

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СДВИГА НЕСУЩЕЙ ЧАСТОТЫ НА КАЧЕСТВО ПРИНИМАЕМОГО OFDM СИГНАЛА

В статье приведен анализ влияния сдвига несущей частоты, на OFDM сигнал. Рассмотрено влияние сдвига на качество принимаемого сигнала. Даны рекомендации по точности синхронизации для обеспечения качественного приема.

**Ключевые слова:** сдвиг несущей частоты, OFDM, межканальная интерференция.

В настоящее время технология OFDM (Orthogonal frequency-division multiplexing — мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) нашла широкое применение в таких областях, как цифровое радиовещание, цифровое телевидение высокого качества, мобильные технологии передачи данных, мобильные системы широкополосного доступа и многие другие. В качестве примера можно упомянуть такие популярные современные стандарты, как DRM, DVB, Long LTE, WiMAX [1–4]. OFDM обладает рядом преимуществ, таких как высокая помехозащищенность при передаче через канал с многолучевым распространением, а также эффективное использование полосы канала. Помимо этого, OFDM имеет и недостатки, одним из которых является высокая чувствительность к сдвигу несущей частоты [5, 6].

Целью данной работы является проведение анализа влияния сдвига несущей частоты на качество принимаемого OFDM сигнала, так как данная проблема недостаточно полно отражена в литературе [5–7].

Сдвиг несущей частоты принимаемого сигнала может возникать из-за эффекта Доплера при подвижной связи и несовпадения частот опорных генераторов в передатчике и приемнике [7].

В принимаемом сигнале  $y[n]$  это вызывает сдвиг фазы:

$$y[n] = h[n]x[n]e^{j2\pi n\varepsilon/N} + w[n],$$

где  $\varepsilon = \frac{f_\varepsilon}{\Delta f}$  — нормированное смещение частоты несущей, равное отношению сдвига частоты несущей  $f_\varepsilon$  к расстоянию между подканалами  $\Delta f$ ;

$h[n]$  — импульсная характеристика канала;

$w[n]$  — аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ);

$N$  — длина символа в отсчетах.

На рис. 1 показано влияние сдвига частоты на фазу сигнала во временной области. Видно, что разность фаз линейно возрастает с течением времени, а при  $\varepsilon > 0,5$  это приводит к тому, что разность фаз превышает  $\pi$  в пределах одного символа, в связи с чем возникает фазовая неоднозначность.

Также видно, что сдвиг частоты на  $\varepsilon$  приводит к возникновению межканальной интерференции (МКИ) и потере ортогональности (рис. 2). Это связано с тем, что каждый подканал формируется об-

ратным преобразованием Фурье, которое имеет вид *sinc* функции и при сдвиге частоты приводит к возникновению помех от соседних подканалов.

Чтобы рассмотреть, как сдвиг несущей влияет на качество принимаемого сигнала. Для этого представим  $\varepsilon$  в виде двух частей:  $\varepsilon_i$  кратного расстоянию между подканалами и остатка  $\varepsilon_f$  [7]:

$$\varepsilon = \varepsilon_i + \varepsilon_f.$$

При сдвиге несущей частоты на  $\varepsilon_i$  не нарушается ортогональность и, таким образом, не возникает МКИ, однако это делает демодуляцию невозможной, так как неправильно извлекается информация из подканалов.

При дробном сдвиге  $\varepsilon_f$  принятый сигнал в частотной области может быть записан:

$$Y[k] = \frac{1}{N} H[k] X[k] \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi \varepsilon_i n/N} + \frac{1}{N} \sum_{m=0, m \neq k}^{N-1} H[m] X[m] \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi (m-k+\varepsilon_f) n/N} + W[k],$$

используя выражение

$$\sum_{n=0}^{N-1} a^n = \frac{1-a^N}{1-a}$$

и формулу Эйлера:

$$Y[k] = e^{j\pi \varepsilon_f (N-1)/N} \left\{ \frac{\sin(\pi \varepsilon_f)}{N \sin(\pi \varepsilon_f / N)} \right\} H[k] X[k] + e^{j\pi \varepsilon_f (N-1)/N} \sum_{m=0, m \neq k}^{N-1} \frac{\sin(\pi (m-k+\varepsilon_f))}{N \sin(\pi (m-k+\varepsilon_f) / N)} \times H[m] X[m] e^{j\pi (m-k)(N-1)/N} + W[k] \quad (1)$$

Первый член в последней строке уравнения (1) представляет собой искажение амплитуды и фазы  $k$ -го подканала вследствие дробного смещения несущей. Также из-за сдвига на не целую ширину подканала нарушается ортогональность между подканалами и возникает интерференционная помеха. Согласно центральной предельной теореме МКИ в уравнении (1) моделируется как гауссовский шум, так как является результатом добавления  $N$  случайных величин от каждого подканала, где  $N$  —

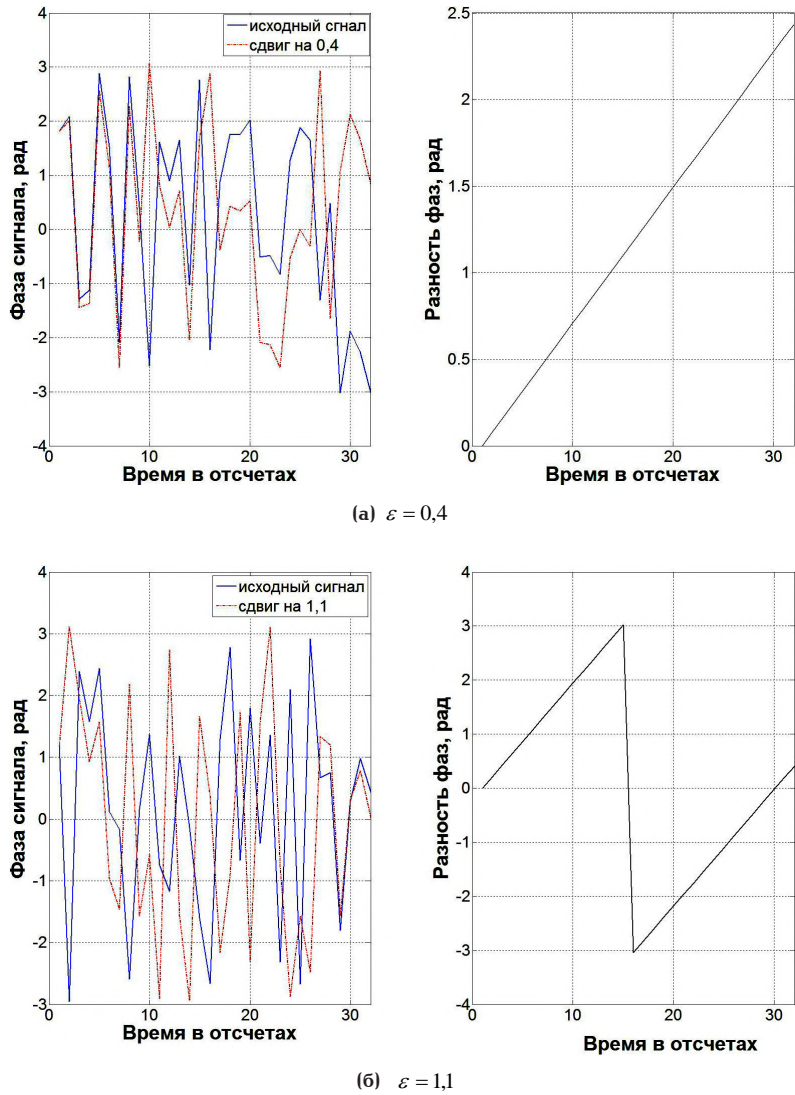


Рис. 1. Эффект влияния смещения частоты несущей на фазу сигнала во временной области для различных значений  $\epsilon$

количество подканалов, которое, как правило, велико. Исходя из уравнения (1), мощность МКИ, влияющая на подканал  $k$ , может быть описана следующим выражением:

$$\sigma_i^2(k) = \sigma_A^2 \frac{1}{N^2} \sum_{\substack{m=-N_u/2 \\ (m \neq 0, m \neq k)}}^{N_u/2} \frac{\sin^2(\pi(m-k + \epsilon_f))}{\sin^2\left(\frac{\pi}{N}(m-k + \epsilon_f)\right)}$$

На рис. 3 представлено соотношение  $(\sigma_i^2/\sigma_A^2)$ , которое представляет собой отношение мощности интерференционной помехи к мощности полезного сигнала (Interference-to-Signal Power Ratio – ISR). Моделирование проводилось для случая  $N=1152$  — количество точек БПФ,  $N_u=180$  — количество информационных подканалов.

Более наглядно влияние сдвига несущей, не кратного ширине подканала, можно увидеть на рис. 4, где показаны точки QPSK (quadrature phase shift keying — квадратурная фазовая манипуляция) созвездия для разных  $\epsilon_f$  без учета влияния канала.

Поскольку все это приводит к резкому возрастанию битовой ошибки (bit error rate-BER), на выходе демодулятора при проектировании систем связи на основе OFDM необходимо определить мак-

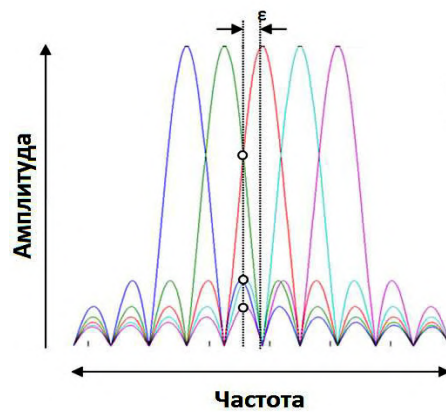


Рис. 2. Интерференция между подканалами

симально возможную допустимую погрешность в оценке и коррекции частотного сдвига.

В [8] приведено соотношение, позволяющее определить величину максимального ухудшения ОСШ (отношение сигнал/шум)  $\Delta\gamma_{\max}$  для каждого конкретного его значения  $\gamma$  в канале АБГШ при заданной величине  $\epsilon_f$  (рис. 5):

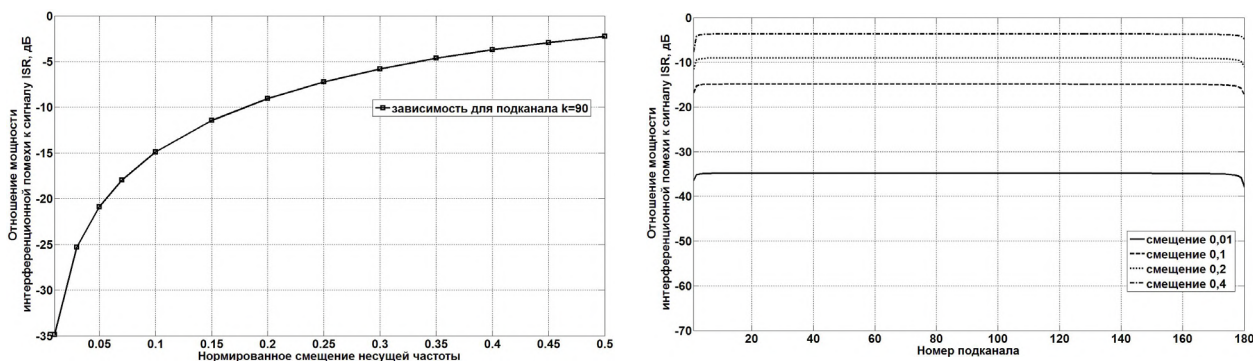
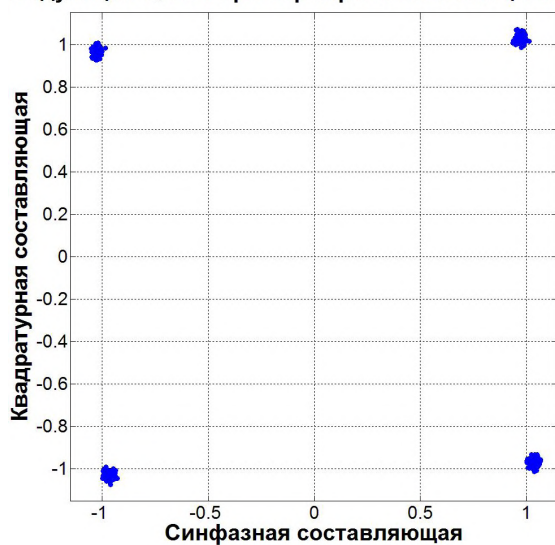
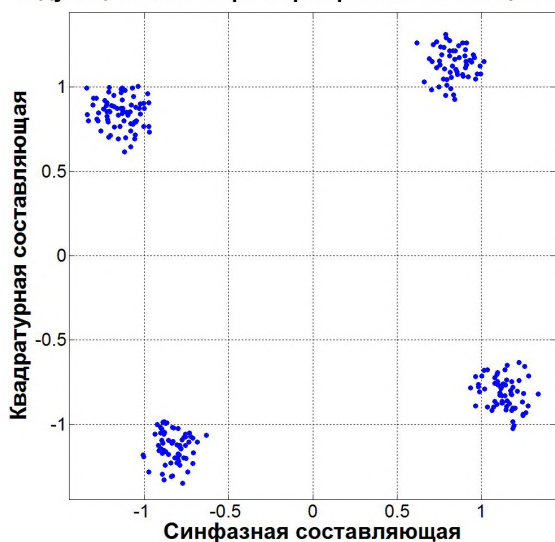


Рис. 3. Отношение мощностей интерференционной помехи к сигналу в зависимости от  $\varepsilon_f$

Модуляция QAM-4 при нормированном смещении 0,01



Модуляция QAM-4 при нормированном смещении 0,05



Модуляция QAM-4 при нормированном смещении 0,25

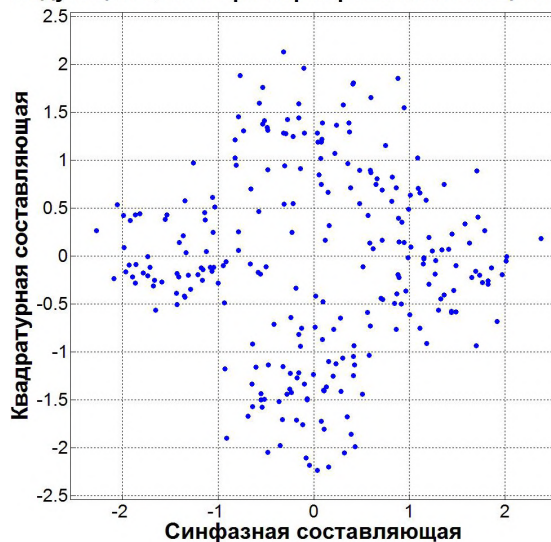


Рис. 4. Модуляция QPSK при различных значениях  $\varepsilon_f$

$$\varepsilon_f < \frac{\sqrt{3}}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\gamma} \left( 1 - \frac{1}{\Delta\gamma_{\max}} \right)}$$

Из рис. 5 видно, что даже небольшое  $\varepsilon_f$  вызывает существенное ухудшение качества принимаемого сигнала.

