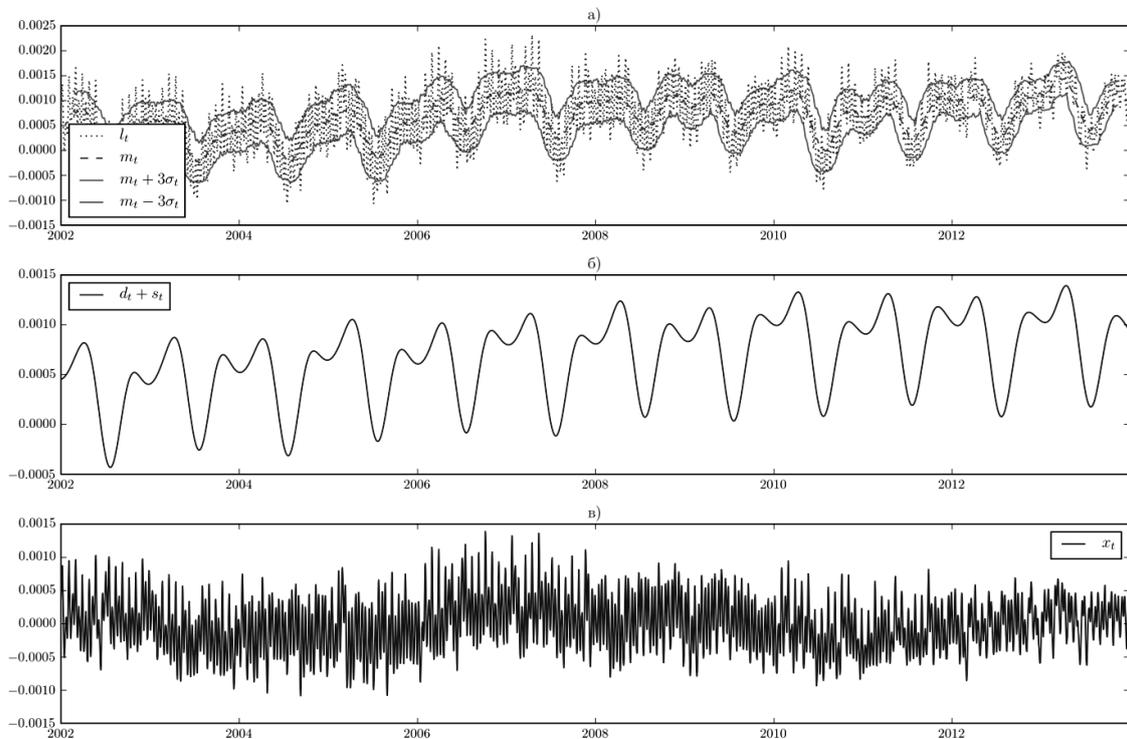


Рис 3. а – временной ряд вариаций ППС; б – тренд и сезонность; в – остатки.

$$l_t = \sum_{i=1}^M a_i t^{i-1} + \sum_{j=1}^L b_j \cos(c_j t + d_j) + x_t,$$

где параметры a_i , b_j , c_j , d_j определяются по методу наименьших квадратов, а M , L подбираются на основании графика временного ряда (см. рис. 3. а) и частотных спектров временного ряда, показанных на рис. 4.

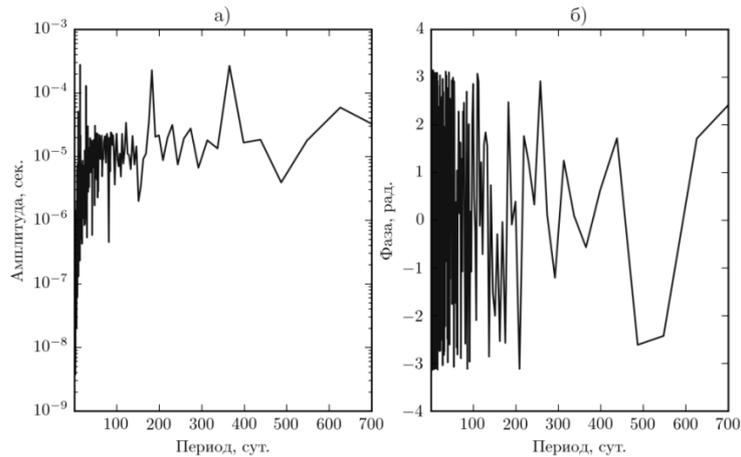


Рис. 4. Спектры временного ряда вариаций ППС: а – частотный, б – фазовый.

Анализ временного ряда и его спектров позволяет заключить, что он содержит линейный тренд и постоянную составляющую (т.е. $M = 2$), две длиннопериодические компоненты (приблизительно 625, 365 дней), две среднепериодические (приблизительно 183, 121 день), а также несколько короткопериодических компонент, связанных с вращением Земли вокруг своей оси и с вращением Луны вокруг Земли (см. рис. 4. а). Длинно- и среднепериодические компоненты могут быть аппроксимированы четырьмя членами ряда Фурье (т.е. $L = 4$). Однако, фаза короткопериодических компонентов не остаётся постоянной во времени (см. рис. 4 б), и для их аппроксимации оказывается невозможным использовать ряд Фурье. Поэтому их следует отнести к хаотической составляющей временного ряда (рис. 3 в), а для её прогнозирования предлагается использовать мультивейвлетную полиморфную сеть.

Прогноз временного ряда. Итак, рассматривается хаотическая составляющая x_t временного ряда вариаций ППС. Известны N значений этого временного ряда, взятые через равные промежутки времени $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$, и необходимо прогнозировать K значений в будущие моменты времени: $x_{N+1}, x_{N+2}, x_{N+3}, \dots, x_{N+K}$.

В основе предлагаемого метода прогноза, как, впрочем, и большинства методов, связанных с обработкой временных рядов, лежит построение векторов задержек:

$$\mathbf{x}_n = (x_n, x_{n+1}, \dots, x_{n+p-1})^T, n = 1, 2, \dots, N - p,$$

последовательность которых задает матрицу задержек

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & \dots & x_{N-p} \\ x_2 & x_3 & \dots & x_{N-p+1} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_p & x_{p+1} & \dots & x_{N-1} \end{pmatrix},$$

и построение целевого вектора

$$\mathbf{y} = (x_{p+1}, x_{p+2}, \dots, x_N),$$

где p – количество задержек.

Векторы задержек и целевой вектор используются для обучения мультивейвлетной полиморфной сети. В частности, векторы задержек \mathbf{x}_n подаются на вход мультивейвлетной полиморфной сети, и формируется вектор ответов сети $\hat{\mathbf{y}}$

$$\hat{y}_n(\mathbf{x}_n) = g_\lambda(\mathbf{x}_n, \mathbf{w}_v).$$

Затем, исходя из значений векторов \mathbf{y} и $\hat{\mathbf{y}}$, по формуле (7) находится среднеквадратическая ошибка сети, которая по формуле (9) минимизируется по итерационному методу многомерной оптимизации Бройдена-Флетчера-Гольдфарба-Шанно.

Для прогноза временного ряда с помощью обученной мультвейвлетной полиморфной сети используется итеративный способ, заключающийся в последовательном получении прогноза на один шаг (временной интервал) с добавлением его результата к исходным данным. Сначала строится исходный вектор задержек

$\hat{\mathbf{x}}_1 = (x_{N-p+1}, x_{N-p+2}, \dots, x_N)^T$, на основании которого с помощью мультвейвлетной полиморфной сети делается прогноз на один шаг: $\hat{x}_{N+1} = g_\lambda(\hat{\mathbf{x}}_1; \hat{\mathbf{w}})$, затем полученное значение добавляется к исходному вектору задержек, строится новый вектор

$\hat{\mathbf{x}}_2 = (x_{N-p+2}, x_{N-p+3}, \dots, \hat{x}_{N+1})^T$ и делается прогноз ещё на один шаг $\hat{x}_{N+2} = g_\lambda(\hat{\mathbf{x}}_2; \hat{\mathbf{w}})$ и так далее

$$\hat{x}_{(k+1)} = g_\lambda(\hat{\mathbf{x}}_k; \hat{\mathbf{w}}),$$

где $\hat{\mathbf{w}}$ – параметры обученной мультвейвлетной полиморфной сети, $k=1, 2, \dots, K$. Для прогнозирования хаотической составляющей временного ряда вариаций ППС предлагается использовать мультвейвлетную полиморфную сеть с полиморфным вейвлетом SLOG в качестве материнского. Вейвлет SLOG даёт лучшие результаты прогноза хаотической составляющей вариаций ППС по сравнению с вейвлетами (4-6), что обусловлено схожестью (как видно из рис. 2 и 5) формы этого вейвлета и прогнозируемого временного ряда.

На рис. 5 показаны результаты прогноза на 120 суток хаотической составляющей ряда вариаций ППС мультвейвлетной полиморфной сетью со 120 входами, содержащей 10 вейвлет-нейронов с многомерным полиморфным POLYWOG вейвлетом в качестве материнского.

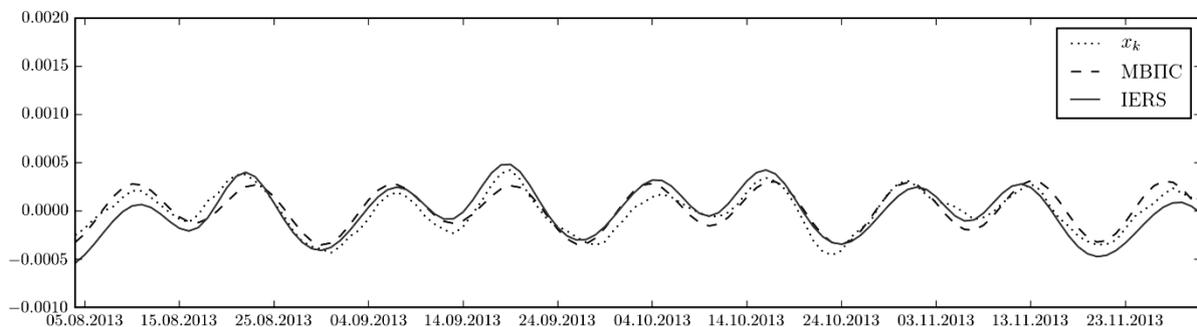


Рис. 5. Прогноз хаотической составляющей временного ряда вариаций ППС с помощью мультвейвлетной полиморфной сети (МВПС).