Помимо этого, серьезность такого рода искажений вызвана еще и тем, что невозможно снизить их уровень или полностью устранить простым увеличением мощности передатчика, так как источником помех является сам сигнал.

Поэтому при проектировании необходимо учитывать максимально допустимое ухудшение

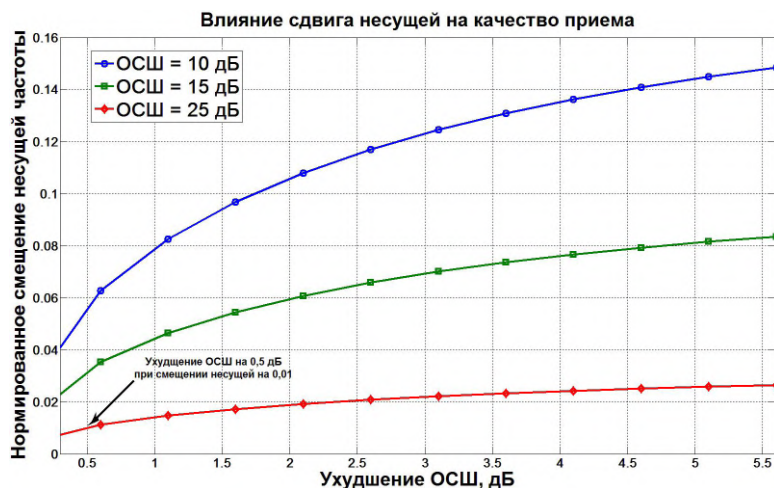


Рис. 5. Влияние сдвига несущей на качество приема

ОСШ канала, вызванное ошибками синхронизации.

**Выводы.** Технология OFDM имеет ряд преимуществ и недостатков, одним из которых является высокая чувствительность к сдвигу несущей частоты.

Сдвиг несущей частоты, кратный расстоянию между подканалами, делает демодуляцию невозможной, так как неправильно извлекается информация из подканалов, а сдвиг, не кратный расстоянию между подканалами, приводит к потере ортогональности и возникновению МКИ, что существенно ухудшает качество принимаемого сигнала.

Серьезность такого рода искажений вызвана еще и тем, что невозможно снизить их уровень или полностью устранить увеличением мощности передатчика, так как источником помех является сам сигнал. Поэтому при проектировании необходимо учитывать максимально допустимое ухудшение ОСШ канала, вызванное ошибками синхронизации.

#### Библиографический список

1. ETSI ES 201 980 V3.1.1 (2009–08) Digital Radio Mondiale (DRM) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://www.drm.org/wp-content/uploads/2012/10/DRM-System-Specification.pdf> (дата обращения: 26.05.2015).
2. ETSI EN 302 755 V1.3.1 (2012–04) Digital Video Broadcasting (DVB) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_en/302700\\_302799/302755/01\\_03\\_01\\_60/en\\_302755v010301p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/302700_302799/302755/01_03_01_60/en_302755v010301p.pdf) (дата обращения: 26.05.2015).
3. ETSI TS 136 141 V10.1.0 (2011–01) LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) conformance

testing (3GPP TS 36.141 version 10.1.0 Release 10) [Электронный ресурс]. – Режим доступа : [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136100\\_136199/136141/10.01.00\\_60/ts\\_136141v100100p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136141/10.01.00_60/ts_136141v100100p.pdf) (дата обращения: 26.05.2015).

4. IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems. IEEE 802.16–2012. [Электронный ресурс] // IEEE Standards association. – Режим доступа : <https://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16p-2012.pdf> (дата обращения: 26.05.2015).

5. Ramjee, Prasad OFDM for Wireless Communications Systems, 2004. – P. 14.

6. Y. Zhao and S. G. Haggman Sensitivity to Doppler shift and carrier frequency errors in OFDM systems // IEEE 46-th Vehicular Technology Conference, vol. 3, pp. 1564–1568, April 1996.

7. W. Aziz, E. Ahmed, G. Abbas, S. Saleem, Q. Islam. Performance Analysis of Carrier Frequency Offset (CFO) in OFDM using MATLAB // Journal of Engineering (JOE). – 2012. – Vol. 1, № 1. – P. 5–10.

8. Speth M., Fechtel S. A., Fock G., Meyr H. Optimum Receiver Design for Wireless Broad-Band Systems Using OFDM. – Part I // IEEE Transactions on Communications. – 1999. – Vol. 47. – P. 1668–1677.

**БАТЫРЕВ Иван Александрович**, аспирант кафедры «Средства связи и информационная безопасность» Омского государственного технического университета; научный сотрудник ОАО ОНИИП. Адрес для переписки: [b.ivan007@mail.ru](mailto:b.ivan007@mail.ru)

Статья поступила в редакцию 05.06.2015 г.

© И. А. Батырев

## УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ ПОДХОД К МОДЕЛИРОВАНИЮ ИНТЕГРАЛЬНЫХ КОМПОНЕНТОВ ДЛЯ LC ФИЛЬТРОВ

**В статье предложены способы совершенствования подходов к проектированию интегральных LC фильтров для сокращения общего времени разработки устройств. Осуществлена попытка дать ответы на вопросы относительно реализации интегральных компонентов. Предложенные усовершенствования опробованы в процессе моделирования двух полосовых фильтров, представлены данные по их электрическим параметрам.**

**Ключевые слова:** интегральный LC фильтр, многослойные интегральные компоненты, подход к проектированию, электромагнитное моделирование.

**Актуальность вопроса.** Исследование вопросов моделирования интегральных LC фильтров и их компонентов остается актуальным ввиду перспективности применения таких устройств [1–4].

Особенно важным является разработка и совершенствование подходов к проектированию интегральных устройств, в том числе и интегральных фильтров, в части электромагнитного моделирования с целью сокращения общего времени проектирования.

Один из подходов к моделированию обозначенных устройств представлен в [5]. В данной статье предложены способы усовершенствования указанного подхода к проектированию интегральных LC-фильтров, а также сделана попытка дать ответы на некоторые вопросы моделирования интегральных компонентов для LC фильтров.

**Основная часть.** Предложенные усовершенствования подхода к проектированию интегральных LC фильтров относятся к изменению алгоритма моделирования компонентов.

Компоненты LC фильтров, емкости и индуктивности, являются частотно зависимыми, что видно из следующих известных формул [3]:

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{\omega X_C}, \\ L &= \frac{X_L}{\omega}, \end{aligned} \quad (1)$$

где  $C$  — емкость, Ф,

$X_C$  — емкостное сопротивление, Ом,

$L$  — индуктивность, Гн,

$X_L$  — индуктивное сопротивление, Ом,

$\omega$  — циклическая частота, рад/с.

Это обуславливает зависимость размеров элементов топологии слоев от частоты, на которой измеряются параметры компонентов. Условно можно назвать ее частотой анализа компонента.

При использовании более раннего алгоритма моделирования компонентов [5] оценка значения номинала производилась качественно, то есть посредством сравнения графика зависимости входного сопротивления компонента от частоты и соответствующего графика его эквивалентной схемы. Такой способ дает приблизительную оценку

и не в полной мере подходит для точного моделирования элементов схемы.

Точность можно повысить при помощи количественной оценки номиналов компонентов, которая основывается на измерении значения на конкретной частоте анализа. В качестве такой частоты для всех элементов нами изначально была выбрана центральная частота фильтра. Однако такой подход не дает достаточно точных результатов и предполагает довольно трудоемкий процесс постепенной корректировки элементов фильтра, включающий в себя значительное количество итераций.

В связи с этим нами было выдвинуто предположение о том, что не все компоненты фильтра обладают частотой анализа, совпадающей с его центральной частотой. Для проверки предположения были осуществлены следующие действия. Промоделированные на центральной частоте компоненты объединены в подсхемы, после анализа которых, установлены реальные номиналы компонентов. После этого из соответствующих графиков определялась частота анализа, на которой компонент обладает этим номиналом.

При отсутствии на графике искомого значения номинала в качестве частоты анализа компонента бралась частота, на которой компонент начинает проявлять зависимость номинала от частоты, то есть перестает быть константой. На рис. 1 представлены графики, из которых виден характер зависимости номинала от частоты.

Для тех компонентов, для которых частота анализа отличалась от центральной частоты фильтра, топологии были созданы вновь. При этом моделирование проводилось уже на соответствующих частотах анализа.

В результате полученные электрические характеристики откорректированных подсхем, а также номиналы компонентов оказались достаточно близкими к расчетным. Для полного совпадения электрических параметров подсхем с расчетными, топология слоев рассматриваемых компонентов подверглась дополнительной корректировке. Этот процесс занимает всего несколько итераций и является направленным, при этом количественная оценка номиналов дает возможность для формализации процесса.

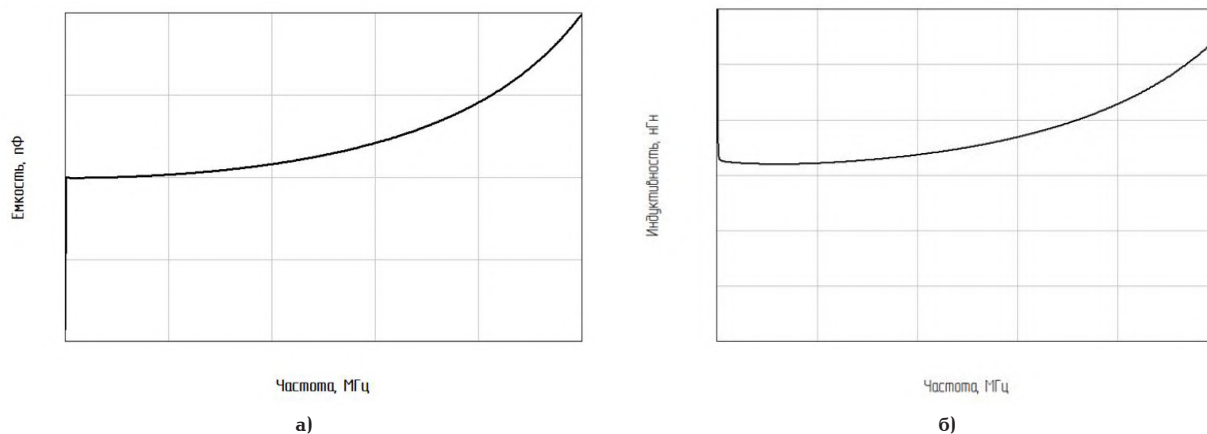


Рис. 1. Характер зависимости номинала от частоты:  
а) для емкости; б) для индуктивности

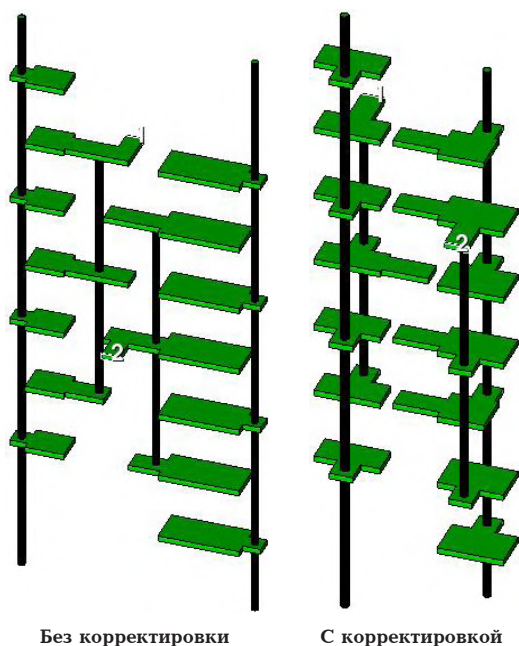


Рис. 2. Примеры конструкций П-образных секций емкостей

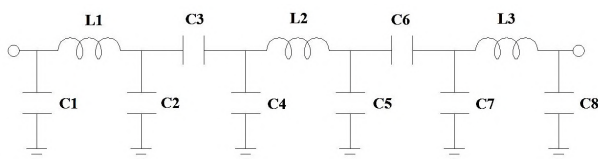


Рис. 3. Схема рассматриваемых полосовых фильтров

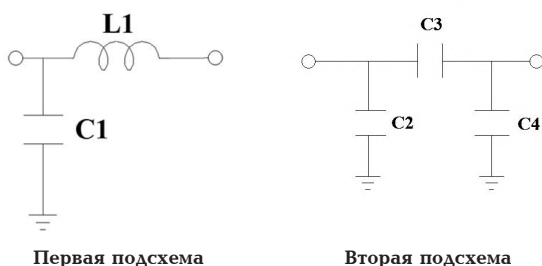


Рис. 4. Выделенные подсхемы

Стоит особо отметить, что компоненты с частотой анализа, совпадающей с центральной частотой фильтра, корректировке не подвергались, это также способствовало сокращению количества итераций моделирования.

Другое усовершенствование подхода к проектированию интегральных LC фильтров касается реализации П-образных секций емкостей, в части моделирования незаземленных емкостей продольных ветвей. Нами рассмотрен тот случай, когда незаземленная емкость может быть получена путем частичного перекрытия обкладок заземленных емкостей. Необходимость данного улучшения обуславливается тем, что при построении указанных конденсаторов неизбежно возникают паразитные емкостные связи с внешними экранами.

Для устранения этого влияния предложено использовать конструкцию, которая помогает обеспечить независимость их параметров от расположения относительно внешних экранов, что достигается продлением заземленных обкладок конденсаторов поперечных ветвей снизу и сверху от рассматриваемых незаземленных конденсаторов продольных ветвей. При этом для компенсации образующихся дополнительных заземленных емкостей продленные обкладки откорректированы путем уменьшения их площади в зоне конденсаторов поперечных ветвей.

Стоит отметить, что при этом отсутствует необходимость в аналитическом определении величины указанных дополнительных заземленных емкостей. Примеры описанных конструкций представлены на рис. 2.

В данной статье были сделаны попытки дать ответы на следующие вопросы:

- определение возможности корректирования лишь части компонентов подсхем в процессе приближения параметров подсхем к расчетным;
- определение возможностей по применению усовершенствованного подхода к моделированию LC фильтров для создания алгоритма проектирования определенного типа схемы с минимальным количеством итераций.

**Результаты моделирования.** Моделирование проводилось при помощи численных методов в специализированной САПР. Для исследований брались две однотипные схемы полосовых фильтров с заданными центральными частотами (2900 МГц и 1525 МГц).

Схема электрическая принципиальная представлена на рис. 3. В качестве примера были взяты две

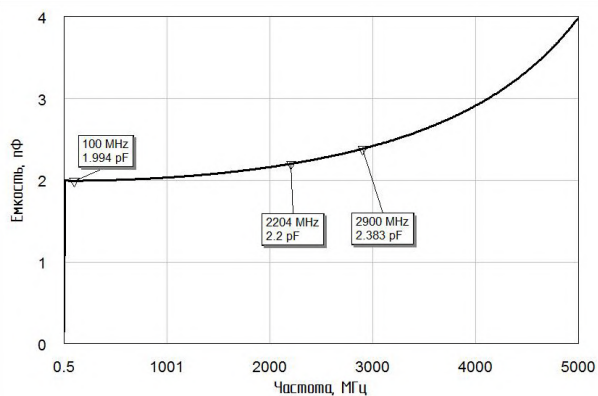


Рис. 5. Зависимость емкости от частоты для конденсатора 2,2 пФ в полосовом фильтре на центральную частоту 2900 МГц

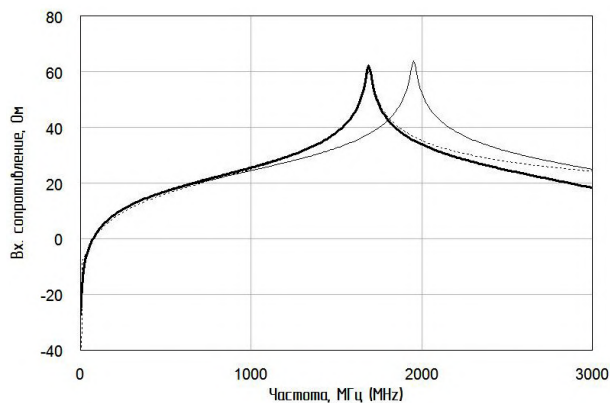


Рис. 6. Зависимость входного сопротивления от частоты для первой подсхемы фильтра на центральную частоту 2900 МГц: - - - - расчетная схема, ——— расчетная структура, ——— структура после корректировки

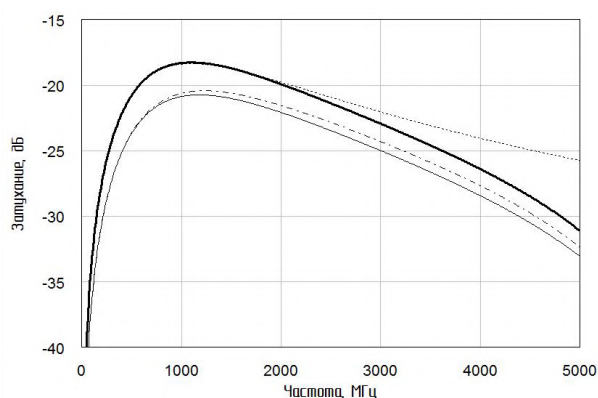


Рис. 7. Зависимость затухания от частоты для второй подсхемы фильтра на центральную частоту 2900 МГц: - - - - расчетная схема, ——— расчетная структура, ——— структура после первого этапа корректировки, ——— структура после второго этапа корректировки

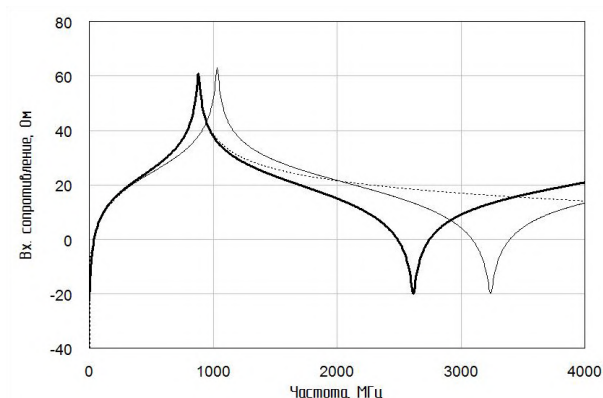


Рис. 8. Зависимость входного сопротивления от частоты для первой подсхемы фильтра на центральную частоту 1525 МГц: - - - - расчетная схема, ——— расчетная структура, ——— структура после корректировки

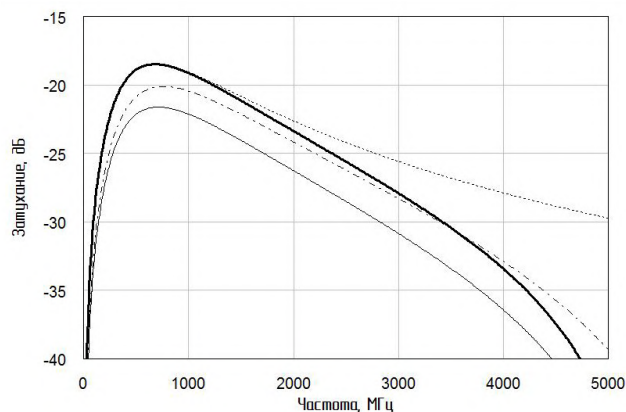


Рис. 9. Зависимость затухания от частоты для второй подсхемы фильтра на центральную частоту 1525 МГц: - - - - расчетная схема, ——— расчетная структура, ——— структура после первого этапа корректировки, ——— структура после второго этапа корректировки

подсхемы, выделенные из указанной схемы в соответствии с рекомендациями, данными в [5]. Они представлены на рис. 4.

Пример зависимости номинала компонента от частоты, для компонента с рабочей частотой

номинала, отличающейся от центральной частоты фильтра, приведен на рис. 5. Номинал конденсатора 1,5 пФ, исходя из этого, в качестве частоты анализа компонента выбирается частота 100 МГц. На рис. 6–9 изображены зависимости электриче-

Таблица 1

Значения номиналов компонентов для первой подсхемы фильтра на центральную частоту 2900 МГц

Этап	C1, пФ	L1, нГн
Расчетная схема	4,7	1,8
Расчетная структура	3,5	1,85
Корректировка структуры	4,78	1,85

Частота анализа: для C1 — 100 МГц, для L1 — 2900 МГц.

Таблица 2

Значения номиналов компонентов для второй подсхемы фильтра на центральную частоту 2900 МГц

Этап	C2, пФ	C3, пФ	C4, пФ
Расчетная схема	2,2	0,36	3,0
Расчетная структура	1,5	0,25	3,1
Первый этап корректировки структуры	1,9	0,25	3,1
Второй этап корректировки структуры	2,1	0,36	3,1

Частота анализа: для C2, C3 — 100 МГц, для L1 — 2900 МГц.

Таблица 3

Значения номиналов компонентов для первой подсхемы фильтра на центральную частоту 1525 МГц

Этап	C1, пФ	L1, нГн
Расчетная схема	8,3	4
Расчетная структура	6	4
Корректировка структуры	8,2	4

Частота анализа: для C1 — 100 МГц, для L1 — 1525 МГц.

Таблица 4

Значения номиналов компонентов для второй подсхемы фильтра на центральную частоту 1525 МГц

Этап	C2, пФ	C3, пФ	C4, пФ
Расчетная схема	3,4	0,56	5,0
Расчетная структура	3,4	0,41	4,0
Первый этап корректировки структуры	3,4	0,38	5,0
Второй этап корректировки структуры	3,4	0,57	5,0

Частота анализа: для C2, C3 — 100 МГц, для L1 — 1525 МГц.

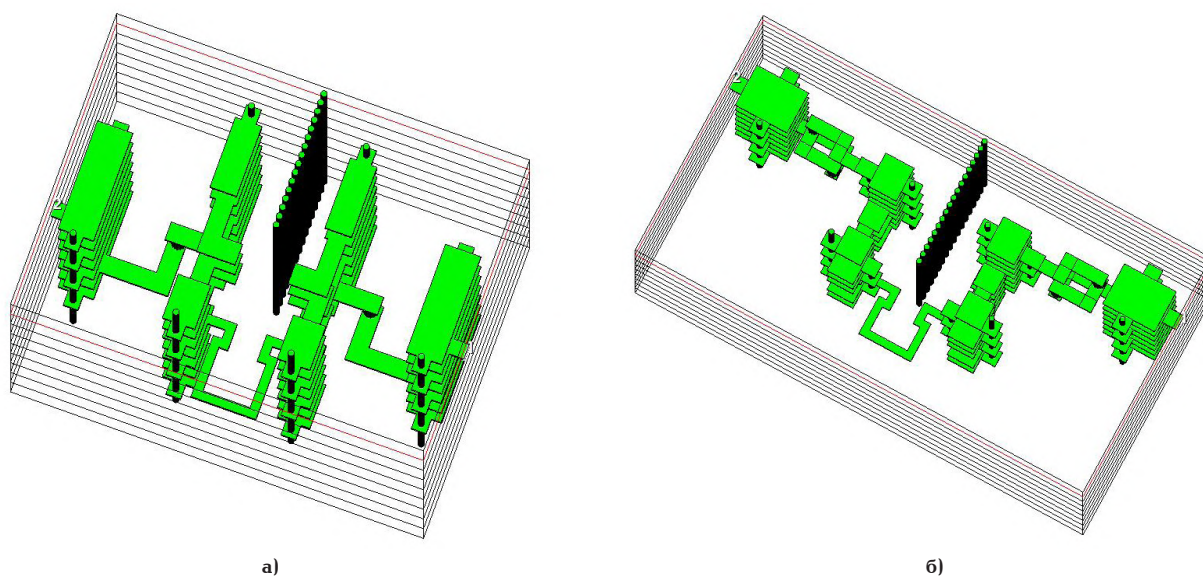


Рис. 10. Структура интегрального LC фильтра с центральной частотой 2900 МГц:  
а) промоделированного без использования улучшенного подхода;  
б) промоделированного с использованием улучшенного подхода

ских параметров подсхем от частоты, до и после корректировки. В табл. 1–4 представлены расчетные значения номиналов компонентов подсхем и значения на каждом этапе корректировки.

Далее структуры промоделированных подсхем одного из фильтров (с центральной частотой 2900 МГц) были объединены в общую структуру фильтра.

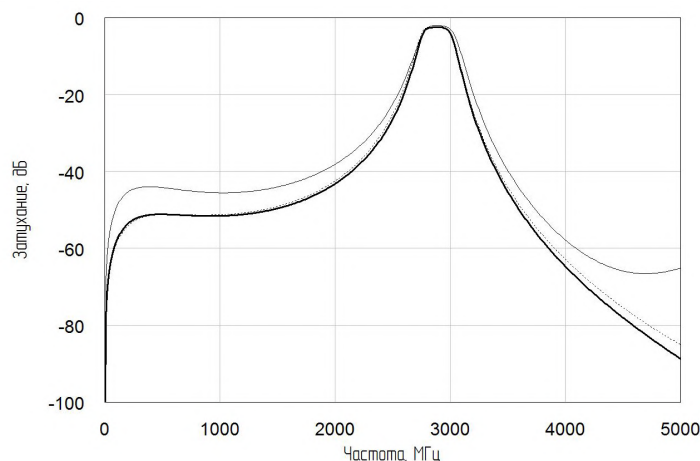
Полученная для него зависимость затухания от частоты имела расхождение с расчетной, в связи с чем, произведена дополнительная корректировка некоторых элементов схем. Корректировка производилась последовательно для каждого элемента отдельно, при этом на один элемент приходилось не более трех итераций.

Для оценки эффективности применимых подходов к моделированию было произведено сравнение параметров данного фильтра, спроектированного без применения предложенного подхода и с его применением. Соответствующие структуры представлены на рис. 10.

На рис. 11 приведен график, содержащий соответствующие зависимости затухания от частоты. Как видно из рисунка, полученный фильтр имеет лучшее затухание в полосе задерживания как с левой, так и с правой стороны от полосы пропускания.

При этом стоит отметить, что в данном диапазоне частот зависимости полученного фильтра и расчетной структуры практически совпадают. Данное





**Рис. 11. Зависимость затухания от частоты для фильтра на центральную частоту 2900 МГц:**  
 - - - - - расчетная схема; — структура, полученная без использования улучшенного подхода; — структура, полученная с использованием улучшенного подхода

обстоятельство, предположительно, связано с более точным моделированием элементов схемы.

Из работы можно сделать следующие **выводы**:

— топология компонентов с частотой анализа, совпадающей с центральной частотой фильтра, не нуждается в изменении, это позволяет ограничиться корректировкой лишь части элементов подсистемы, что сокращает количество итераций;

— представленные усовершенствования подхода к моделированию интегральных LC фильтров могут применяться для создания алгоритма проектирования определенного типа схемы с минимальным количеством итераций;

— существует необходимость апробации данного подхода к моделированию интегральных LC фильтров для более точной оценки его эффективности;

— дальнейшим направлением исследований может быть разработка алгоритмов проектирования с минимальным количеством итераций для наиболее применяемых схем интегральных LC фильтров.

#### Библиографический список

1. Милованов, О. С. Техника сверхвысоких частот : учеб. пособие для вузов / О. С. Милованов, Н. П. Собенин. — М. : Атомиздат. — 1980. — 464 с.

2. Вендик, И. Б. Многослойные интегральные схемы сверхвысоких частот на основе керамики с низкой температурой обжига / И. Б. Вендик, Д. В. Холодняк, А. В. Симин // Компоненты и технологии. — 2005. — Вып. 5. — С. 190–196.

3. Bahl, Inder. Lumped Elements for RF and Microwave Circuits / Inder Bahl. — Norwood, MA : Artech House, 2003. — 488 p.

4. Хроленко, Т. С. Интегральные LC-фильтры ВЧ и СВЧ диапазонов на основе современных материалов [текст] : дис. ... канд. техн. наук. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2013. — 173 с.

5. Борейко, Д. А. Проектирование многослойных интегральных LC-фильтров / Д. А. Борейко, А. И. Тюменцев, Т. С. Хроленко // Техника радиосвязи. — 2014. — Вып. 2 (22). — С. 61–69.