Для сравнения показан также прогноз с помощью общепринятой модели IERS [15], учитывающей лунные и солнечные приливные взаимодействия. Среднеквадратическая ошибка прогноза, рассчитанная по формуле

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_{i=1}^k (x_k - \hat{x}_k)^2},$$

где $k = 120$ – интервал прогнозирования, x_k – хаотическая составляющая временного ряда вариаций ППС, \hat{x}_k – прогноз этого ряда, для прогноза, полученного с помощью мультвейвлетной полиморфной сети, равна $9.87 \cdot 10^{-5}$, а для прогноза, полученного с помощью модели IERS – $1.1 \cdot 10^{-4}$.

Таким образом, в работе рассмотрены различные способы прогноза геофизических временных рядов. В связи с тем, что многие временные ряды, встречающиеся при изу-

чении геофизических процессов, являются нестационарными и в той или иной мере хаотическими, показано, что для их прогноза целесообразно использовать методы, основанные на вейвлет- и нейρο-сетевых технологиях.

Разработана структура мультивейвлетной полиморфной сети, с настраиваемым параметром материнского вейвлета, объединяющая в себе преимущества мультивейвлетной и полиморфной вейвлет-сети. Для прогноза временного ряда превышения продолжительности суток предложено использовать мультивейвлетную полиморфную сеть, содержащую полиморфный SLOG вейвлет в качестве материнского. Показано, что точность краткосрочного прогноза, полученного с помощью мультивейвлетной полиморфной сети, превышает точность прогноза, полученного с помощью общепринятого в настоящее время метода.

Литература

1. Lei Yu, Zhao Danning, Cai Hongbing Prediction of length-of-day using extreme learning machine // *Geodesy and geodynamics*. – 2015 V. 6, N. 2. – P. 151–159.
2. Горшков В.Л. О методах прогнозирования в геодинатике // *Известия ГАО РАН*. – 2004. – № 2. – С. 365–378.
3. Ритмы и детерминированный хаос в геофизических временных рядах / В. Б. Смирнов, А. В. Пономарев, Q. Jiadong, А. С. Черепанцев // *Физика Земли*. – 2005. – № 6. – С. 6–28.
4. Чепенко Т.Е. Методы прогнозирования временных рядов на основе искусственных нейронных сетей с элементами временной задержки // *Автоматизированные системы управления и приборы автоматики*. – 2011. – № 157. – С. 41–48.
5. Литвиненко В.И. Прогнозирование нестационарных временных рядов с помощью синтезируемых нечетких нейронных сетей // *Автоматика. Автоматизация. Электротехнічні комплекси та системи*. – 2008. – № 1. С. 64–72.
6. Boubacar Doucoure, Kodjo Agbossou, Alben Cardenas Time series prediction using artificial wavelet neural network and multi-resolution analysis: Application to wind speed data // *Renewable Energy*. – 2016. – V. 92. – P. 202–211.
7. K. K. Minu, M. C. Lineeshand C. Jessy John Wavelet Neural Networks for Nonlinear Time Series Analysis // *Applied Mathematical Sciences*. – 2010. – V. 4, N. 50. – P. 2485–2495.
8. Alexandridis Antonisand, Zapranis Achilleas Wavelet neural networks: with applications in financial engineering, chaos, and classification. – New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2014. – 264 pp.
9. Cao, L., Hong, Y., Fang, H., He, G. Predicting chaotic time series with wavelet networks // *Physica D*. – 1995. – N. 85. – P. 225–238.
10. Мильков Д.А., Макаренко Н.Г., Малкин З.М. Прогноз параметров вращения Земли методом нейрокомпьютинга // «Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове». – 2010. – № 219, вып. 4. – С. 235–239.
11. Kalarus M., Schuh H., Kosek W., Akyilmaz O., Bizouard Ch. Achievements of the Earth orientation parameters prediction comparison campaign // *J Geodyn*. – 2010. – N. 84. – P. 587–596.

12. Zhao J., Chen B., Shen J. Multidimensional non-orthogonal wavelet-sigmoid basis function neural network for dynamic process fault diagnosis // Computers and Chemical Engineering. – 1998. – N. 23. – P. 83–92.
13. Верзунов С.Н. Аппроксимация зашумлённых сигналов многослойной нейронной и полиморфной вейвлет-сетями // Проблемы автоматки и управления. – 2014. – № 2(27). – С. 62–71.
14. <https://hpiers.obspm.fr/eoppc/eop/eopc04/eopc04.62-now> (дата обращения: 20.11.2016).
15. http://hpiers.obspm.fr/eop-pc/models/UT1/UT1LOD_marees.php (дата обращения: 11.12.2016).

С.Н.Верзунов

Институт автоматизации и информационных технологий НАН КР,

Бишкек, Кыргызстан

E-mail: verzunov@hotmail.com

ЭЛЕКТРОННЫЙ КАТАЛОГ ЖУРНАЛОВ НАУЧНОГО ИЗДАТЕЛЬСТВА НА БАЗЕ WORDPRESS

В настоящей работе предлагается решение задачи формирования информационного пространства научного издательства на основе системы управления веб-содержимым WordPress и программы разметки метаданных статей Articultus.

Ключевые слова: хранилище научной информации, обмен метаданными, плагин WordPress, Articultus, обработка XML-файлов.

Введение. Компьютеризация издательской деятельности в последние годы привела к существенному увеличению возможностей быстрой публикации результатов научных исследований с помощью различных издательских систем для публикации научных изданий в сети Интернет. Это либо коммерческие решения крупных издательств [1], либо различные самостоятельно разработанные системы, например, электронный научный журнал «Наука, новые технологии и инновации Кыргызстана» [2], или же решения на базе свободно распространяемого программного обеспечения [3].

Традиционно в Кыргызской Республике, в основном используются самостоятельные разработки или, реже, решения на основе свободно распространяемого программного обеспечения, так как большая масса журналов существует при поддержке небольших научных издательств и имеет ограниченные организационные и финансовые возможности. При этом компоновка цифровых научных коллекций происходит зачастую нерегулярно и зависит, в основном, от необходимости обеспечить информационную поддержку научной или образовательной деятельности. Это в частности относится и к сборникам научных статей, а также к материалам научных конференций. По большому счёту статьи из этих источников не имеют возможности попасть даже в такие хранилища научной информации, как Научная электронная библиотека (НЭБ) [4] или Киберленинка [5]. В качестве причин этого можно привести необходимость заключения лицензионного договора с авторами статей, а в основном, – нехватку человеческих и временных ресурсов. Кроме того, в большинстве из создаваемых электронных коллекций не только отсутствует возможность обмена метаданными научных статей, но и сами метаданные в каком-либо из общепринятых форматов их хранения. Это, в свою очередь, делает сомнительным возможность организации взаимодействия таких коллекций с основными хранилищами научной информации и создание условий для индексации ресурсов в ведущих системах поиска и хранения научных публикаций: НЭБ, Google Scholar, Web of Science и других [6]. Поэтому для подавляющего числа научных изданий в Кыргызской Республике актуальной целью является решение проблемы формирования информационного пространства, адекватного современным требованиям, предъявляемым к инновационной научной деятельности.

Одной из важных составляющих этого информационного пространства является интернет-сайт, обеспечивающий решение таких задач как: формирование веб-страниц статей внутри электронного каталога издательства, индексирующихся системами поиска научных публикаций, создание инструментов экспорта статей в электронные коллекции. Особенно важной в настоящее время является проблема загрузки материалов из

электронного каталога издательства в каталог НЭБ. В настоящей работе предлагается решение этой задачи путём разработки электронного каталога издательства на основе формата, предлагаемого самой НЭБ.

Формат хранения метаданных статей в Научной электронной библиотеке

НЭБ предлагает веб-программу разметки Articuluss [7] для подготовки выпусков журналов и неперiodических изданий в формате XML (eXtended Markup Language – расширяемый язык разметки). Структура XML-файла, генерируемого программой Articuluss, показана на рис. 1.

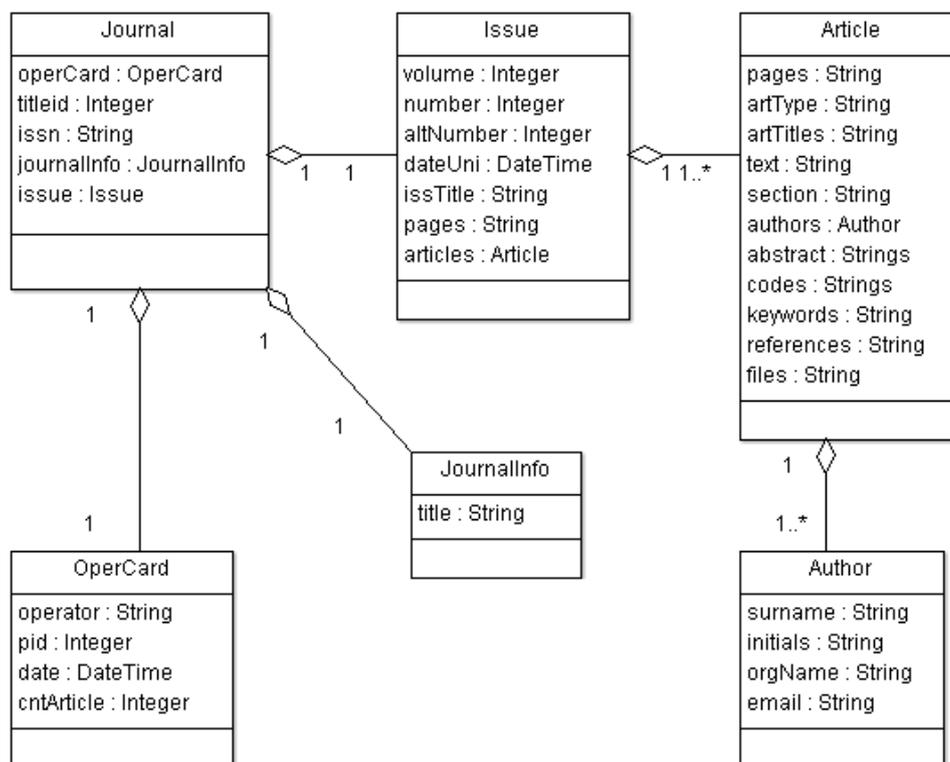


Рис. 1. Структура XML-файла, генерируемого программой Articuluss.