**БОРЕЙКО Денис Александрович**, аспирант кафедры «Средства связи и информационная безопасность».

Адрес для переписки: denbor1@mail.ru

Статья поступила в редакцию 16.06.2015 г.

© Д. А. Борейко

## Книжная полка

**Цуканов, В. Волоконно-оптическая техника : практ. рук. / В. Цуканов, М. Яковлев. — Вологда : Инфра-Инженерия, 2015. — 340 с. — ISBN 978-5-9729-0078-7.**

Рассмотрена отечественная волоконно-оптическая компонентная база, предназначенная для жестких условий эксплуатации. Приведены основные технические характеристики, а также методы их измерения, оптических волокон, волоконно-оптических кабелей, оптических соединителей, объединителей, разветвителей, переключателей, пассивных и активных волоконно-оптических линий задержки, дискретных передающих и приемных оптоэлектронных модулей, оптических трансиверов и ретрансляторов. Предложены методы контроля параметров безотказности волоконно-оптических компонентов с учетом их принципиальных отличий от электронных компонентов. Книга рассчитана на широкий круг читателей: студентов, инженерно-технических работников, ученых, интересующихся данной тематикой и профессионально связанных с разработкой или эксплуатацией волоконно-оптической техники.

## МОДЕЛЬ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫМ ПРОЦЕССОМ (ОСВЕЩЕНИЕМ) НА ПРЕДПРИЯТИИ

**Показан подход, позволяющий использовать автоматизированную систему управления как ядро отдельного технологического процесса промышленного предприятия. Структура технологического процесса представлена в обобщенном виде как аналоговой, так и дискретной моделью. Для построения модели использован метод аналогий.**

**Ключевые слова:** модель, автоматизированная система управления, адаптивная система, блок принятия решений, алгоритм.

**Введение.** Автоматизированные системы управления (АСУ) производством появились в первой половине прошлого столетия. Основными функциями систем управления освещением объектов и территорий были дистанционное управление режимами освещения, контроль исправности оборудования, обеспечение прохождения сигналов управления через неразветвленные цепи освещения.

С развитием средств вычислительной техники и прогрессом программной инженерии, программное управление позволило расширить набор функциональных возможностей этих систем, проводить как контроль, так и диагностику осветительного оборудования. Но и сейчас окончательно не решена проблема неэффективного расхода электроэнергии, особенно при эксплуатации устаревшего оборудования.

**Последние исследования и публикации.** В промышленности актуальна тематика управления производственными процессами. По-прежнему актуальна проблема энергосбережения при освещении объектов и территорий как традиционными светильниками, так и светодиодными. Применение АСУ в современных условиях позволяет достигать максимального эффекта, что определяется их направленностью на решение именно оптимизационных задач [1–4]. Это задачи адресного управления отдельным светильником, управления мощностью светильника (диммирование), адаптация к сетям освещения с произвольной топологией, учёт эксплуатационных условий на удаленных от диспетчерского пункта освещаемых участках, и т. п.

Несмотря на достаточно широкое использование автоматизированных систем (АС) для управления освещением городов и промышленных объектов, специфика применения разнородных светильников требует найти те условия и направления, на которых применение АС наиболее эффективно. Нужно определить способы, обеспечивающие оптимальные значения основных параметров АСУ, такие как коэффициент передачи по кольцу управления, постоянную времени в адаптивно меняющемся контуре управления, а также учёт воздействия деста-

билизирующих факторов. Необходимо построить модель предметной области, в которой участвует ядро АС, что позволит обеспечить адаптивную работу системы.

**Постановка задачи.** В плане повышения эффективности систем освещения за счёт улучшения показателей энергосбережения в [5] показаны области, где может быть реализован прагматический аспект применения АСУ. Отмечены как основные задачи АСУ в концепции реализации освещения, так и новые, которые требуют своего решения. К ним относятся:

- контроль и регулирование предельных значений и частот напряжения питания;
- улучшение показателей освещения при питании светильников совмещёнными силовыми и осветительными сетями;
- управление блоком питания светодиодного светильника с целью поддержания его выходных параметров при изменениях напряжения питающей сети;
- контроль электромагнитных наводок на частоте гармоник питающей сети во время стационарной работы.

Поэтому целью исследования является построение аналоговой и дискретной модели системы управления, позволяющей не только включить АС в контур управления, но и обеспечить оптимальные значения основных параметров системы.

**Материал исследования.** При решении указанных задач за прототип взята аналоговая модель, отражающая ядро отдельного технологического процесса промышленного предприятия [6]. В прототипе отражен подход, позволяющий представить АСУ технологическим процессом аналоговой моделью, и показан алгоритм для выполнения технологических решений.

По сути, в [6] функционирование технологического участка рассматривается как итерационный процесс. Технологический процесс представляется как замкнутая система автоматического управления (САУ), имитирующая умственную деятельность человека. В модели используется дискретное

минимальное приращение, на которое изменяется состояние системы. После работы системы в переходном режиме достигается состояние равновесия, при котором выходная технологическая модель  $y(t)$  соответствует требованиям для объекта, описанным входной моделью  $x(t)$ , с погрешностью не более  $g(t)$ . Зафиксировав рассогласование технологической модели с моделью объекта не более заданного, система останавливается. Таким образом, сумма  $i$ -х операций  $O_i$  ведёт к получению отдельного  $i$ -го технологического параметра  $П_i$ .

В [6] принято, что объект управления (ОбУ) является инерционным звеном первого порядка, выполняющим предписания управляющего блока, которые будут выполняться ОбУ с большим или меньшим запаздыванием. Кроме этого, считается, что для отдельного технологического процесса, имеющего конкретные технические характеристики, справедливо:

— при минимальном числе требований к ОбУ максимальное число отдельных технических ресурсов процесса будет затрачено на исполнение требований;

— с увеличением количества требований  $P_{BX}$  к процессу на выполнение операций всё меньше ресурсов можно будет отводить на каждую отдельную операцию. Это приводит к конкретному значению количества требований, выполненным процессом во времени  $P(t)$ ;

— зависимость количества требований, выполненных процессом во времени, имеет апериодический характер, если процесс будет использовать всё большее количество своих технических возможностей, которые являются конечными;

— максимальное количество требований  $С_m$ , которые может выполнить процесс, и степень сложности  $С_l$  выполнения требований к процессу со стороны управляющего блока, связаны условием:  $С_l \cdot С_m = const = \tau$ , — это постоянное значение для отдельного процесса.

В итоге, в [6] технологический процесс представлен уравнением:

$$\frac{dP(t)}{dt} + \frac{1}{\tau} P(t) = \frac{1}{\tau} K \cdot P_{BX}, \quad (1)$$

где  $K$  — степень интенсивности выполнения требований ОбУ (как апериодического инерционного звена).

Решение этого линейного дифференциального уравнения первого порядка составляет сумму свободной и вынужденной составляющей, и в технологическом процессе при ненулевых начальных условиях ОбУ представлен математической моделью апериодического инерционного звена.

В [6] в блоке принятия решений системы управляющий сигнал  $P_{BX}(t)$  для объекта управления является суммой сигнала управления  $P_{УПР}(t)$  и постороннего дестабилизирующего фактора  $P_{П}(t)$  с коэффициентом влияния  $Z$ :

$$P_{BX}(t) = P_{УПР}(t) + Z P_{П}(t). \quad (2)$$

Выходной сигнал вычитающего устройства системы управления имеет вид:

$$\Delta P_{BX}(t) = K_1 P_O(t) - K_2 P(t), \quad (3)$$

где  $K_1$  — коэффициент влияния, отражающий степень сложности задания, выполняемого ОбУ;

$P_O$  — требования, заданные к ОбУ;

$K_2$  — коэффициент передачи по цепи обратной связи системы управления.

Аналоговая модель в [6] использует блок подготовки управляющих воздействий, основная особенность которого — это способность отрабатывать медленные или быстрые установки для ОбУ. Этот блок динамически определяет процесс вхождения системы в режим слежения за требованиями, заданными для технологического процесса  $P_O(t)$ .

Блок подготовки представляет собой безынерционное звено и устанавливает малые по значению требования для исполнения, которые непрерывно вводятся в сигнал управления. Блок подготовки имеет коэффициент передачи  $K_{ПР}$  (безынерционное звено с пропорциональным коэффициентом передачи), а также содержит астатическое звено, которое сводит к нулю остаточное отклонение в установившемся режиме (например, интегратор с постоянной времени  $\tau_{II}$ ). Этим блок подготовки сведён к ПИ-регулятору.

Таким образом, с учётом материалов из [6], для установившегося состояния аналоговая модель системы может быть описана уравнениями (4–6):

$$P(t) + \frac{1}{\tau} P(t) - K \cdot [P_{BX}(t) + Z \cdot P_{П}(t)] = 0. \quad (4)$$

Сигналы на входе и выходе блока подготовки определяются выражениями:

$$\Delta P_{BX}(t) = K_1 \cdot P_O(t) - K_2 \cdot P(t); \quad (5)$$

$$\begin{aligned} P_{УПР}(t) &= \left( K_{ПР} + \frac{1}{p} \cdot K_{II} \right) \cdot \Delta P_{BX}(t) = \\ &= \left( K_{ПР} + \frac{1}{p} \cdot \frac{K_Y}{\tau_{II}} \right) \cdot \Delta P_{BX}(t). \end{aligned} \quad (6)$$

Для аналоговой модели в [6] исследовано поведение выхода ОбУ относительно установок на входе вычитателя при различных значениях  $K$  и  $\tau$  в ОбУ, а также в зависимости от  $Z$ . Модель является информативной и может быть использована для разработки дискретной модели, применимой в многоканальных системах параллельного и последовательного действия. Этот подход может служить основой проектирования систем автоматизации с использованием АСУ для управления освещением территорий.

Дискретную модель можно составлять исходя из рассмотрения в уравнении (4) слагаемого  $\frac{1}{\tau} P(t)$ , определяющего отличие производительности  $P(t)$  технологического процесса от заданных требований  $P_O$ . Для реализации этого этапа работы системы используется алгоритм «последовательного приближения». Алгоритм построен на методе «рекурсивного максимального подобию».

При математической обработке данных о системе учитываются условия изменения параметров системы, что не только обеспечит управление, но и обусловит необходимое поведение системы во времени.

Так можно оптимизировать поведение системы на двух этапах: на этапе вхождения в режим управления и собственно в управлении технологическим процессом.

Для данных этапов работы системы необходимы различные значения оптимальных параметров.

Поэтому дискретная модель должна включать три составляющие и учитывать следующие факторы:

- изменение значения производительности  $P(t)$ ;
- воздействие на объект управления сигнала управления  $P_{упр}(t)$ ;
- требования к объекту управления по старению и износу оборудования, а также по восприятию внешних дестабилизирующих воздействий  $P_{п}(t)$ .

#### Первая составляющая дискретной модели.

Учесть изменение во времени значения производительности  $P(t)$  можно исходя из того, что в ПИ-регуляторе интегрирующее звено, действуя как идеальный интегратор, на интервале времени между двумя соседними отсчётами  $\Delta t$  интегрирует фиксированное значение сигнала с выхода вычитателя  $\Delta P_{вх}(t)$ , то есть константу.

В это время пропорциональное безынерционное звено не участвует в работе: оно необходимо во время вхождения системы в режим управления. Постоянное во времени значение управляющего воздействия неизменно и передаётся на выход блока подготовки. Для выходного сигнала ОБУ, как инерционного звена, и с учётом выражения для разложения показательной функции в ряд, при  $t/\tau \ll 1$  и  $t \ll K\tau$ , можно записать (пренебрегая нелинейными составляющими ряда):

$$P(t) = K \cdot P_{вх} - K \cdot P_{вх} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \approx K \cdot P_{вх} \cdot \frac{t}{\tau}. \quad (7)$$

На интервале времени между двумя соседними отсчётами  $\Delta t$  выражение (7) будет иметь вид

$$P(T) \approx KP_{вх}(t/\tau). \quad (8)$$

На  $(i-1)$ -ом шаге работы системы управления на выходе объекта управления имеется некоторое значение  $P(t_{i-1}) = KP_{вх}$  и его приращение на  $i$ -ом шаге будет:

$$\begin{aligned} P(t_{i-1}) - P(t_i) &= K \cdot P_{вх} - K \cdot P_{вх} \cdot \frac{\Delta t}{\tau} = \\ &= K \cdot P_{вх} \left(1 - \frac{\Delta t}{\tau}\right). \end{aligned} \quad (9)$$

В правой части этого выражения коэффициент  $KP_{вх}$  представляет собой значение на выходе объекта управления на  $i$ -ом шаге. Второй множитель (скобка) отражает изменение  $P(t)$  — приращения числа требований, выполненных во времени, которое обозначим как  $a_1 = (1 - \Delta t/\tau)$ . То есть можно записать:

$$P(t_i) = a_1 \cdot P(t_{i-1}); \quad a_1(i) = 1 - \frac{\Delta t}{\tau}. \quad (10, 11)$$

В процессе дискретной подстройки на каждом  $i$ -м шаге на интервале времени между соседними отсчётами  $\Delta t$ , будет своё значение константы оборудования  $\tau(i)$ , и, следовательно, своё значение коэффициента  $a_1(i)$ .

Можно записать для эквивалентного значения количества требований  $P_{эКВ}(i)$ , выполненных ОБУ во времени на  $i$ -м шаге:

$$P_{эКВ}(i) = a_1(i) \cdot P_{эКВ}(i-1) = \left[1 - \frac{\Delta t}{\tau(i)}\right] \cdot P_{эКВ}(i-1). \quad (12)$$

Также необходимо учесть воздействие сигнала управления  $P_{упр}(t)$  и помехи.

**Вторая составляющая дискретной модели** учитывает воздействие на ОБУ управляющего сигнала с выхода ПИ-регулятора на каждом временном шаге  $\Delta t$ . Это, во-первых, сигнал управления  $P_{упр}(t)$ . Данный сигнал один из двух составляющих входного сигнала  $P_{вх}$  на входе ОБУ. Из выражения (7) проявление  $P_{упр}$  на выходе ОБУ определится:  $KP_{упр}(t/\tau)$ , и при шаге  $\Delta t$  его можно представить как

$$KP_{упр}(\Delta t/\tau). \quad (13)$$

Так как формула (7) получена при условии  $t/\tau \ll 1$ , или  $\tau \gg t$  ( $t = \Delta t$ ), то выражение (13) можно переписать в виде:

$$KP_{упр}(\Delta t). \quad (14)$$

То есть проявление воздействия  $P_{упр}$  на ОБУ будет определено на малом интервале времени  $\Delta t$ . Влиянием величины  $\tau \gg \Delta t$  на интервале  $\Delta t$  в данной ситуации можно пренебречь. Таким образом, вторая часть модели, учитывающая воздействие на ОБУ сигнала  $P_{упр}$ , будет выражение (14), или для  $i$ -го шага во времени можно записать:

$$K(i) \cdot P_{упр}(i) \cdot \Delta t_{\tau(i) \gg \Delta t} = a_2(i) \cdot P_{упр}(i), \quad (15)$$

где  $a_2(i) = K(i) \cdot \Delta t$ .