В основе этого формата лежит структура *Journal*, содержащая данные оператора (*operCard*), создавшего XML-файл, уникальный номер журнала в НЭБ (*titleid*), его ISSN, описание журнала в виде структуры *JournalInfo* и описание выпуска журнала в виде структуры *Issue*.

Структура *Journal* агрегирует несколько подструктур с разным уровнем вложения, в частности:

- *OperCard*, содержащую имя (*operator*), идентификатор (*pid*), дату регистрации (*date*), количество (*cntArticle*) созданных статей оператора, создавшего XML-файл;
- *JournalInfo*, содержащую название журнала (*title*);
- *Issue*, содержащую том (*volume*), порядковый номер (*number*), сквозной номер (*altNumber*), дату выпуска (*dateUni*), заголовок (*issTitle*), количество страниц (*pages*), и статьи выпуска (*articles*), заданные как набор структур *Article*.

Структура *Article*, в свою очередь, включает: диапазон страниц (*pages*), тип (*artType*), заголовки на русском и английском языках (*artTitles*), текст (*text*), раздел (*section*), аннотацию (*abstract*), коды УДК, ГРТИ и др. (*codes*), ключевые слова (*keywords*), ссылки на цитируемую литературу (*references*), вложенные файлы (*files*) и одного или несколь-

ких авторов (*authors*) статьи в виде набора структур *Author*. Структура *Author* в свою очередь содержит фамилию (*surname*), инициалы (*initials*), место работы (*orgName*) и электронную почту (*email*) каждого автора.

Хорошо продуманная сотрудниками НЭБ организация XML-файла, содержащего метаданные статей, позволяет оперативно организовать собственную систему обработки и отображения научных статей в электронном каталоге издательства. При этом полностью отпадает необходимость дважды выполнять разметку статей – сначала для электронного каталога издательства, а затем для НЭБ. И, что важнее, нет нужды создавать собственную программу для разметки статей, так как можно воспользоваться уже хорошо зарекомендовавшей себя программой *Articulus*. В качестве платформы для создания электронного каталога издательства предлагается использовать одну из наиболее широко распространённых [8] CMS (Content Management System – система управления веб-содержимым) – *WordPress*, а функции обработки и отображения статей организовать в виде подключаемого модуля, т.н. плагина.

Организация взаимодействия плагина с WordPress. Плагин *WordPress* – это набор функций, написанных на языке PHP и добавляющих определенные возможности для сайта, основанного на CMS *WordPress*, которые обычно объединяются с системой управления и функционалом *WordPress* при помощи *Plugin Application Program Interface* (РАPI) – программного интерфейса взаимодействия с плагинами. Разработанный плагин использует стандартный РАPI для взаимодействия с CMS *WordPress*, а именно: действия (*action*), фильтры (*filter*) и короткие коды (*shortcode*). В частности, короткий код *Metamaker*, необходимый для запуска плагина, должен быть размещен на главной странице каждого журнала в каталоге, фильтр *query_vars* – используется для управления плагином с помощью передачи параметров запроса пользователя, о чём будет сказано ниже. Кроме того применяется несколько служебных действий для загрузки каскадных таблиц стилей и *java*-скриптов (*admin_enqueue_scripts*, *wp_enqueue_scripts*), используемых для настройки визуального оформления плагина, и действие *admin_menu* для загрузки административного интерфейса управления плагином (рис. 2).

Таким образом РАPI, предоставляемый CMS *WordPress* позволяет легко расширить его функциональность без изменения исходного кода самого *WordPress*, за счёт достаточно просто подключаемых расширений, взаимодействующих с CMS посредством стандартного РАPI. Это предоставляет необходимые возможности для создания полнофункционального плагина, обеспечивающего загрузку, обработку и отображение статей из электронного каталога журналов научного издательства.

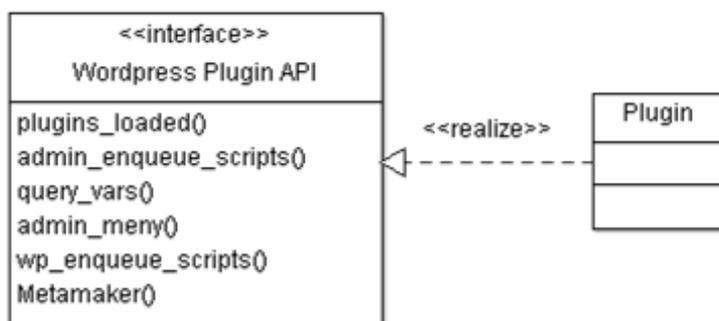


Рис. 2. Интерфейс взаимодействия плагина и CMS *WordPress*.

Основные функциональные возможности плагина. В целом все функции плагина (рис. 3) можно разделить на административные и пользовательские возможности. Административные возможности плагина: выбор для редактирования необходимого журнала из каталога, просмотр имеющихся выпусков, добавление новых или удаление некоторых выпусков доступны только зарегистрированному администратору сайта. Поль-

звательские возможности: выбор для просмотра необходимого журнала, отображение списка выпусков, отображение содержания выпуска и сведений о выбранной статье доступны любому пользователю.

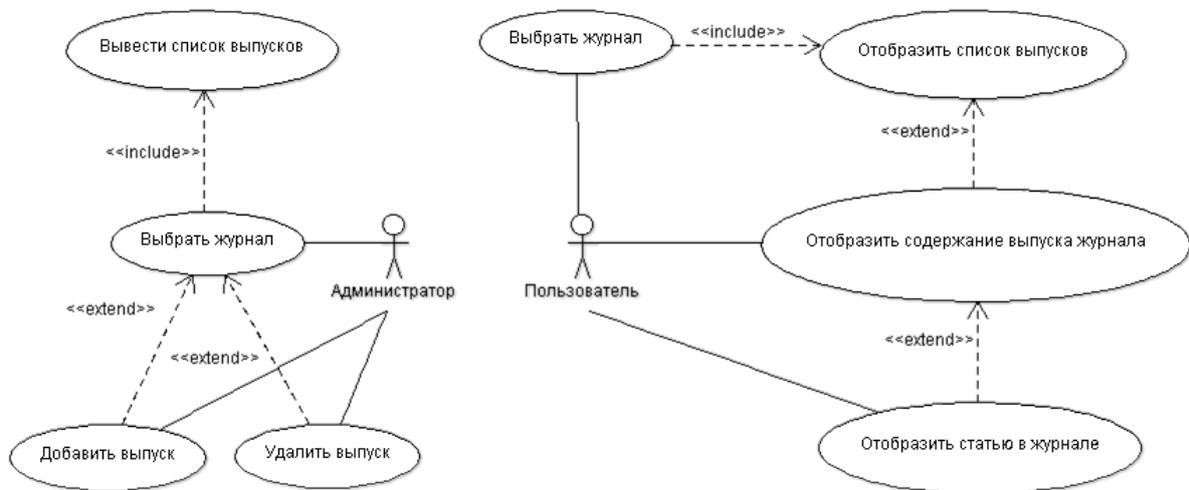


Рис. 3. Функциональные возможности плагина.

Эти возможности были реализованы в виде набора функций на языке PHP, взаимодействующих с одной стороны с CMS WordPress посредством описанного выше API, а с другой стороны – с пользователем, предоставляя ему простой и удобный web-интерфейс для просмотра электронного каталога журналов научного издательства. **Алгоритм и интерфейс взаимодействия плагина с пользователем.** На основной странице каждого журнала (рис. 4) администратором сайта должен быть размещен короткий код *Metamaker*, обработав который, CMS WordPress запускает

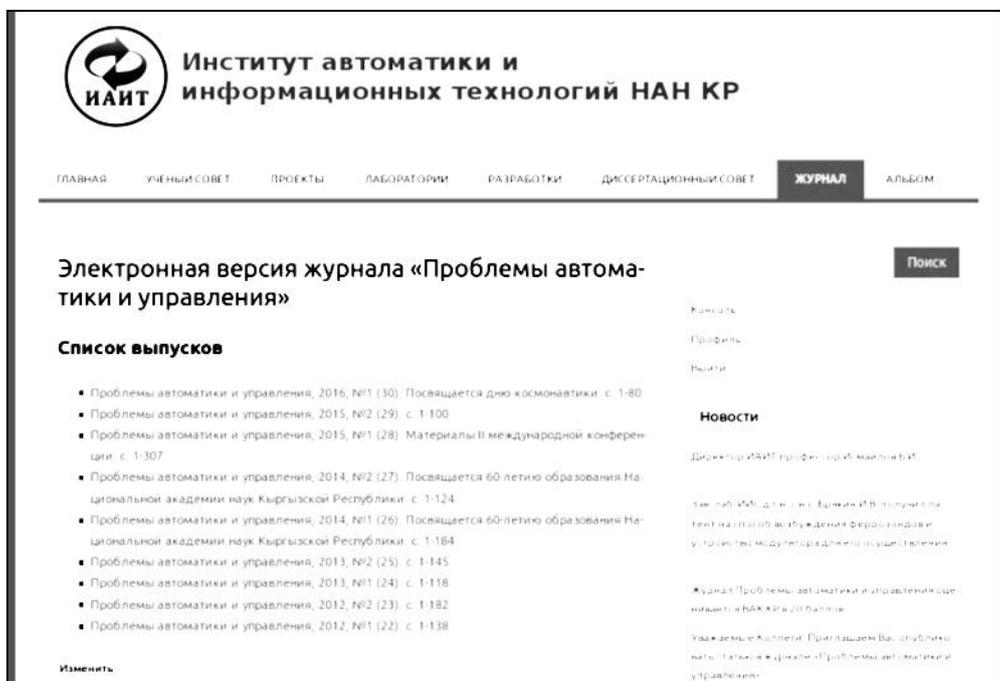


Рис. 4. Основная страница журнала.

алгоритм выполнения плагина (рис. 5). При этом каталог пакетов плагина проверяется на наличие XML- файлов. Затем по очереди плагином загружаются все найденные XML-файлы, содержащие выпуски журнала, на веб-страницу выводятся

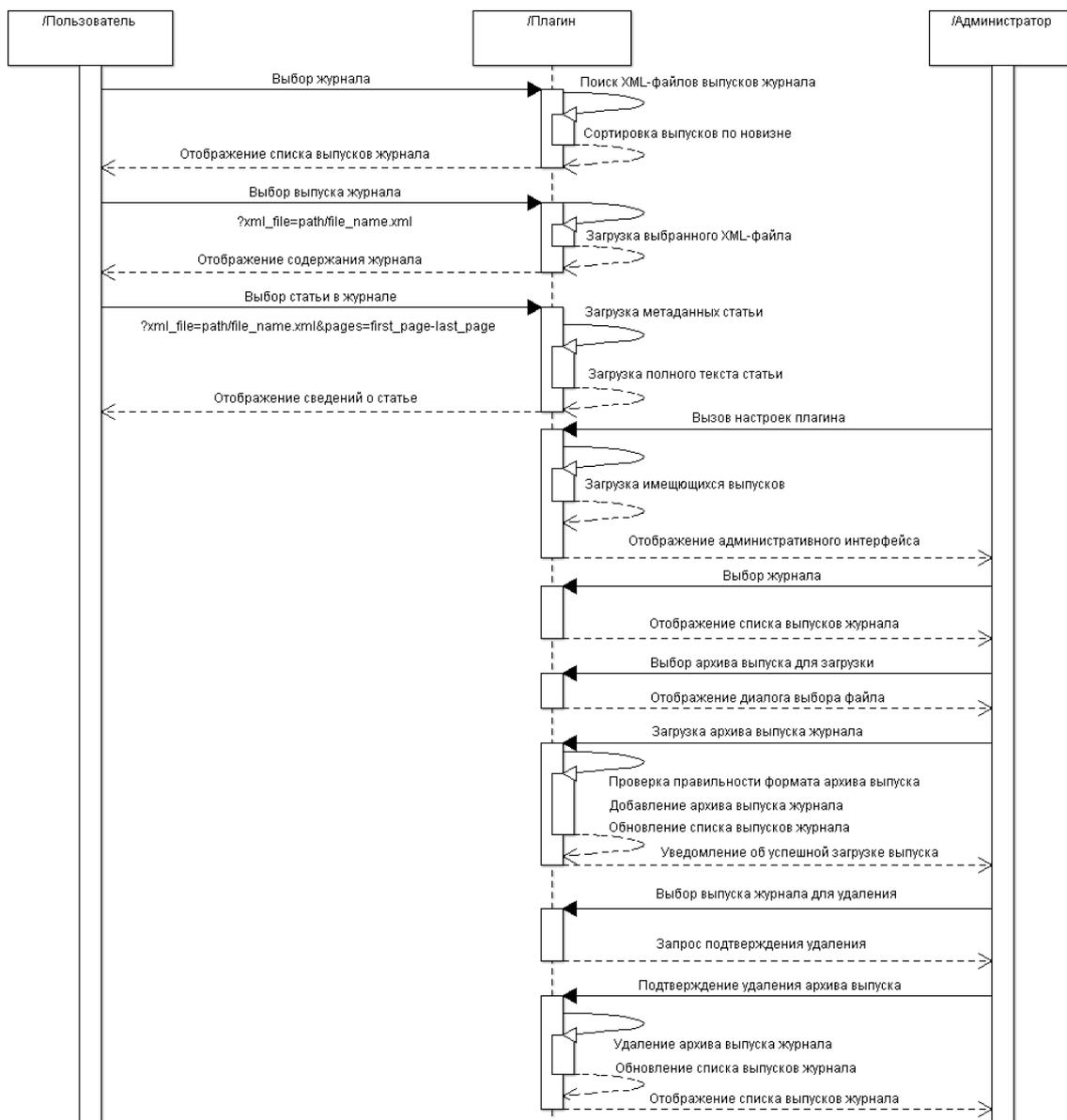


Рис. 5. Алгоритм работы плагина.

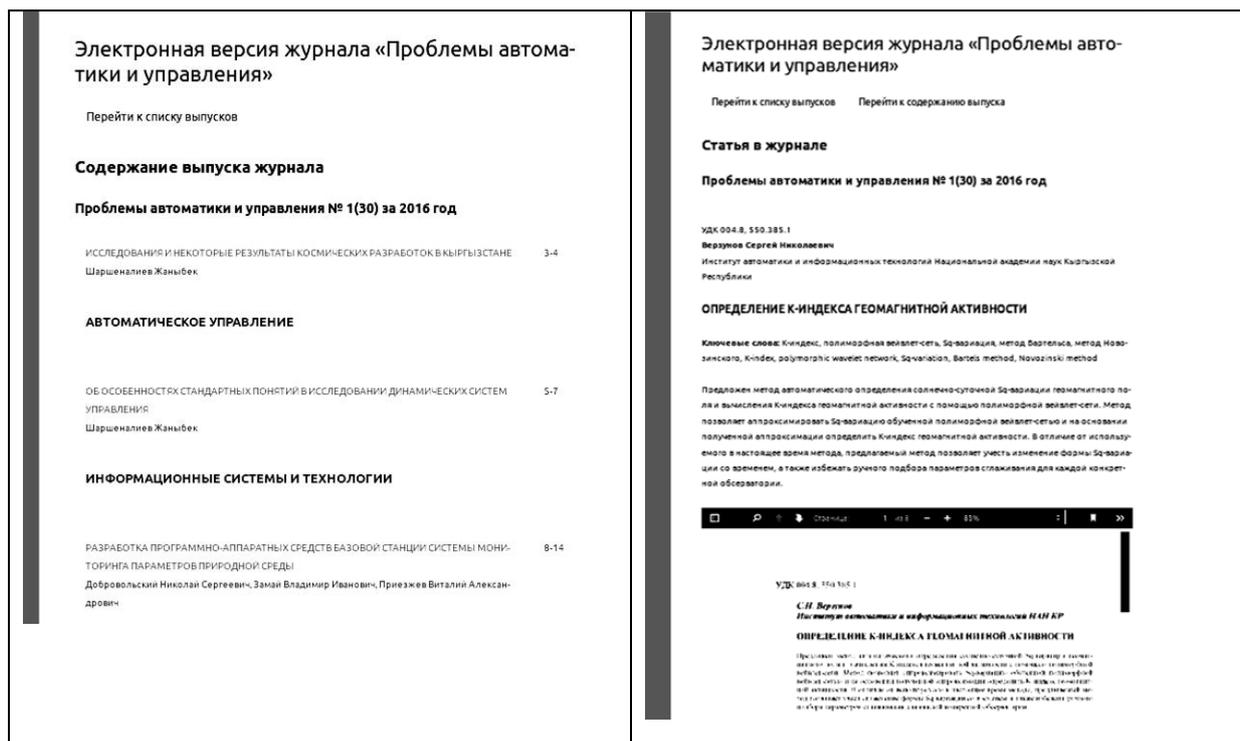
название журнала, год выпуска, номер и название выпуска, а также количество страниц в выпуске. При этом выпуски сортируются в порядке убывания сквозного номера журнала. Сведения о выпуске оформляются как гиперссылка, через которую пользователем осуществляется передача плагину имени XML-файла, содержащего выбранный пользователем выпуск, в формате:

?xml_file=path/file_name.xml,

где *path* – путь, и *file_name* – имя XML-файла.

После этого плагин загружает необходимый пользователю выпуск и отображает его содержание (рис. 6 а) с указанием названий статей, их авторов и номеров страниц статьи в выпуске журнала. Название статьи содержит гиперссылку следующего вида:

?xml_file=path/file_name.xml&pages=first_page-last_page,



а)

б)

Рис. 6. Отображение плагином: а – содержания выпуска, б – статьи в журнале.

то есть, кроме имени необходимого XML-файла, она также содержит и номера страниц (*first_page-last_page*), соответствующие этой статье в выпуске журнала. Кроме того, на этой странице отображается кнопка «Перейти к списку выпусков», позволяющая вернуться к списку выпусков журнала.

При щелчке по интересующей пользователя ссылке на статью плагин загружает её содержание: УДК, фамилии, имена авторов, места их работы, название статьи, ключевые слова, аннотацию и полный текст статьи (рис. 6 б). Также на этой странице отображаются кнопки «Перейти к списку выпусков» и «Перейти к содержанию выпуска», позволяющие перейти к предыдущим страницам.

Административный интерфейс плагина (рис. 7) позволяет администратору сайта просмотреть список имеющихся выпусков, добавить новые или удалить некоторые.

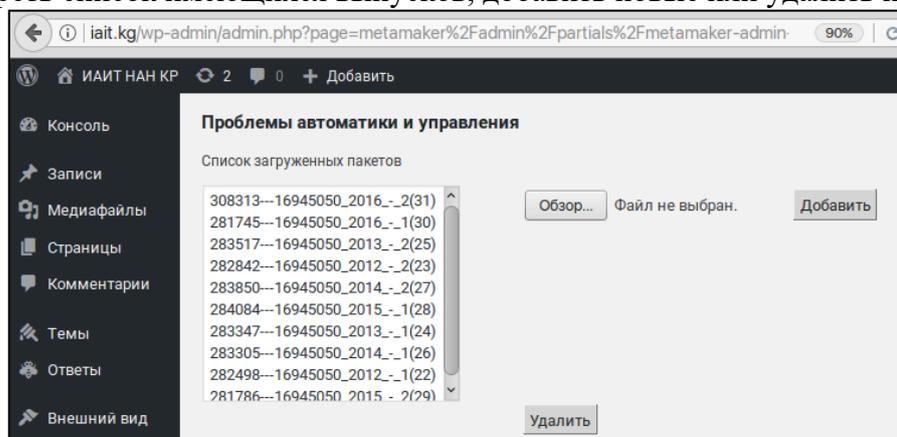


Рис. 7. Административный интерфейс плагина.

Выводы. Таким образом, разработан веб-сайт, содержащий электронный каталог журналов научного издательства, предоставляющий пользователям доступ к основной информации о каждом выпуске журнала, его содержанию, а также метаданным и полным текстам статей. Реализация этого функционала в виде подключаемого к широко распространенной в настоящее время системе управления веб-содержимым модуля предоставляет возможность достаточно оперативно организовать электронные каталоги журналов на базе уже существующих сайтов научных организаций. А использование в качестве основного формата хранения данных формата, принятого в Научной электронной библиотеке, позволяет значительно упростить разметку метаданных статей и их экспорт в различные репозитории научной информации. Разработанное программное обеспечение защищено свидетельством [9] Государственной службы интеллектуальной собственности и инноваций при правительстве Кыргызской Республики.