**Третья часть дискретной модели** учитывает воздействие на ОБУ из-за факторов старения, износа и восприятия внешних дестабилизирующих воздействий, или сигнала помехи  $P_{п}(t)$ . Такой сигнал является второй составляющей воздействия на входе ОБУ. По аналогии с мотивацией для второй части дискретной модели можно записать:

$$K(i) \cdot P_{п}(i) \cdot Z(i) \cdot \Delta t_{\tau(i) \gg \Delta t} = a_3(i) \cdot P_{п}(i), \quad (16)$$

где  $Z(i)$  — коэффициентом влияния помехи;

$$a_3(i) = K(i) \cdot Z(i) \cdot \Delta t.$$

Используя формулы (12), (15) и (16), можно представить дискретную модель системы в следующем виде:

$$\begin{aligned} P_{эКВ}(i) &= a_1(i) \cdot P_{эКВ}(i-1) + \\ &+ a_2(i) \cdot P_{упр}(i) + a_3(i) \cdot P_{п}(i). \end{aligned} \quad (17)$$

Опираясь на модель (17), можно полагать, что алгоритм оценки должен найти значения параметров  $K, \tau$  и  $Z$  системы, изменяя их пошагово в дискретной модели за счёт вариации коэффициентов  $a_1(i)$ ,  $a_2(i)$  и  $a_3(i)$  при известных оценках (измеренных значениях) величин  $P(i)$ ,  $P_{упр}(i)$  и  $P_{п}(i)$ .

Нужно менять в дискретной модели значения величин  $K, \tau$  и  $Z$  до тех пор, пока значение  $P_{эКВ}(i)$  в модели не станет равным измеренному значению  $P(i)$  на выходе ОБУ. Тогда значения модели  $K, \tau$  и  $Z$  принимаются равными системным. Непосредственное их измерение провести сложно, к тому же они меняются случайным образом. Таким образом, для дальнейшей проработки можно принять следующую дискретную модель системы:

$$\begin{aligned} P_{эКВ}(i) &= \left[1 - \frac{\Delta t}{\tau(i)}\right] \cdot P_{эКВ}(i-1) + \\ &+ K(i) \cdot \Delta t \cdot P_{упр}(i) + K(i) \cdot Z(i) \cdot P_{п}(i). \end{aligned} \quad (18)$$

Исходя из выражения, полученного для дискретной модели, необходимо предложить, каким

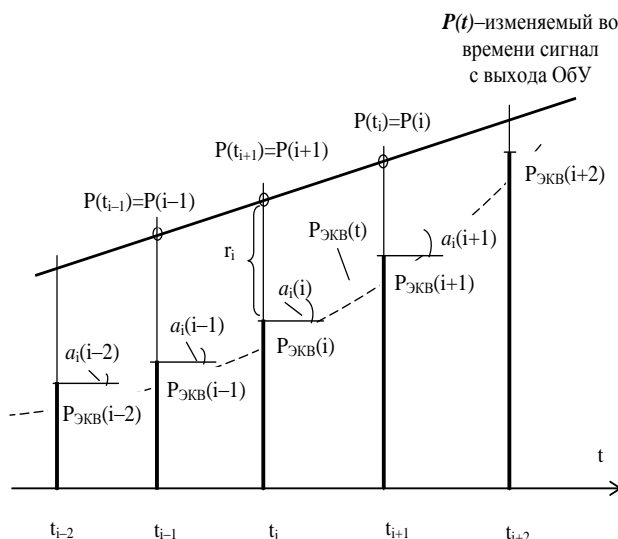


Рис. 1. Формирование оценочных эквивалентных значений сигнала в дискретной рекурсивной модели

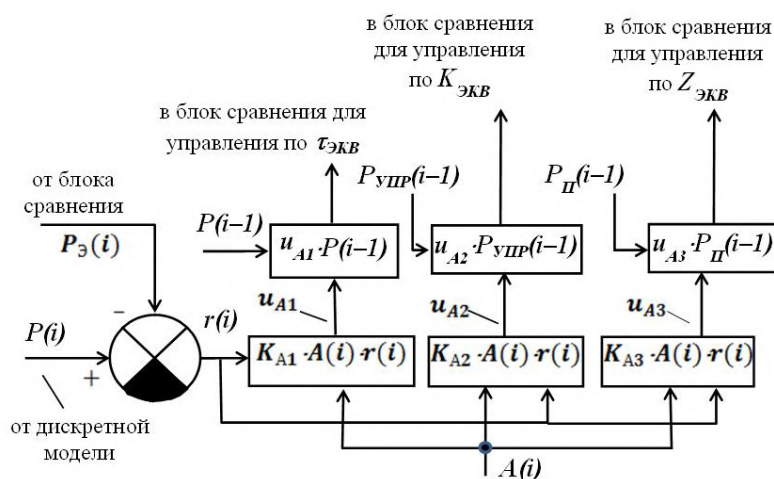


Рис. 2. Блок определения коэффициентов модели  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$

образом в выражении (17) изменять коэффициенты  $a_1(i)$ ,  $a_2(i)$  и  $a_3(i)$ , чтобы выходной сигнал модели  $P_{ЭКВ}(i)$  и сигнал от ОБУ  $P(t)$  стали равными друг другу и равными опорному сигналу  $P_0$  (требованиям, заданным для оборудования).

Это должно происходить при неизвестных значениях величин  $K, \tau$  и  $Z$ , а с другой стороны, при измеренных при этом значениях величин  $P(i)$ ,  $P_{УПР}(i)$  и  $P_{П}(i)$ .

Можно применить известный метод (критерий) наименьших квадратов, используя представление сигналов в виде рекурсивных выражений. Скорость сходимости параметров будет характеризоваться коэффициентами, связанными с точностью: умноженная на коэффициент сумма квадратов разностей будет ограничением оптимизационного процесса. Методологию использования такого способа можно искать в источниках [7–10].

Процесс приближения значения  $P_{ЭКВ}(i)$ , даваемого оценочной дискретной моделью, к значению  $P(t) = P(i)$  сигнала от ОБУ, выглядит, как показано на рис. 1. Реализацию процесса приближения должен выполнять блок сравнения.

Так как, согласно (10), (15) и (16), значение  $P_{ЭКВ}$  в последующей точке формируется с использованием модели (17), где участвуют коэффициенты  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$ , то рассмотрим, как можно определять, например, коэффициент  $a_1$  на каждом последующем временном шаге.

Таким образом, имеем:

$$P_{ЭКВ}(i) = a_1(i-1) P_{ЭКВ}(i-1); \quad (19)$$

$$P_{ЭКВ}(i+1) = a_1(i) \cdot P_{ЭКВ}(i), \quad (20)$$

и так далее.

Если значение коэффициента  $a_1(t)$  на каждом шаге будет постоянно, то будет всегда сохраняться одно и то же рассогласование  $r(t)$  между эквивалентной оценкой  $P_{ЭКВ}(t)$ , представленной огибающей для  $P_{ЭКВ}(t)$  на рис. 1:

$$r(t) = P(t) - P_{ЭКВ}(t). \quad (21)$$

То есть необходимо к значению коэффициента  $a_1$  в предыдущий момент дискретизации добавлять

дополнительное значение, которое с той или иной скоростью будет приближать  $P_{ЭКВ}(t)$  к реальному значению  $P(t)$ . Для этой цели можно использовать методику из [11]. Последующий коэффициент  $a_i(i)$  определяется суммированием предыдущего значения коэффициента  $a_i(i-1)$  и добавкой, которая приближает значение  $P_{ЭКВ}(i)$  к  $P(i)$  и уменьшает величину  $r(i)$ .

Добавочное слагаемое определяется умножением значения оценки  $P(i-1)$  на некоторый корректирующий коэффициент  $A(i)$  для  $i$ -го момента дискретизации [11], учитывающий измеряемые значения величин в системе (т. е.  $P(i-1)$ ,  $P_{УПР}(i-1)$  и  $P_{П}(i-1)$ ):

$$A(i) = P^2(i-1) + P_{УПР}^2(i-1) + P_{П}^2(i-1). \quad (22)$$

Корректирующий коэффициент увеличивает скорость приближения оценочных значений  $P_{ЭКВ}$  даваемых дискретной моделью, к  $P(t)$ . В итоге добавочное слагаемое будет:

$$A(i) \cdot P(i-1). \quad (23)$$

Но скорость приближения значений  $P_{ЭКВ}$  даваемых дискретной моделью, должна зависеть и определяться значением рассогласования  $r(i)$ , которое требуется достичь на  $i$ -м моменте времени. Это значит, что критерием управления является точность (допустимое рассогласование). То есть произведение (23) должно иметь следующий вид:

$$A(i) \cdot P(i-1) \cdot r(i). \quad (24)$$

Функциональный узел, который должен выполнять операции перемножения по (24), может и должен иметь свой регулируемый коэффициент передачи  $K_{A1}$ , за счёт подстройки которого можно менять крутизну процесса приближения величины  $P_{ЭКВ}(t)$  к значениям  $P(t)$ .

Таким образом, выражение, определяющее формирование значения коэффициента  $a_1$  на каждом последующем шаге дискретизации в дискретной модели, будет иметь вид:

$$a_1(i) = a_1(i-1) + K_{A1} \cdot A(i) \cdot P(i-1) \cdot r(i). \quad (25)$$

Аналогично могут быть получены выражения для коэффициентов  $a_2$  и  $a_3$ :

$$a_2(i) = a_2(i-1) + K_{A2} \cdot A(i) \cdot P_{УПР}(i-1) \cdot r(i); \quad (26)$$

$$a_3(i) = a_3(i-1) + K_{A3} \cdot A(i) \cdot P_{П}(i-1) \cdot r(i). \quad (27)$$

Функциональная схема узла, выполняющего операции согласно выражениям (25)–(27), представлена на рис. 2. Получив значения коэффициентов  $a_1$ ,  $a_2$  и  $a_3$  дискретной модели, можно, используя выражения (11, 15, 16), получить значения  $K, \tau$  и  $Z$  (при  $\tau(i) \gg \Delta t$ ):

$$\tau = \frac{\Delta t}{1-a_1}, \quad \text{или} \quad \tau(i) = \frac{\Delta t}{1-a_1(i)}. \quad (28)$$

$$K(i) = \frac{a_2(i)}{\Delta t}; \quad (29)$$

$$Z(i) = \frac{a_3(i)}{K(i) \cdot \Delta t}. \quad (30)$$

**Исследование дискретной модели.** Для оценки соответствия друг другу непрерывной и дискретной

модели проведено численное моделирование, отражающее динамические характеристики дискретной системы регулирования, реализующей процесс управления по рис. 1. Численный эксперимент позволил оценить расхождение характеристик системы, использующей аналоговую и дискретную модель при формировании управляющего воздействия на объект.

Для исследования была составлена программа в среде программирования C++. С помощью (18) вычислялся выходной сигнал ОБУ согласно дискретной модели. Используя метод аналогий, в качестве опорного сигнала  $P_o$  системы взят  $U_o t = U_m \cdot \cos(2\pi \cdot f t) = 0,1 \cdot \cos(2\pi \cdot 10^6 \cdot t)$ , и коэффициент передачи по цепи опорного сигнала равен единице. В качестве дестабилизирующего сигнала  $P_{П}$  принят сигнал  $U_{П}(t) = U_m \cdot \cos(2\pi \cdot f_{П} t) = 0,1 \cdot \cos(2\pi \cdot 10^3 \cdot t)$ , коэффициент передачи  $K_2$  по цепи обратной связи равен единице, а постоянная времени  $\tau$  системы равна  $5 \cdot 10^{-7}$ . Коэффициент передачи  $K_{ПР}$  в цепи прямой связи (безынерционное звено ПИ-регулятора) равен четырём. В цепи прямой связи, рассматриваемой как ПИ-регулятор, коэффициент передачи  $K_{И}$  идеального интегратора взят равным 2,5.

При сравнении результатов, получаемых от обеих моделей, коэффициент влияния дестабилизирующих факторов  $Z$  принят равным нулю. Степень интенсивности выполнения требований  $K$  ОБУ взята 2,5. Количество шагов по времени  $n$  и значение шага  $\Delta t$ , при которых модель остается работоспособной, определены опытным путём:  $n = 103$ ,  $\Delta t = 2 \cdot 10^{-9}$  (выполнено условие  $\tau \gg \Delta t$ ).

При оценке соответствия непрерывной и дискретной модели, проведённой сопоставлением выходных сигналов ОБУ, был использован алгоритм минимизации функций по методу градиентного спуска, значения параметров которого равны:  $\text{Epsl} = 10^{-5}$ ;  $\text{eps} = 10^{-5}$ ;  $\alpha = 10^{-5}$ .

Увеличение  $K$  в интервале [1; 50] при  $\tau = 5 \cdot 10^{-7}$  показало максимальные отличия мгновенных значений выходного сигнала ОБУ по дискретной модели от сигнала по аналоговой модели в диапазоне от 0,56 % до нуля, рис. 3.

Увеличение  $\tau$  в интервале [0,1 мкс; 10 мкс] при  $K = 2,5$  показало максимальные отличия мгновенных значений выходного сигнала ОБУ по дискретной модели от сигнала по аналоговой модели в диапазоне от нуля до 1,5 %, рис. 4.

Таким образом, при указанных параметрах численного моделирования дискретная модель системы управления практически совпадает с непрерывной моделью.

В адаптивной системе управления дискретная модель позволит интеллектуальному регулятору установить оптимальные параметры системы в зависимости от режима её работы. Известные методы установки оптимальных параметров регуляторов (ступенчатого воздействия, по границе устойчивости) не позволяют реализовать адаптивное управление, которое должно обеспечить соответствие параметров непрерывно меняющимся свойствам объекта. Поэтому методом аналогий исследована применимость в производственном процессе САУ на основе ПИД-регуляторов с алгоритмом автоматизированной настройки, использующих периодически вводимое в систему воздействие.