Литература

1. http://ranlib.ru/?page_id=14775 (дата обращения: 16.11.2016).
2. <http://195.38.182.113> (дата обращения: 16.11.2016).
3. http://www.isras.ru/index.php?page_id=1552 (дата обращения: 17.11.2016).
4. <http://elibrary.ru> (дата обращения: 17.11.2016).
5. <http://cyberleninka.ru> (дата обращения: 17.11.2016).
6. И. А. Мбого, Д. Е. Прокудин, А. В. Чугунов Комплексная интеграция цифровых коллекций в информационное пространство научных исследований // Технологии информационного общества в науке, образовании и культуре: Труды XVII Всероссийской объединенной конференции «Интернет и современное общество» (IMS-2014). – СПб: Университет ИТМО, 2014. – С. 48–53.
7. <http://intra.elibrary.ru/projects/articulus/help/articulus2.doc> (дата обращения: 18.11.2016).
8. <http://www.gs.seo-auditor.com.ru/cms/2016> (дата обращения: 19.11.2016).
9. Верзунов С.Н. Плагин WordPress для создания электронной библиотеки. (МЕТАМАКЕР) // Свидетельство Кыргызской Республики №443. 2016. 20160050.6 Бюл. № 1(213).

И. В. Хмелева, Т.Г. Турчанова, А.Намазбек у, М. В. Коржов
hmelevai@gmail.com, turchan@mail.ru, n.u.abdysamat@gmail.com,
megasdev@gmail.com

Кыргызско-Российский (Славянский) университет Бишкек, Кыргызстан

РЕАЛИЗАЦИЯ МОБИЛЬНОГО ПРИЛОЖЕНИЯ КАК РЕКОМЕНДАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НА ОСНОВЕ МЕТОДА К-СРЕДНИХ

В статье описано разработанное мобильное приложение для навигации по культурным мероприятиям города Бишкек. Представленная работа является одним из возможных способов реализации рекомендательной системы на основе метода *k*-средних.

Ключевые слова: метод *k*-средних, рекомендательные системы, тэг, порог гравитации.

Введение. В нашу жизнь устойчиво вошли мобильные технологии, которые кардинальным способом улучшают как процессы производства, так и процессы потребления информации. Использование мобильных технологий позволяет быть в курсе всех событий в мире, прилагая для этого минимум усилий. Мобильные технологии позволяют снизить стоимость продукции для конечных потребителей за счет оптимизации процессов, сокращения производственных издержек и непроизводственных затрат. Кроме того, мобильные приложения пользуются большим успехом среди молодежи, в связи с чем увеличился спрос на их разработку. Мобильные приложения используют и как рекламные ролики, постоянно обновляемые, и как интернет-магазины, и просто как гаджеты или игровые программы. Среди коммерческих компаний такие приложения весьма актуальны и перспективны. В больших городах очень популярны приложения-навигаторы по мероприятиям, проводимым в городе, это удобно и для жителей города и для туристов. Подобные приложения разработаны для больших городов России, таких как Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург и других.

Требовалось разработать мобильное приложение для навигации по культурным мероприятиям города Бишкек. Приложение должно работать на любых моделях мобильных устройств.

1. Обзор алгоритмов поиска информации.

В глобальной сети сложно найти нужные данные. Для упрощения процедуры поиска разработаны различные поисковые алгоритмы и системы, которые на запрос пользователя выдают ссылки на страницы с информацией, указанной в запросе. Развитие социальных сетей усовершенствовало механизмы поиска до выработки рекомендаций [1] для конкретного пользователя на основе анализа его предыдущих запросов, а это предполагает применение интеллектуального анализа данных.

На сегодняшний день одним из вариантов разработки рекомендательных систем является использование методов коллаборативной фильтрации (КФ). Коллаборативная фильтрация – класс методов построения рекомендаций (прогнозов) на основе известных предпочтений (оценок) группы пользователей.

Основная идея алгоритмов КФ заключается в предложении новых элементов для конкретного пользователя на основе предыдущих его предпочтений или мнения других его единомышленников. К настоящему времени разработан целый ряд алгоритмов КФ [2-

5], которые можно разделить на следующие категории:

1. Методы, основанные на анализе имеющихся оценок, – анамнестические методы
 - a) методы на основе сходства пользователей;
 - b) методы на основе сходства элементов.
2. Методы, основанные на анализе модели данных, – модельные методы
 - a) методы Байесовых сетей;
 - b) методы кластерного анализа;
 - c) методы на основе Марковских моделей;
 - d) методы латентного семантического анализа;
 - e) сингулярное разложение;
 - f) анализ главных компонент.
3. Методы, основанные на объединении предыдущих алгоритмов, – гибридные методы.

Целью методов первой группы является объединение схожих объектов в группы на основе матрицы оценок [2-4]. Эти методы имеют высокую точность, но весьма ресурсоемки и имеют ограниченные возможности при обработке больших объемов данных. Кроме того, хранение всей матрицы предпочтений во многих случаях избыточно: например, многие фантастические фильмы будут нравиться определенной группе пользователей в равной степени. Поэтому возникает задача понижения размерности матрицы оценок. Такие задачи решают методы второй группы.

В этом случае возможен вариант объединения пользователей в кластеры с помощью некоторого индекса сходства. Элементы и оценки, данные пользователями из одного кластера, используются для вычисления рекомендаций. Кластерные модели лучше масштабируются, т.к. сверяют кластер пользователя с относительно небольшим количеством сегментов, а не с целой пользовательской базой.

В поставленной задаче использовался метод *k*-средних для формирования рекомендаций пользователям мобильного приложения – навигатора.

2. Разработка диаграммы развертывания приложения.

Программное приложение предназначено для навигации по культурным мероприятиям города. На рисунке 1 приведена диаграмма развертывания приложения, из которой видно, что приложение имеет двухуровневую архитектуру, обработка данных ведется на сервере, чтобы не перегружать «клиента» и пользоваться приложением с мобильных устройств старой версии.

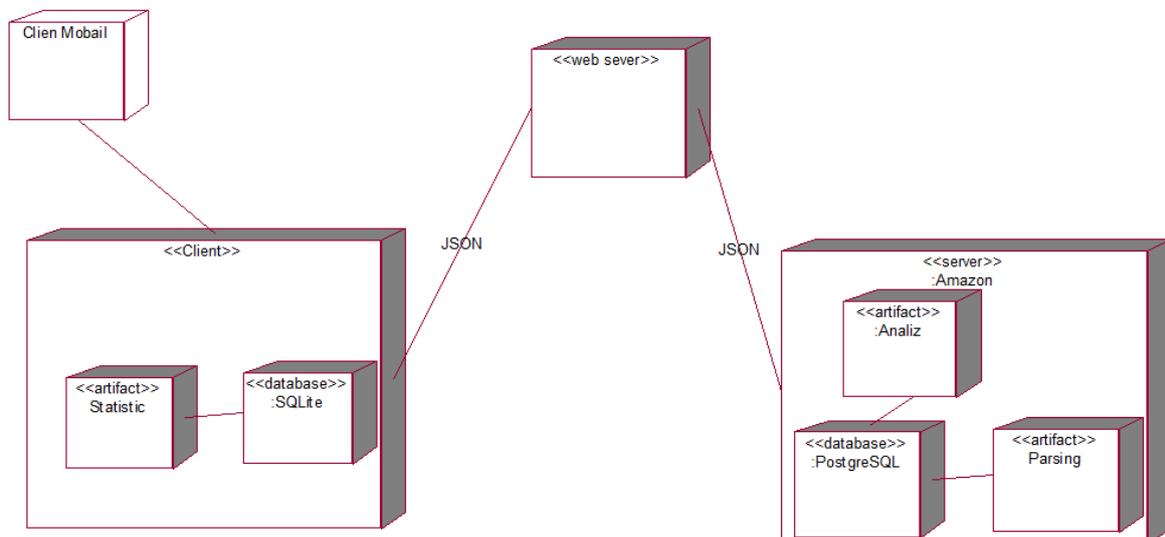


Рис.1. Диаграмма развертывания.

Рассмотрим подробнее задачи каждой стороны навигатора.

3. Описание работы клиентской части приложения.

Перед клиентским приложением стоит задача сбора и анализа данных с различных устройств пользователей и передача этих данных на сервер для дальнейшего анализа и выработки рекомендаций. Процесс сбора анонимной статистики выполняется пакетом средств разработчика (SDK) в фоновом режиме и не затормаживает работу приложения.

Артефакт Parsing реализует автоматический сбор информации обо всех мероприятиях города с сайтов организаций (аналог RSS) и собирает статистику о посещаемости и предпочтениях пользователей приложения. Данные передаются в формате JSON [6], что удобно и для передачи, и для дальнейшей обработки.

Клиентское приложение раз в сутки получает готовую информацию с сервера. Алгоритм сбора статистики о посещаемости и предпочтениях пользователей включает в себя несколько шагов:

- 1) для каждого посетителя генерируется персональный номер, к которому прикрепляются идентификаторы мероприятий и частота посещения каждого;
- 2) для учёта посещаемости к каждому пользователю также крепятся его страна, модель устройства, размер экрана, состояние сети, оперативная память и множество других параметров (Рис.2);

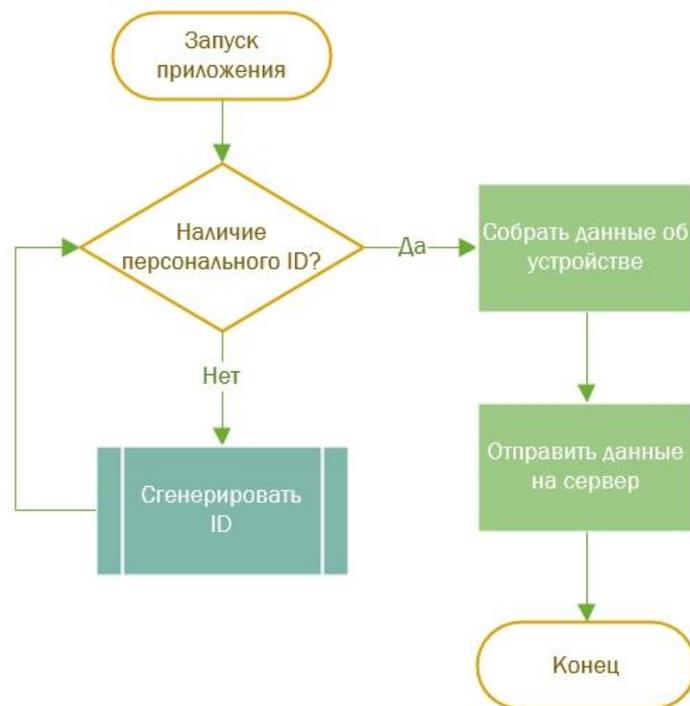


Рис.2. Алгоритм сбора информации об устройстве пользователя.