Так как при адаптации главным является оптимизация процесса настройки, применение частотных методов, метода определения коэффициентов дифференциального уравнения обладает рядом

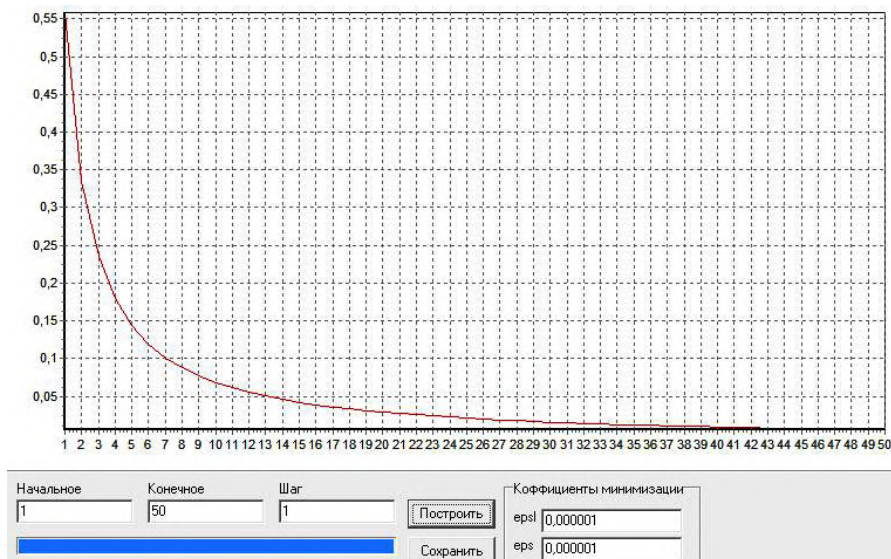


Рис. 3. Максимальные отличия дискретной модели от аналоговой в зависимости от  $K$

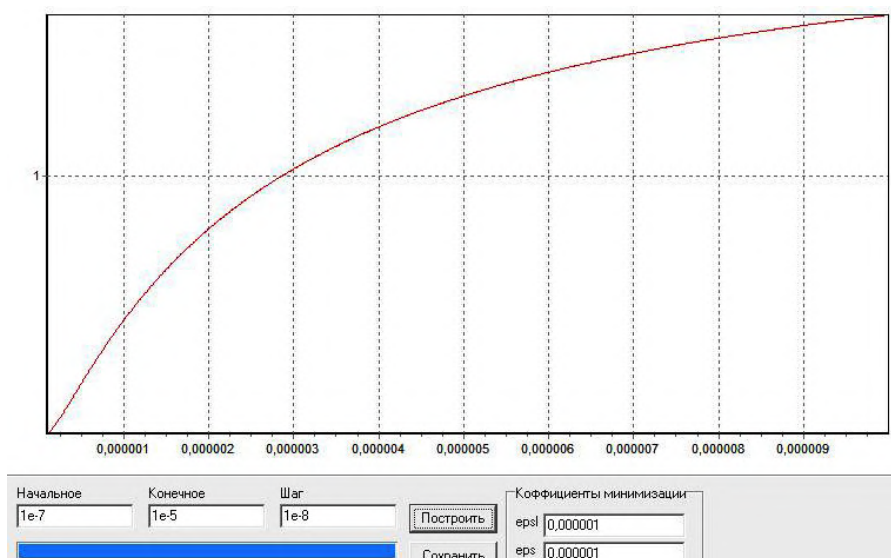


Рис. 4. Максимальные отличия дискретной модели от аналоговой в зависимости от  $\tau$

недостатков. Для повышения точности целесообразно использовать компенсационные методы с применением моделей — аналогов идентифицируемого объекта. Входное воздействие подается на идентифицируемый объект и его модель. Модель объекта с настраиваемыми параметрами подобна структуре реального объекта. Выходной сигнал объекта сравнивается с выходным сигналом модели, и в соответствии с критерием рассогласования осуществляется настройка параметров модели. Автоматическая настройка производится из условия минимума критерия рассогласования. Такая система является адаптивной и должна иметь устройства самонастройки. Недостаток информации об объекте компенсируется в результате настройки параметров модели объекта.

#### Библиографический список

1. Проскурин, О. А. Автоматизированные системы управления наружным освещением. Опыт Москвы / О. А. Проскурин // Энергосвет. — 2011. — № 2 (15) — С. 35.

2. Угреватов, А. Ю. АСУ наружным освещением города / А. Ю. Угреватов, В. Ю. Угреватов // Автоматизация в промышленности. — 2011. — № 9. — С. 16–18.

3. Семёнов, В. Энергосберегающая автоматизированная система управления наружным и архитектурно-художественным освещением / В. Семёнов // Современные технологии автоматизации (СТА). — 2010. — № 2. — С. 18–21.

4. Павлов, Н. Система управления наружным освещением автомобильных дорог Имеретинской низменности / Н. Павлов // Современные технологии автоматизации (СТА). — 2014. — № 3. — С. 66–69.

5. Мильх, А. В. Управление режимами освещения промышленных предприятий / А. В. Мильх, А. В. Никонов // Информационные технологии и автоматизация управления : материалы 6-й Всерос. науч.-практ. конф. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — С. 64–70.

6. Никонов, А. В. Аналоговая модель системы технологической подготовки производства / А. В. Никонов, Мясичев С. В. // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — № 2 (110). — 2012. — С. 245–250.

7. Sinha N. K., Kuszta B. Modeling and Identification of Dynamic Systems. — London, UK : Van Nostrand Reinhold, International Co. Ltd., 1983.

8. Landau Y. D. Adaptive Control. — The Model Reference Approach. — Marcel. New York, Dekker Inc., 1979.

9. Warwick K. Implementation of Self-tuning Controllers. — London, UK : Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1988. — 311 p.

10. Harris C. J., Billings S. A. Self Tuning and Adaptive Control: Theory and Application. — London, UK : Peregrinus on behalf of Institution of Electrical Engineers, 1985. — 362 p.

11. Astrom K. J., Wittenmark B. Adaptive Control. — Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

**НИКОНОВ Александр Васильевич**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

Адрес для переписки: nalva@mail.ru

**МИЛЫХ Александр Васильевич**, аспирант кафедры «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

Адрес для переписки: alex\_m.a.v@mail.ru

Статья поступила в редакцию 09.06.2015 г.

© А. В. Никонов, А. В. Милых

УДК 004.942

**И. М. ЗУГА**

Совет Федерации  
Федерального собрания РФ,  
г. Москва

## АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ СХЕМ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ В УСЛОВИЯХ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

Предложена система автоматизированного проектирования схем расположения объектов предприятий. Синтез схем ведется из условия оптимизации по ряду критериев качества в два этапа. В алгоритме системы предусмотрены три способа формирования начального решения: в интерактивном и автоматическом режимах. Разработано соответствующее программное обеспечение в среде Delphi 7.

**Ключевые слова:** взаиморасположение объектов, автоматизация проектирования схем, оптимизация.

Одними из основных показателей, с помощью которых можно оценивать качество размещения объектов производственных комплексов различных отраслей промышленности, являются затраты на реализацию (строительство, эксплуатацию) коммуникационных связей между объектами, площадь территории, занимаемой объектами, а также периметр и размеры в плане этой территории.

В настоящее время можно считать достаточно хорошо развитыми методы решения задач о назначении [1–3], когда места, на которых может быть размещено то или иное оборудование или производственный объект, заранее заданы и не могут быть изменены в ходе проектирования. Задачи о назначении в этом случае сводятся к проблеме рационального размещения  $n$ -го числа объектов на  $n$ -е число предварительно выделенных мест. Такие задачи решаются, как правило, методами целочисленного линейного программирования, в частности, методом «ветвей и границ» [4].

В данной работе для автоматизированного поиска оптимального по принятым критериям взаиморасположения объектов производственных комплексов предлагается иной подход, заключающийся в том, что такое (оптимальное) расположение опре-

деляется в ходе итерационных вычислений вне связи с какими-либо предварительно заданными, фиксированными местами. Для реализации этого подхода, по нашему мнению, наиболее целесообразно использовать методы нелинейного математического программирования [5].

В качестве критерия  $K_c(V)$ , отражающего с достаточной степенью точности затраты на реализацию коммуникационных связей между объектами, будем использовать сумму произведений некоторых удельных затрат на расстояние между центрами каждой пары геометрических образов объектов в плане (окружностей или прямоугольников) [6] (здесь:  $V$  — вектор координат  $x_i, y_i$  и  $x_j, y_j$  центров геометрических образов  $i$ -го и  $j$ -го объектов размерностью  $4n \times 1$  ( $V = (x_i, y_i, x_j, y_j)$ );  $n$  — число объектов рассматриваемой производственной структуры).

Координаты  $x$  и  $y$  центров геометрических образов  $i$ -го и  $j$ -го объектов являются в рассматриваемой оптимизационной задаче свободными параметрами синтеза.

Для оценки трех других показателей качества схем размещения объектов (площади, периметра и размеров занимаемой территории в плане) введем понятие выпуклого многоугольника,



охватывающего центры геометрических образов объектов.

Площадь территории, занимаемой производственным комплексом, можно характеризовать для целей оптимизации площадью выпуклого многоугольника  $K_f(V_M)$ , равной сумме площадей, составляющих его треугольников [7] (здесь:  $V_M$  — вектор координат  $x_m$  и  $y_m$  ( $m=1, \dots, M$ ) центров объектов, образующих выпуклый многоугольник:  $V_M = (x_{m'}, y_m)$ ;  $M$  — число треугольников в выпуклом многоугольнике).

В качестве критериев для минимизации периметра и размера занимаемой производственным комплексом территории примем соответственно периметр выпуклого многоугольника  $K_p(V_M)$  и расстояние  $K_g(V_L)$  между наиболее удаленными друг от друга центрами геометрических образов объектов [8, 9] (здесь:  $V_L$  — вектор координат  $x_i$  и  $y_i$  центров объектов, наиболее удаленных друг от друга. При разработке алгоритмов расчета критериев  $K_f(V_M)$ ,  $K_p(V_M)$  и  $K_g(V_L)$  следует иметь в виду, что на каждой вычислительной итерации выпуклый многоугольник могут образовывать центры геометрических образов различных объектов и количество  $M$  составляющих многоугольник треугольников может быть различно. Это обстоятельство приводит к тому, что оптимизация трех перечисленных выше критериев ведется в условиях переменного состава векторов  $V_M$  и  $V_L$  свободных параметров синтеза.

При проектировании схем производственных комплексов на свободные параметры синтеза  $x$  и  $y$  может быть наложен ряд ограничений, в частности, ограничения по регламентированным минимально допустимым расстояниям между объектами на просвет. Степень выполнения этих ограничений будем оценивать функцией штрафа  $S(V)$  [10].

Для автоматизации многокритериального оптимизационного синтеза схем расположения объектов производственных комплексов сформируем целевую функцию  $Z$  как линейную комбинацию критериальных функций  $K_c(V)$ ,  $K_f(V_M)$ ,  $K_p(V_M)$  и  $K_g(V_L)$  и функции штрафа  $S(V)$ :

$$Z = \frac{k_c}{k_{nc}} K_c(V) + \frac{k_f}{k_{nf}} K_f(V_M) + \frac{k_p}{k_{np}} K_p(V_M) + \frac{k_g}{k_{ng}} K_g(V) + pS(V),$$

где:  $k_c, k_f, k_p, k_g$  и  $k_{nc}, k_{nf}, k_{np}, k_{ng}$  — соответственно весовые и нормирующие коэффициенты критериальных функций;  $p$  — коэффициент, позволяющий регулировать влияние функции штрафа  $S(V)$  на рельеф целевой функции  $Z$  с целью улучшения сходимости вычислительного процесса.

Одной из особенностей методов нелинейного математического программирования является необходимость назначения начального решения, которое существенным образом влияет на скорость и на качество оптимизационного процесса. В данной работе предлагаются три варианта формирования начального приближения: как результат экспертных оценок проектировщиков, на основе автоматически сгенерированных случайных чисел или на основе пересчета случайных чисел в случайные направления.

В условия мультимодальности целевых функций первый из вариантов в принципе позволяет получить начальное приближение достаточно близкое к ожидаемому проектировщиком оптимальному

решению и тем самым обеспечить быструю сходимость вычислительного процесса.

Характерной особенностью второго варианта является то, что начальное приближение в соответствии с принятым подходом оптимизационного поиска назначается в первом квадранте в пределах нормализованного квадрата  $100 \times 100$  (для получения случайных чисел принимается интервал от 0 до 100 относительных единиц). При таком начальном расположении объектов дополнительные условия синтеза схем (регламентированные минимально допустимые расстояния между объектами на просвет), как правило, не выполняются и для их выполнения объекты в ходе оптимизации должны удаляться друг от друга.

В некоторых случаях, особенно при большом числе объектов, более эффективным оказывается начальное приближение, при котором все дополнительные условия заведомо выполняются с достаточным запасом. Это обеспечивает определенную гарантию более свободного движения (сближения) объектов в направлении их оптимального взаиморасположения. Для получения такого начального приближения используется третий вариант, при котором значения координат, полученные во втором варианте, пересчитываются определенным образом.

В частности, можно пересчитать их по следующим формулам:

$$x_i = (x_i^s - 50)k + 50; \quad y_i = (y_i^s - 50)k + 50,$$

где  $x_i^s$  и  $y_i^s$  — соответственно абсцисса и ордината центра  $i$ -го объекта, полученные для второго случая ( $i = 1, \dots, n$ );  $k$  — параметр смещения начального положения центров объектов.

При расчете начальных значений координат по приведенным формулам центры объектов, полученные для второго случая, перемещаются на  $k$  относительных единиц по лучу, направленному от точки с координатами (50; 50) как от центра и проходящему через точку с координатами  $x_i^s, y_i^s$ . Таким образом, для третьего способа расчета начальных значений свободных параметров второй способ играет роль начального этапа, на котором генерируются фактически случайные направления последующего смещения центров объектов. Значение коэффициента  $k$  итерационно устанавливается таким, чтобы ограничения на минимально допустимые расстояния между всеми парами объектов на просвет были выполнены. Коэффициент  $k$  можно использовать также для быстрой смены начального приближения.

Важно отметить: во всех трех случаях процесс поиска оптимального расположения объектов происходит в окрестностях нормализованного квадрата, что в последующем может обеспечить создание базы типовых решений.

Отметим, что, в отличие от первого варианта, второй и третий варианты могут дать некоторые оригинальные решения, выходящие за рамки привычных представлений разработчика.

Основной задачей при проектировании схем размещения объектов является задача поиска оптимального взаиморасположения объектов относительно друг друга.

Эту задачу целесообразно решать в локальной системе координат принятого нормализованного квадрата, а затем результаты решения пересчитать в систему координат, связанную с геодезическими отметками.

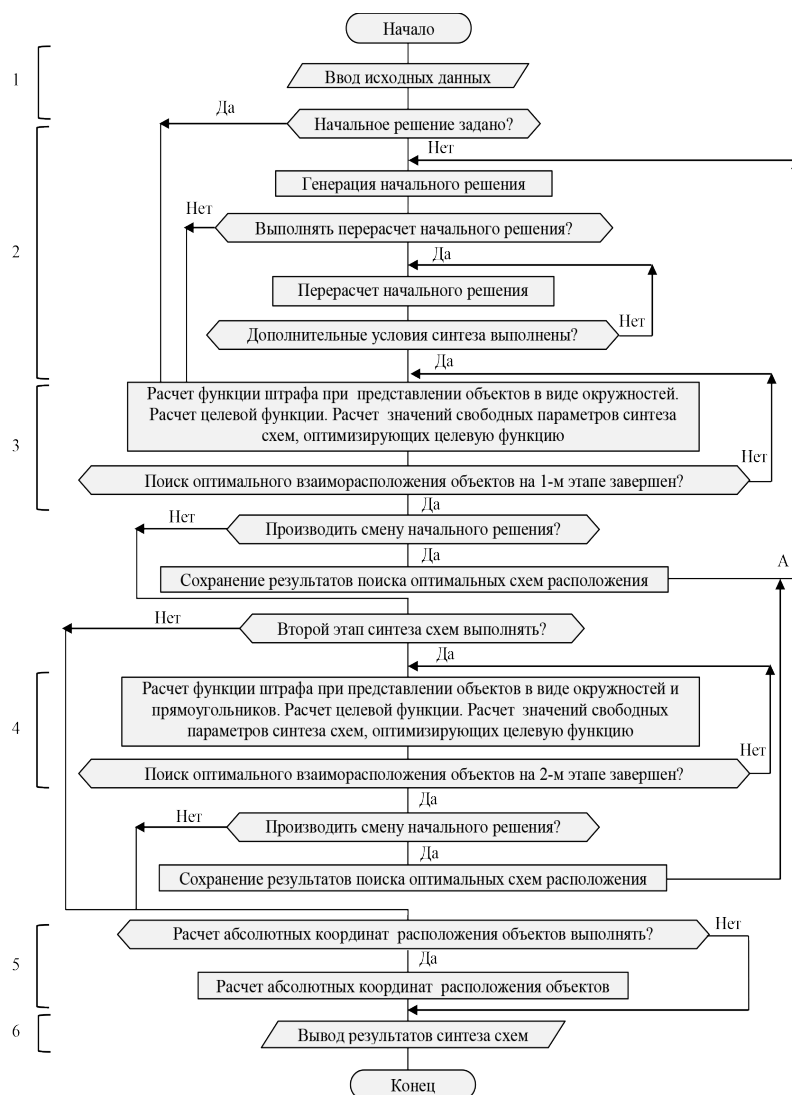


Рис. 1. Обобщенный алгоритм

Синтез схем в локальной системе координат с целью сокращения времени поиска и улучшения сходимости вычислительного процесса целесообразно вести в два этапа.

На первом этапе геометрические образы объектов в плане представляются окружностями, что существенно улучшает сходимость вычислительного процесса (за счет более гладкого рельефа целевой функции) и заметно сокращает время вычислений функции штрафа  $S(V)$ . На втором этапе оптимизационного синтеза схем в зависимости от формы контуров объектов в плане они представляются геометрическими образами в виде окружностей либо прямоугольников. Расчет функции штрафа на втором этапе алгоритмически сложнее и занимает большее время. Второй этап синтеза схем является, по сути, уточняющим, поэтому в некоторых случаях можно ограничиться выполнением первого этапа.

Переходы от локальных относительных координат к абсолютным геодезическим и от первого этапа синтеза схем ко второму можно выполнять как в автоматическом режиме, так и в диалоговом.

Для автоматизации проектирования схем расположения объектов в условиях многокритериальной оптимизации предлагается алгоритм, представленный в укрупненном виде на рис. 1. В алгоритме можно выделить шесть функциональных блоков.

В блоке 1 должны быть введены следующие основные исходные данные: габаритные размеры геометрических образов объектов в плане; удельные уровни коммуникационных затрат между каждой парой объектов; регламентированные минимально допустимые расстояния между объектами на проект; значения весовых и нормирующих коэффициентов; признаки прекращения процесса оптимизации. В случае если разработчик использует 1-й вариант формирования начального решения, то в этом блоке необходимо задать координаты центров объектов, назначенные экспертами. В этом блоке должны быть указаны также значения целого ряда ключей, выполняющих роль флагов при управлении вычислительным процессом.

В блоке 2 происходит формирование начального приближения с использованием генератора случайных чисел.

Блоки 3 и 4 осуществляют поиск оптимального взаиморасположения объектов на территории: блок 3 реализует 1-й этап оптимизации с использованием начального решения, принятого в блоках 1 или 2, а блок 2 — второй. Для блока 4 в качестве начального приближения выступают координаты центров объектов, полученные в блоке 3, что позволяет сохранить за блоком 4 статус блока, уточняющего решение, полученное в блоке 3.

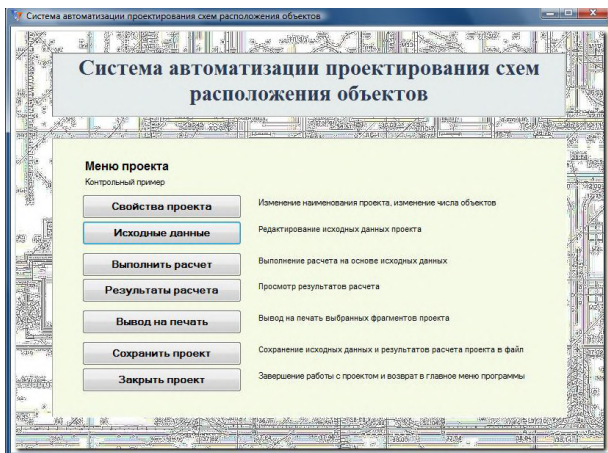


Рис. 2. Вид окна «Меню проекта»

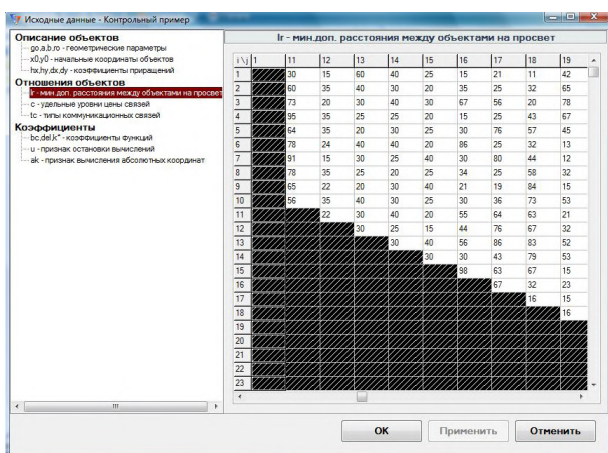


Рис. 3. Вид окна «Исходные данные» (строка «Мин. доп. расстояния между объектами на просвет»)

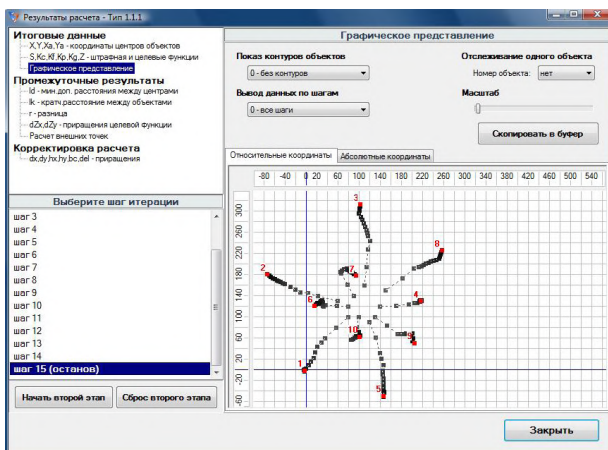


Рис. 4. Вид окна «Результаты расчета» (строка «Графическое представление») на 1-м этапе синтеза схем

В блоках оптимизации 3 и 4 может быть использован широкий набор методов нелинейного математического программирования.

В предлагаемой в данной работе системе автоматизированного поиска оптимизированных схем расположения объектов использован, как наиболее устойчивый и простой в реализации, градиентный.

Результаты, полученные как в блоке 3, так и в блоке 4, имеют самостоятельное значение и их вполне можно использовать при разработке генеральных планов в качестве рекомендаций лицу, принимающему решение. При получении удовлетворительного результата включается блок 5 и производится пересчет полученных в блоках 3 или 4 локальных (относительных) координат в абсолютные координаты, привязанные к геодезическим отметкам выделенной территории.

Блок 6 предназначен для вывода принятых для синтеза схем исходных данных и данных, полученных в ходе оптимизационного поиска, как в форме таблиц, так в графическом представлении.

Целевая функция  $Z$  является, как правило, мультимодальной, однако линейное выполнение (разовый проход) предложенного оптимизационного алгоритма, как показали вычислительные эксперименты, позволяет достаточно устойчиво находить локальные минимумы критериальных функций с вполне приемлемыми для дальнейшего проектирования генеральных планов результатами. В случае необходимости более подробного исследования рельефа критериальных (целевых) функций и повышения вероятности нахождения их глобального минимума в алгоритме (рис. 1) предусмотрена возможность многократной смены начального решения с использованием генератора случайных чисел (цикл А на рис. 1).

На основе предложенного в данной работе алгоритма в среде Delphi 7 разработано программное обеспечение системы автоматизированного поиска схем расположения объектов производственных комплексов, оптимальных по принятым критериям качества.

На рис. 2 представлено меню системы синтеза схем, содержащее семь кнопок управления вычислительным процессом. Поясним три основных.

В окне «Исходные данные» имеется три раздела опций (рис. 3): «Описание объектов», «Отношение объектов» и «Коэффициенты», позволяющие вводить все необходимые для синтеза схем параметры. На рис. 3 в качестве примера приведена таблица для ввода минимально допустимых расстояний между объектами (активирована опция в разделе «Отношение объектов»).

Окно «Результаты расчета» (рис. 4), содержащее также три раздела опций, дает возможность, во-первых, представлять в наглядной форме результаты вычислений, а во-вторых, корректировать при необходимости параметры, отвечающие за ход вычислительного процесса. На рис. 4 активирована опция «Графическое представление», позволяющая анализировать траекторию движения центров объектов в ходе вычислительного процесса от их начального положения к оптимизированному.

Использование предложенной в данной статье системы автоматизированного проектирования позволяет при сравнительно небольших затратах машинного времени получать семейство оптимизированных по принятым критериям схем расположения объектов, достаточное для формирования окончательного решения при разработке генеральных планов производственных комплексов.

#### Библиографический список

1. Козловский, В. А. Организационные и экономические вопросы построения производственных систем / В. А. Козловский. — Л. : ЛГУ, 1981. — 216 с.

2. Koopmans, T. C. Assignment Problems and the Location of Economic Activities / T. C. Koopmans, Beckman // *Econometrica*. — 1957. — Vol. 25, № 1. — P. 53–76.

3. Забудский, Г. Г. Алгоритм решения квадратичной задачи о назначениях с минимальными критериями на дереве / Г. Г. Забудский, А. Ю. Лагздин // *Динамика систем, механизмов и машин* : материалы VII Междунар. науч.-техн. конф., 10–12 ноября. — Омск, 2009. — Кн. 3. — С. 23–27.

4. Кафаров, В. В. Алгоритм оптимального размещения в объеме цеха с использованием метода ветвей и границ / В. В. Кафаров, В. П. Мешалкин, Б. Б. Богомолов // *Теоретические основы химической технологии*. — 1982. — № 1. — С. 83–89.

5. Бояринов, А. И. Методы оптимизации в химической технологии / А. И. Бояринов, В. В. Кафаров. — М. : Химия, 1975. — 576 с.

6. Зуга, И. М. Автоматизированное проектирование схем размещения объектов предприятий из условия минимизации коммуникационных затрат / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко // *Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии*. — 2009. — № 3 (83). — С. 96–99.

7. Зуга, И. М. Автоматизированное проектирование схем размещения объектов предприятий из условия минимизации занимаемой ими площади / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко // *Ом-*

*ский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии*. — 2011. — № 2 (90). — С. 163–167.

8. Зуга, И. М. Проектирование схем размещения объектов из условия минимизации периметра занимаемой ими территории / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко ; ОмГТУ. — Омск, 2009. — 8 с. — Деп. в ВИНТИ 13.05.2009, № 348-B2009.

9. Зуга, И. М. Проектирование схем размещения объектов из условия минимизации габаритных размеров занимаемой территории / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко ; ОмГТУ. — Омск, 2009. — 7 с. — Деп. в ВИНТИ 13.05.2009, № 425-B2009.

10. Зуга, И. М. Формирование функции штрафа при автоматизированном проектировании схем расположения объектов производственных комплексов / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко // *Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии*. — 2013. — № 1 (117). — С. 114–118.

**ЗУГА Игорь Михайлович**, кандидат технических наук, член Совета Федерации Федерального собрания Российской Федерации.

Адрес для переписки: zugaim.2012@gmail.com

Статья поступила в редакцию 10.09.2015 г.

© И. М. Зуга

УДК 004.942

**И. М. ЗУГА  
В. Г. ХОМЧЕНКО**

**Совет Федерации  
Федерального собрания РФ,  
г. Москва**

**Омский государственный  
технический университет**

## АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ РАСЧЕТ РАССТОЯНИЙ МЕЖДУ ОБЪЕКТАМИ НА ПРОСВЕТ С УЧЕТОМ ИХ МНОГОВАРИАНТНОГО ВЗАИМОРАСПОЛОЖЕНИЯ

Применительно к принятым геометрическим образам объектов в плане определены формы подобластей, запрещенных для расположения в них центра другого объекта из рассматриваемой пары объектов. Получены алгоритмы автоматизированного расчета фактических расстояний между объектами на просвет с учетом сочетаний геометрических образов объектов рассматриваемой пары и их взаимного расположения.