- 3) подготовленные на предыдущих шагах данные выгружаются на сервер, где производится их обработка (выделение тематики события, степени заинтересованности и др.) и учет при последующей отдаче контента пользователю. Стоит учесть, что на этом этапе в журнал устройства записываются практически все действия, которые пользователь произвёл в приложении: эта информация отправляется на сервер вместе со служебной из п.2 (Рис.3)

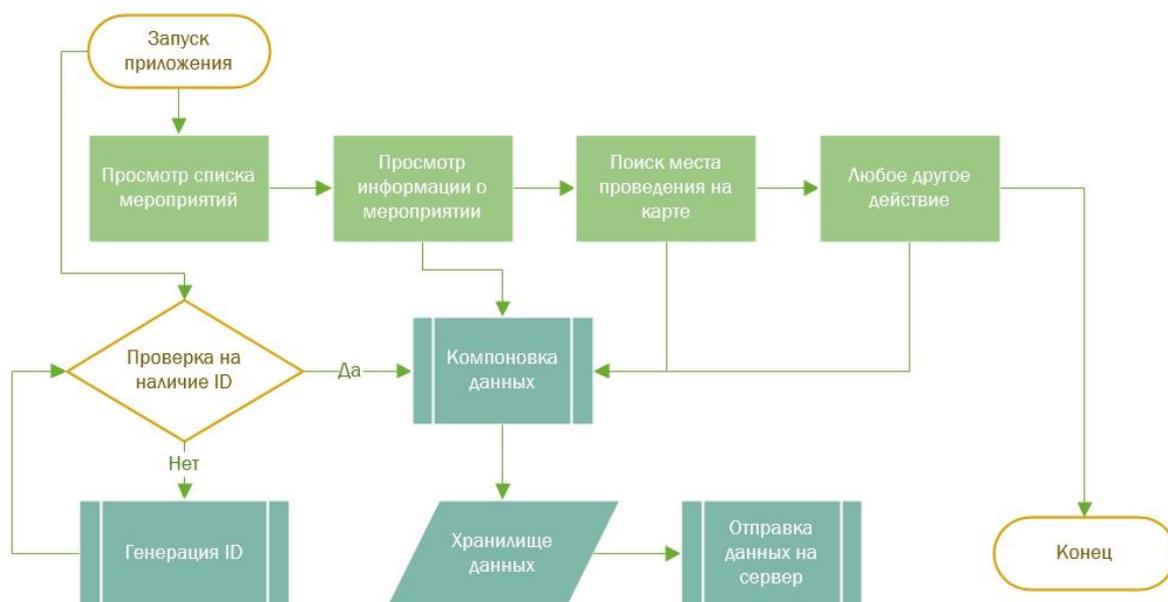


Рис.3. Алгоритм сбора информации о действиях пользователей в приложении.

Функция рассылки персональных уведомлений позволяет пользователю получать уведомления о мероприятиях, которые могут его заинтересовать, и напоминает ему о предстоящем событии. После активации функции сервер ставит пользователя на учёт и сообщает ему всю необходимую информацию. Алгоритм приёма и показа уведомления продемонстрирован на Рис.4:

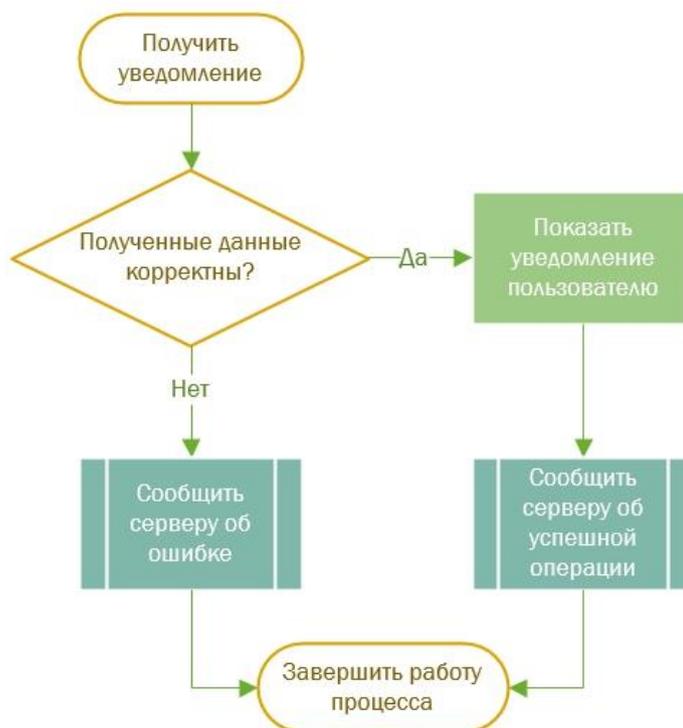


Рис.4. Процесс получения уведомления о мероприятии с сервера.

Основное требование при разработке мобильных систем заключается в том, что мобильное устройство не должно выполнять никаких вычислительных действий - это задача сервера. Устройства могут быть старыми, в которых приложение может "упасть" даже при минимальных нагрузках. Соответственно, в задачи клиентской части приложения входит только получение данных, их демонстрация, сбор базовой информации об устройстве и пользователе и отправка данных на сервер.

4. Описание работы серверной части приложения.

Сервер помимо хранения данных выполняет их анализ для выработки рекомендаций каждому пользователю. Интеллектуальный анализ данных решает задачу кластеризации, которая заключается в делении множества объектов на группы (кластеры) схожих по параметрам. При этом, в отличие от классификации, число кластеров и их характеристики могут быть заранее неизвестны и определяться в ходе построения кластеров исходя из степени близости объединяемых объектов по совокупности параметров[7]. Для решения задачи кластеризации применяется комбинированный метод k -средних.

4.1. Применение алгоритма k -средних для решения поставленной задачи.

Алгоритм k -средних является простым повторяющимся алгоритмом кластеризации, который разделяет определенный набор данных на заданное пользователем число кластеров k . Алгоритм прост для реализации и запуска (вычислительная сложность алгоритма: $O(nkl)$, где k – число кластеров, ℓ – число итераций), относительно быстрый, легко адаптируется и распространен на практике [7].

Рассмотрим алгоритм k -средних применительно к поставленной задаче.

Пусть X есть множество всех наблюдаемых объектов $x_i \in X, 1 \leq i \leq \text{nof}(X)$, отнесенных к одному из кластеров $X_l \subseteq X, 1 \leq l \leq \text{nof}(K)$, где $K = \{X_1, \dots, X_l, \dots, X_{\text{nof}(K)}\}$ – множество всех сформированных кластеров. Объекты обладают набором определенных характеристик (страна, модель устройства, размер экрана, состояние сети, оперативная память, тема события, количество запросов и множество других параметров). Характеристику объекта назовем тегом (обозначим T_i). Тогда пользователя можно представить в виде n -мерного вектора тегов: $U = [T_1, T_2, \dots, T_n]$, где T это есть тег, который описан двумерным вектором: $T_i = [F, R]$,

где i -идентификатор тега, F – частота запросов тега пользователем, R – количество обнулений, $n \leq N$, N – общее количество тегов в базе данных.

Тег имеет численный показатель притяжения G - «сила гравитации». Тег – также является центром притяжения других тегов, в данном случае спутников. Центр тяжести можно представить N -мерным вектором тегов: $G = [T_1, T_2, \dots, T_n]$, где $n \leq N$, N – общее количество тегов в базе данных. В качестве меры близости использовано Евклидово расстояние[7].

Для определения схожести тегов между собой введены понятия «достоверных данных» и «недостоверных данных».

Достоверные данные – это данные, которые принимаются как заведомо истинные. В данном случае это данные, которые принимаются сервером при создании события пользователем. Создание события всегда сопровождается наличием тегов, и если количество тегов при создании события больше одного, то теги связываются между собой, то есть, относительная «сила гравитации» между ними возрастает на единицу.

Недостоверные данные – это данные, которые не проходят алгоритм проверки на определение схожести. В данном случае к недостоверным данным можно отнести запросы пользователя. Пользователь может вводить разные запросы в поиске, и нельзя достоверно сказать о том, связан ли текущий запрос с последующим или с предыдущим. Для этого вводится понятие «Порог гравитации» – численный показатель частоты набора пользователем конкретного тега.

4.2. Результаты работы алгоритма k-средних.

Пример визуализации работы алгоритма для объекта «театр» приведен на рис. 5.

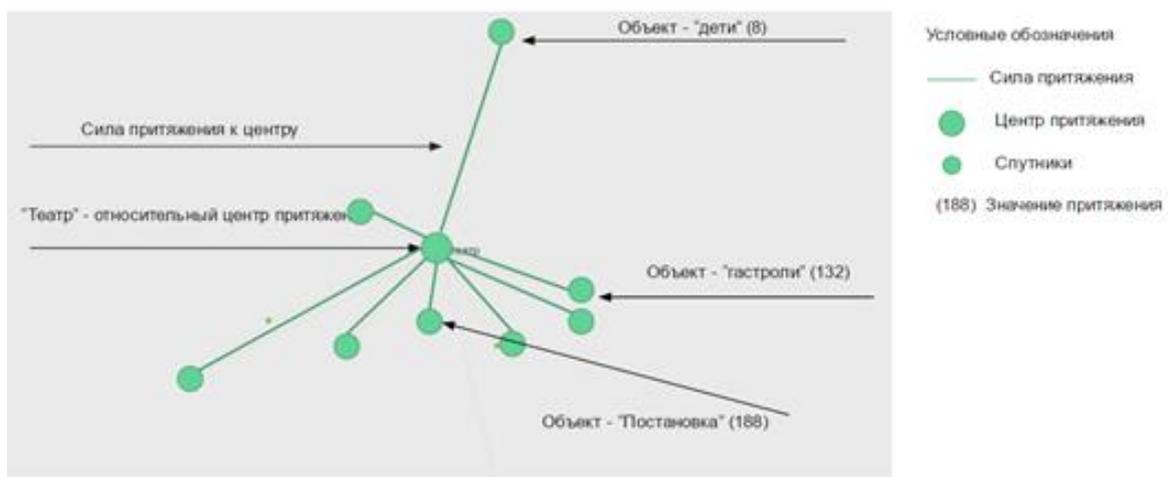


Рис. 5. Визуализация объекта «Театр».

Здесь пользователь представлен в виде вектора тегов $U = [T_1, T_2, T_3]$, Порог гравитации равен 10, $T_1 = [10,0]$, $T_2 = [2,0]$, $T_3 = [8,0]$. Следует обратить внимание на первые аргументы векторов: (10,2,8). Когда порог гравитации достигает границы, что четко наблюдается у $T_1 = [10,0]$, то данный тег обнуляется, связавшись с ближайшим тегом $T_3 = [8,0]$.

После проведения данной операции теги пользователя будут иметь вид: $T_1 = [0,1]$, $T_2 = [2,0]$, $T_3 = [8,0]$, причем тег T_3 не обнулился.

На рисунке 5 стоит обратить внимание на объект «дети», который связан с объектом «театр» крайне слабо – 8 единиц притяжения. Такой результат можно было бы отнести к погрешности, однако, в ходе анализа данных было выявлено, что в театрах

проходили детские утренники и спектакли, так что объекты «дети» и «театр» связаны закономерно.

Таким образом, разработано мобильное приложение для поиска культурных мероприятий города Бишкек с учетом предпочтений пользователя. Механизм формирования предпочтений основан на реализации кластерного анализа методом k -средних. Разработанный сервис запущен в пользование в августе 2016 г с рабочим названием «CitySpy».

Литература

1. М. Тим Джонс, Рекомендательные системы. //URL: <https://www.ibm.com/developerworks/ru/library/os-recommender1/> (дата обращения 25.03.2017).
2. J.S. Breese, D. Heckerman, and C. Kadie, –Empirical Analysis of Predictive Algorithms for Collaborative Filtering// Proc. 14th Conf. Uncertainty in Artificial Intelligence, July 1998.
3. Xiaoyuan Su and Taghi M. Khoshgoftaar "A Survey of Collaborative Filtering Techniques A Survey of Collaborative Filtering Techniques" // Hindawi Publishing Corporation, Advances in Artificial Intelligence archive, USA : 2009. – С. 1–19.
4. G. Adomavicius На пути к новому поколению рекомендационных систем: обзор имеющихся систем и возможные инновации.// IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering, Vol. 17, No. 6, Июнь 2005 URL: http://artpragmatica.ru/rs/in/pic/58-870-20061024072441-Toward_the_next_generation_of_recommender_systems.doc
5. Гомзин А. Г., Коршунов А. В. Системы рекомендаций: обзор современных подходов // Труды ИСП РАН. 2012, Т.22, с. 401–418 URL: <http://cyberleninka.ru/article/n/sistemy-rekomendatsiy-obzor-sovremennyh-odhodov> (дата обращения 20.03.2017).
6. Язык JavaScript. Электронный учебник. // URL: <https://learn.javascript.ru/json> (дата обращения 19.04.2017).
7. Портал знаний. Кластеризация: метод k -средних. //URL: <http://statistica.ru/theory/klasterizatsiya-metod-k-srednikh/> (дата обращения 21.03.2017).

Н. В. Маликов, А. П. Демиденко

E-mail: BARCAman93@gmail.com ad48@mail.ru

Кыргызско-Российский (Славянский) университет. г.Бишкек, Кыргызстан

АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАИБОЛЕЕ ВЫГОДНЫХ РАЙОНОВ ДЛЯ ОТКРЫТИЯ БИЗНЕСА НА ОСНОВЕ DATA MINING КЛАСТЕРИЗАЦИИ

В работе проанализированы данные сети предприятий общественного питания города, рассмотрен алгоритм data mining обработки и визуализации данных на географической карте города, а также разработано приложение, которое позволяет решать поставленную задачу определения выгодных для открытия бизнеса районов города.

Ключевые слова: data mining, кластеризация, статистический анализ, обработка больших данных, интерактивная географическая карта.

Введение

С развитием IT-технологий интернет прочно вошел в нашу жизнь, а чем больше информации мы имеем, тем сложнее превратить эту информацию в полезную. В информационный век успех компаний и отдельных людей все чаще зависит от того, как быстро и эффективно они превращают огромные объемы данных в полезную информацию. Причем отбор информации должен происходить быстро и качественно, поскольку пользователь не желает тратить время на дополнительную фильтрацию полученных данных, а хочет увидеть именно то, что ему надо, поэтому проблема анализа и обработки данных весьма актуальна в наше время.

Постановка задачи

Имеется набор филиалов $F = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ сети общественного питания. Каждый из них можно представить, как вектор $[e_n, latitude_n, longitude_n]$, где e_n – выручка, $latitude_n$ – широта, $longitude_n$ – долгота. Нужно добавить еще один филиал f_{n+1} , и изменяя переменные $latitude_{n+1}$ и $longitude_{n+1}$, добиться того, чтобы его выручка e_{n+1} была максимальной

$$e_{n+1} = \Phi(latitude_{n+1}, longitude_{n+1}) \rightarrow \max (1)$$

Для данного предприятия существует система, которая передает информацию о результатах функционирования филиалов в центральный офис. Эта информация включает в себя сведения о доходах и расходах. Для решения поставленной задачи предлагается использовать географические координаты филиалов, а также данные, полученные за период функционирования системы.

Решение

В качестве основного подхода к решению проблемы был выбран подход Data Mining [4]: кластерный анализ и статическая обработка геоинформационных объектов.

- Задача кластеризации решает задачу группировки филиалов сети по признаку близости географического расположения.
- Статистическая обработка позволяет представить объекты внутри кластера по эффективности функционирования.
- Геоинформационный подход решает задачу визуализации рассматриваемых объектов на карте города.

Кластерный анализ – это метод классификационного анализа; его основное назначение – разбиение множества исследуемых объектов и признаков на однородные в некотором смысле группы, или кластеры. Это многомерный статистический метод, поэтому предполагается, что исходные данные могут быть значительного объема, т.е. существенно большим может быть как количество объектов исследования (наблюдений), так и признаков, характеризующих эти объекты. Большое достоинство кластерного анализа в том, что он дает возможность производить разбиение объектов не по одному, а по ряду признаков. Кроме того, кластерный анализ, в отличие от большинства математико-статистических методов, не накладывает никаких ограничений на вид рассматриваемых объектов и позволяет исследовать множество исходных данных практически произвольной природы. [3]

Разбиение выборки на группы схожих объектов позволяет упростить дальнейшую обработку данных и принятие решений. С этой целью применяется сжатие данных, если исходная выборка избыточно большая, то можно сократить её, оставив по одному, наиболее типичному представителю от каждого кластера; обнаружение новизны – выделяются нетипичные объекты, которые не удаётся присоединить ни к одному из кластеров.

Кластеризация в Data Mining приобретает ценность тогда, когда она выступает одним из этапов анализа данных, построения законченного аналитического решения. Аналитику часто легче выделить группы схожих объектов, изучить их особенности и построить для каждой группы отдельную модель, чем создавать одну общую модель для всех данных. Таким приемом выгодно пользоваться в бизнесе, выделяя группы филиалов и разрабатывая для каждой из них отдельную стратегию развития.

С целью выбора метода кластеризации нами было рассмотрено множество различных методов. В итоге была найдена и изучена статья “Кластеризация точек на основе регулярной сети” [5] и впоследствии метод кластеризации, описанный в данной статье, был адаптирован под имеющиеся и требуемые данные.

Филиал – исследуемый объект алгоритма, представляет собой численный показатель, характеризующий выручку. При создании кластера ему присваивается значение выручки первого филиала, входящего в него. При добавлении следующего филиала вычисляется среднее значение для кластера. Вычислять прибыль для кластера требуется для визуализации результатов на интерактивной географической карте города.

Описание алгоритма

В данной работе разбиение на кластеры происходит с учетом географических координат филиалов. Входными данными являются:

- данные о филиалах, содержащие координаты – *двумерный массив*, наименование – *строка*, выручка за выбранный период – *число* и др.
- R – радиус точки воздействия, который является пределом максимального расстояния между филиалами и указывается в пикселях относительно минимального масштаба карты 1:2500 и увеличивается с увеличением масштаба. Данный показатель может меняться пользователем и по умолчанию имеет значение 10px.

$$d = |x.\textit{latitude} - x_1.\textit{latitude}| + |x.\textit{longitude} - x_1.\textit{longitude}|, \quad (2)$$

где *latitude* – значение широты, *longitude* – значение долготы рассматриваемых филиалов, а d расстояние между ними.

Этапы алгоритма кластеризации

- Берется филиал x , если он и его соседние филиалы не привязаны к кластеру, то создается новый кластер, и филиал добавляется в него.
- Берется соседний филиал x_1 и проверяется наличие его в кластерах.
- По формуле (2) находится расстояние между филиалом x и x_1 , если расстояние $\leq R$, где R – радиус точки воздействия, то возможны два случая:
 - если филиал x_1 пока не входит в кластер, то x_1 вносится в тот же кластер в котором находится филиал x ;
 - если филиал x_1 уже принадлежит какому-то кластеру, отличному от текущего, то кластер с большим количеством объектов поглощает кластер с меньшим.
- Если расстояние больше R , то создается новый кластер, и филиал x_1 добавляется в него.

Программные средства для определения наиболее выгодных районов

Данный алгоритм использован для разработки web приложения, позволяющего найти оптимальный район расположения нового филиала на географической карте г.Бишкек в заданном масштабе. Обозначение кластеров по среднему значению эффективности функционирования отображено изменением цветовой гаммы. Интенсивность цветовой окраски связана с выручкой района: чем выше выручка, тем интенсивнее окраска.

Основные возможности программы представлены на рисунке 1.

Рис. 1. Основные возможности программы.

На рисунке 2 представлен пример визуализации в разных масштабах данных, полученных в процессе разработки:

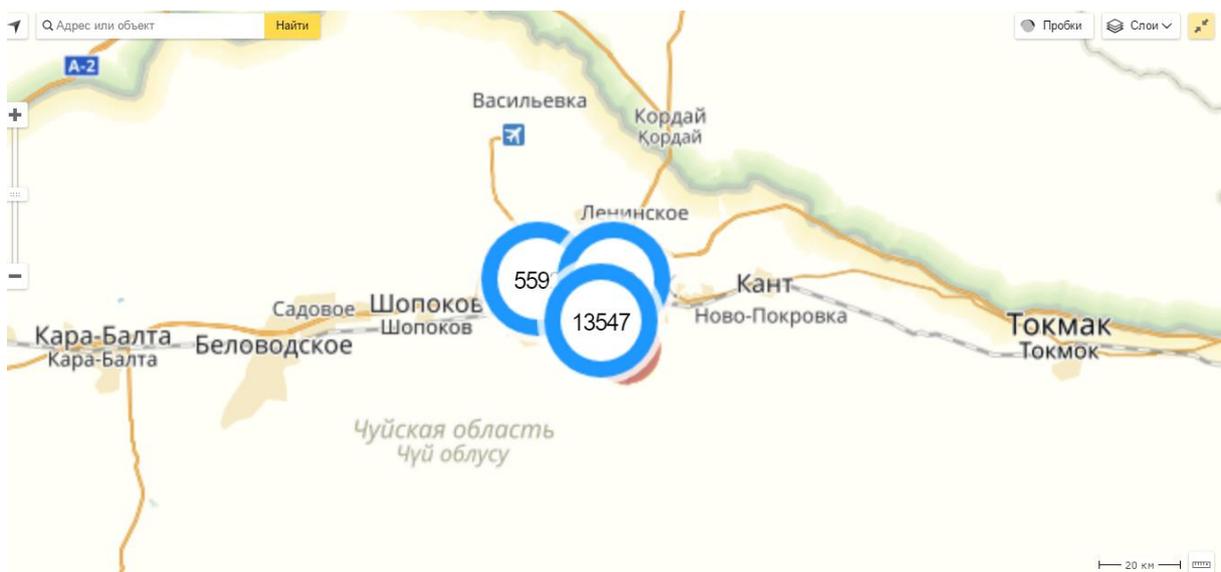


Рис. 2. Пример визуализации результата анализа данных

На рисунке 3 приведен пример изменения данных по кластерам при изменении масштаба карты.

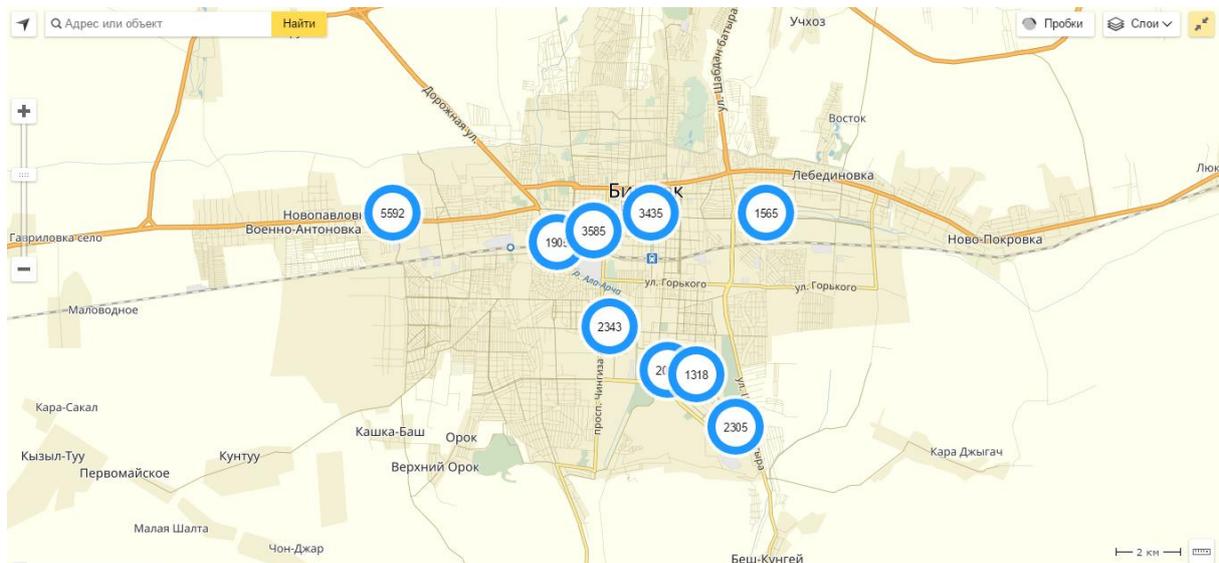


Рис. 3. Пример визуализации результата анализа данных в меньшем масштабе.

Визуализация полученных данных с помощью тепловой карты, изображенная на рисунке 4, позволяет по насыщенности цвета полагать о наиболее прибыльных филиалах и районах, но не показывает численные значения.

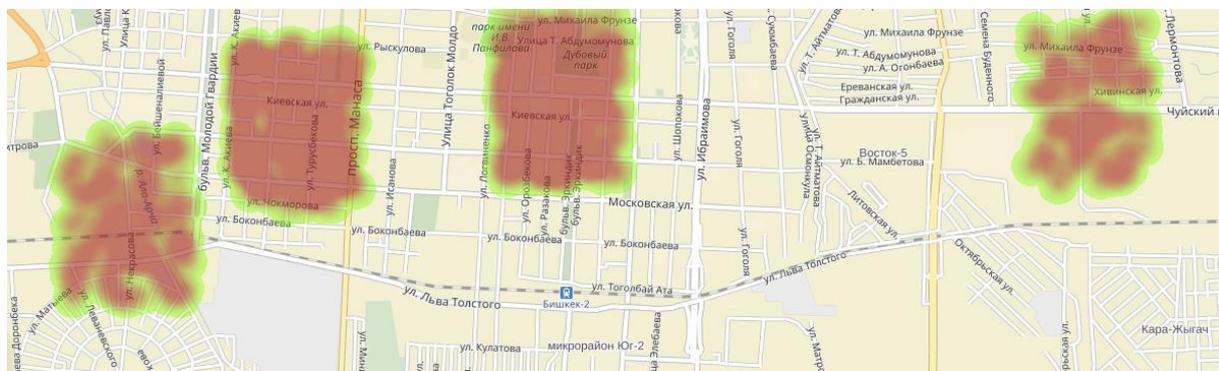


Рис. 4. Пример визуализации результата с помощью тепловой карты.

Заключение

Разработанное приложение имеет доступ к данным по всем филиалам. Обработка данных для быстрого получения результата происходит на выделенном сервере. Данные по выручке филиалов берутся за определенный период. При изменении периода карта автоматически обновляется, и кластерный анализ выполняется на основе обновленных данных. Результаты анализа данных можно получить в любое время за любой выбранный период функционирования предприятия.

Литература

1. Барсегян и др. Методы и модели анализа данных: OLAP и Data Mining. – СПб., 2004.
2. Olson C.F. “Parallel Algorithms for Hierarchical Clustering” Parallel Computing, 1995, Vol. V21, P. 1313-1325.
3. Кластерный анализ. Url: https://ru.wikipedia.org/wiki/Кластерный_анализ (дата обращения 3.02.2017).
4. Data mining. Url: https://ru.wikipedia.org/wiki/Data_mining (дата обращения 20.01.2017).
5. Кластеризация точек на основе регулярной сети. Url: <https://habrahabr.ru/post/138185/> (дата обращения 10.01.2017).

СОДЕРЖАНИЕ

ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

<i>Шаршеналиев Ж.Ш.</i> О проблемах синтеза оптимальных и агрегированных регуляторов в динамических системах.....	3
<i>Кутунаев Ж.Н., Адиева Г.М.</i> Решение модельных задач с помощью уравнения гиперболического типа с переменными коэффициентами.....	11
<i>Шаршеналиев Ж.Ш., Самохвалова Т.П., Сактанов У.А.</i> Алгоритм управления движением разнотемпового объекта, основанный на методе характеристик.....	15
<i>Акчалов Ш.А., Рыскулов Р.Р., Шукуров У.Ш., Толукбаев Ш.К., Аскарбеков У.Б.</i> Исследование сил, действующих на лопасти ветротурбины	22
<i>Кошмураев И.Б.</i> О единственности решения краевых задач для уравнений в частных производных четвертого порядка с двумя независимыми переменными	27
<i>Керимкулова Г.К., Аскалиева Г.О.</i> К оценке кинематических параметров потока воды малых рек горно-предгорной зоны Кыргызстана.....	33
<i>Алыбаев Н. К.</i> Составление водно-энергетического баланса и его прогнозирование.....	43

УСТРОЙСТВА СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

<i>Брякин И.В., Денисов Г.С.</i> Феррозондовый датчик с упругим возбуждением сердечника.....	50
<i>Бочкарев И.В., Келебаев К.К.</i> Аналитическое описание нелинейных характеристик механизмов центробежного действия.....	60
<i>Закиров Р. Г., Абдукаюмов А., Абдураимов О.Ш.</i> Преимущества волоконно-оптического гироскопа на основе эффекта Саньяка	64

ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ

<i>Замай В.И., Маматов А.Н.</i> Разработка пилотной версии Веб-приложения системы мониторинга параметров природной среды	69
<i>Верзунов С.Н.</i> Мультивейвлетная полиморфная сеть для прогнозирования геофизических временных рядов	78
<i>Верзунов С.Н., Лыченко Н.М.</i> Электронный каталог журналов научного издательства на базе wordpress.....	88
<i>Хмелева И. В., Турчанова Т.Г., Намазбек у. А., Коржов М. В.</i> Реализация мобильного приложения как рекомендательной системы на основе метода k-средних.....	95
<i>Маликов Н. В., Демиденко А.П.</i> Алгоритм определения наиболее выгодных районов для открытия бизнеса на основе data mining кластеризации	102

ПРОБЛЕМЫ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ

Научно-технический журнал

Редактор В.А. Волчанская
Компьютерная верстка В.П. Алексеева

Подписано к печати 15.05.2017 г. Формат 70/108 1/8
Печать офсетная. Объем 12,9 п.л. Тираж 200 экз.

Издательство «Илим»
720071, Бишкек, проспект Чуй, 265-а