**Ключевые слова:** запрещенные подобласти, многовариантность взаиморасположения объектов, алгоритмы расчета расстояний.

Одними из основных дополнительных условий синтеза схем расположения объектов предприятий по тому или иному критерию качества являются регламентированные минимально допустимые расстояния на просвет между этими объектами [1–4].

При учете таких дополнительных условий необходимо иметь в виду ряд характерных особенностей области возможных значений свободных параметров синтеза.

Свободными параметрами синтеза схем расположения объектов производственных комплексов являются координаты  $x_i$  и  $y_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) центров этих объектов [1–4] (здесь:  $n$  — число объектов).

Как правило, области возможных значений свободных параметров лежат в некотором диапазоне

$$u_{1\min}(U_{-i}) \leq u_i \leq u_{1\max}(U_{-i}), \quad (1)$$

где  $u_{1\min}$  и  $u_{1\max}$  — минимальное и максимальное

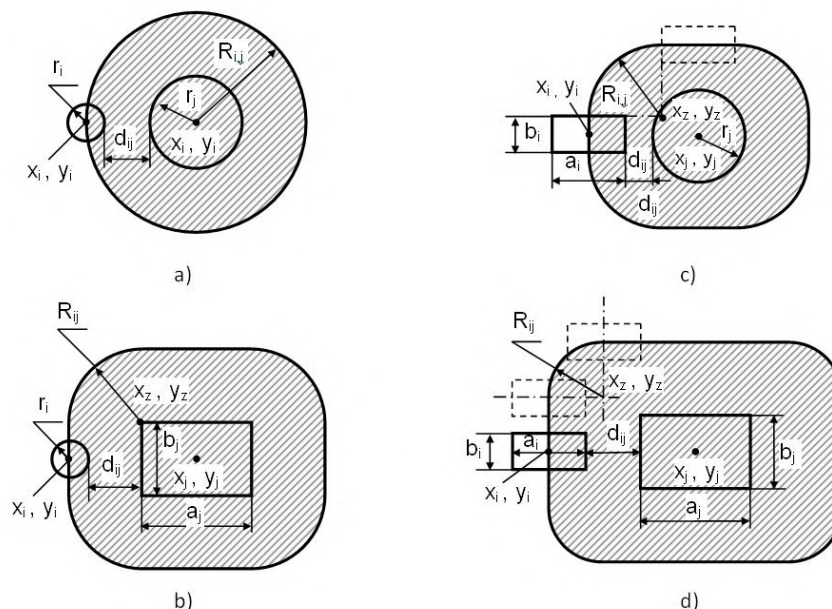


Рис. 1. Подобласти  $s_j$ , запрещенные для расположения центра  $i$ -го объекта

значения  $i$ -го свободного параметра  $u_i$  ( $u_i = x_i, y_i$ );  $U_{-i}$  — вектор свободных параметров синтеза без параметра  $u_i$ . Как видно из зависимости (1), границы диапазона допустимых значений параметра  $u_i$  являются в общем случае переменными и представляют собой некоторые функции остальных свободных параметров. Так как все свободные параметры в данном случае имеют одну природу и являются координатами центров геометрических образов объектов (окружностей или прямоугольников), то при синтезе схем расположения объектов  $2n$ -мерное гиперпространство свободных параметров можно трансформировать в двумерное и рассматривать в дальнейшем в декартовой системе координат. Это позволяет выделить на плоскости совокупность  $S_i$  подобластей  $s_i$  ( $U_{-i}$ ), запрещенных для расположения центра геометрического образа  $i$ -го объекта относительно центра геометрического образа  $j$ -го и образованных некоторыми эквидистантами (в сочетаниях « $i$ -окружность —  $j$ -окружность» и « $i$ -окружность —  $j$ -прямоугольник») или псевдоэквидистантами (в сочетаниях « $i$ -прямоугольник —  $j$ -окружность» и « $i$ -прямоугольник —  $j$ -прямоугольник»).

Подобласть  $s_j$  для сочетания « $i$ -окружность —  $j$ -окружность» представляет собой площадь круга (рис. 1а) с радиусом

$$R_{ij} = r_j + d_{ij} + r_i,$$

проведенным из центра с координатами  $x_j, y_j$  (здесь  $r_i$  и  $r_j$  — радиусы соответственно геометрических образов  $i$ -го и  $j$ -го объектов,  $d_{ij}$  — регламентированное минимально допустимое расстояние на просвет между  $i$ -м и  $j$ -м объектами).

Для сочетания « $i$ -окружность —  $j$ -прямоугольник» (рис. 1б) запрещенная для центра  $i$ -го объекта подобласть ограничивается эквидистантой, очерченной на расстоянии

$$d_{ij} + r_i$$

от контура геометрического образа  $j$ -го объекта.

В сочетаниях « $i$ -прямоугольник —  $j$ -окружность» и « $i$ -прямоугольник —  $j$ -прямоугольник» запрещен-

ные площади очерчиваются линиями, названными в данной работе псевдоэквидистантами, представляющими собой сопряженные участки эквидистант, проведенных на отдельных участках на различных расстояниях от контура геометрического образа  $j$ -го объекта.

Для сочетаний « $i$ -прямоугольник —  $j$ -окружность» (рис. 1с) и « $i$ -прямоугольник —  $j$ -прямоугольник» (рис. 1д) псевдоэквидистанта пройдет слева и справа от геометрического образа  $j$ -го объекта на расстоянии  $d_{ij} + a_j$ , а сверху и снизу — на расстоянии  $d_{ij} + b_j$ . Слева сверху и внизу и справа сверху и внизу эквидистанты для первого из названных сочетаний проводятся радиусом  $R_{ij} = r_j + d_{ij}$  из центров с координатами (выбор знаков ясен из соответствующих рисунков):

$$x_z = x_j \pm 0,5a_j; \quad y_z = y_j \pm 0,5b_j,$$

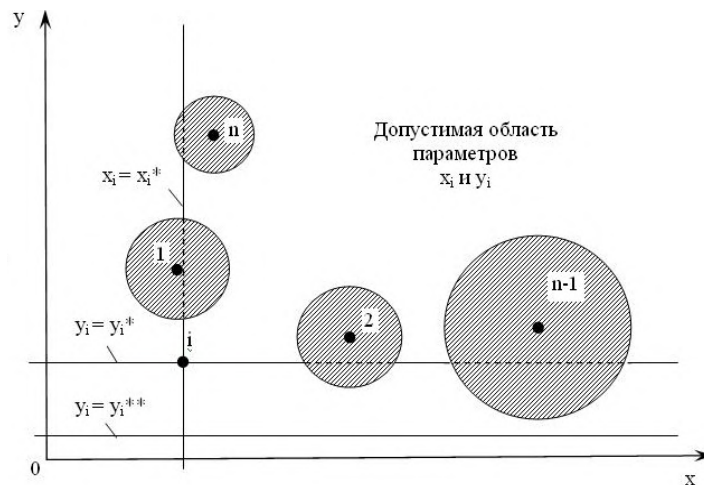
а для второго — радиусом  $R_{ij} = d_{ij}$  из центров с координатами:

$$x_z = x_j \pm 0,5a_j \pm 0,5a_j; \quad y_z = y_j \pm 0,5b_j \pm 0,5b_j,$$

здесь  $a_k$  и  $b_k$  ( $k = i, j$ ) представляют собой размеры геометрических образов объектов в направлении осей соответственно абсцисс и ординат.

Таким образом, для каждого  $i$ -го объекта в окрестностях  $j$ -го объекта формируется область, запрещенная для расположения на ее площади центра  $i$ -го объекта. Очертание этой области зависит как от формы  $i$ -го объекта, так и от формы  $j$ -го (рис. 1).

В отличие от общего случая, описываемого зависимостью (1), при проектировании схем расположения объектов области возможных значений свободных параметров могут — при фиксированных значениях других параметров — не быть сплошными, а представлять собой отрезки на линиях параллельных осям локальной плоской системы координат ХОУ, заключенные между запрещенными для этого параметра подобластями  $s_j$  ( $U_{-i}$ ) других объектов (рис. 2). (На рис. 2 для упрощения приведено со-

Рис. 2. Допустимая область для центра  $i$ -го объекта

четание « $i$ -окружность –  $j$ -окружность».) На рис. 2 допустимые для параметров  $x_i$  и  $y_i$  отрезки на прямых соответственно  $y_i = y_i^*$  и  $x_i = x_i^*$  при поочередном фиксировании значений каждого из этих параметров показаны сплошными линиями. При некоторых сочетаниях значений одних свободных параметров ограничения на значения ряда других свободных параметров могут не действовать (например, подобласти 1-го и  $n$ -го объектов на параметр  $x_i$  при  $y_i = y_i^{**}$  на рис. 2).

В такой интерпретации возможная область расположения центра  $i$ -го объекта будет представлять собой теоретически всю координатную плоскость XOY с исключением из нее площадей, очерченных описанными выше эквидистантами или псевдоэквидистантами (на рис. 2 эти площади заштрихованы).

Таким образом, при каждом текущем расположении центров объектов центр каждого  $i$ -го объекта в ходе итераций будет иметь свою особую допустимую область, в которой он может находиться.

Дальнейшее исследование областей допустимого размещения центров объектов сводится к выявлению возможных вариантов взаиморасположений подобластей  $s_j$  ( $U_j$ ) в плоской системе координат XOY, запрещенных для центра одного определенного объекта. В целом  $2n$ -мерная допустимая область расположения центров всех  $n$  объектов представляет собой достаточно сложное сочетание частных допустимых областей (допустимых областей центра каждого  $i$ -го объекта), трудно представимых графически.

В статье [5] предложен алгоритм, являющийся головным модулем при формировании функции штрафа и обеспечивающий, по сути, диспетчирование вычислительного процесса по признаку  $g_0$ , отражающему геометрический образ  $i$ -го или  $j$ -го объекта в плане:  $g_0 = 0$ , если объект представляется в виде окружности;  $g_0 = 1$ , — если в виде прямоугольника.

Так как каждый объект очередной рассматриваемой пары может быть представлен либо окружностью, либо прямоугольником, то возможно, как отмечалось, четыре сочетания видов геометрических образов [4], а именно: сочетания 1, 2, 3 и 4 соответственно « $i$ -окружность –  $j$ -окружность», « $i$ -окружность –  $j$ -прямоугольник», « $i$ -прямоугольник –  $j$ -окружность» и « $i$ -прямоугольник –  $j$ -прямоугольник».

В связи с этим роль основной части головного модуля алгоритма [5] расчета функции штрафа

при автоматизированном проектировании схем расположения объектов заключается в распознавании сочетаний геометрических образов  $i$ -го и  $j$ -го объектов, образующих очередную пару объектов, и в обращении к соответствующей дополнительной подпрограмме L1, L2, L3 или L4 расчета фактических расстояний  $l_{ij}$  между объектами на просвет.

В данной статье для расчета фактических расстояний  $l_{ij}$  между объектами на просвет разработаны алгоритмы дополнительных подпрограмм L2, L3 и L4, обслуживающих соответственно сочетания 2, 3 и 4 (рис. 3–5).

Опишем алгоритмы, необходимые для разработки упомянутых дополнительных вычислительных подпрограмм.

Алгоритмы подпрограмм L2–L4 (рис. 3–5) структурно во многом однотипны — их назначение сводится к выделению на логическом уровне областей расположения  $j$ -го объекта относительно  $i$ -го ( $i = 1, \dots, n-1$ ;  $j = i+1, \dots, n$ ) и к расчету по формулам, соответствующим этим областям, расстояний  $l_{ij}$ . Наполнение операторов этих алгоритмов, как видно из рис. 3, 4 и 5, различно. Операторы «Решение» содержат неравенства, позволяющие определять область (одну из восьми в сочетании «окружность – прямоугольник» и одну из девяти в сочетаниях «прямоугольник – окружность» и «прямоугольник – прямоугольник») [1]. Обозначения  $X1_k$ ,  $Y1_k$  и  $X3_k$ ,  $Y3_k$  ( $k = i, j$ ) в блок-схемах алгоритмов (рис. 2–4) представляют собой координаты соответственно 1-й и 3-й вершин  $i$ -го и  $j$ -го прямоугольников [1] при обходе прямоугольников против часовой стрелки, начиная с нижней левой вершины.

Операторы  $L_{mp}$  во всех дополнительных алгоритмах (рис. 2–4) есть аналитические зависимости для расчета фактических расстояний между  $i$ -м и  $j$ -м объектами на просвет, полученные в работе [1]. Первый индекс  $m$  символа  $L$  соответствует номеру сочетания ( $m = 2, 3, 4$ ) геометрических образов объектов, а второй  $p$  — номеру области ( $p = 1, \dots, 8$  для сочетания 2 и  $p = 1, \dots, 9$  для сочетаний 3 и 4), в которой находится  $j$ -й объект относительно  $i$ -го.

Заметим, что расчет фактического расстояния  $l_{ij}$  для сочетания 1 « $i$ -окружность –  $j$ -окружность» ( $g_0 = 0$ ,  $g_0 = 0$ ) в головном модуле [5] выделен в отдельную подпрограмму L1 из методических соображений, так как для этого случая достаточно воспользоваться формулой:

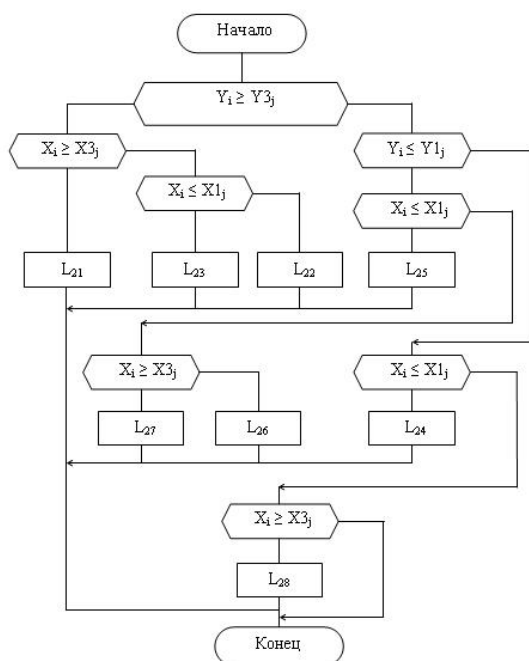


Рис. 3. Блок-схема алгоритма подпрограммы L2

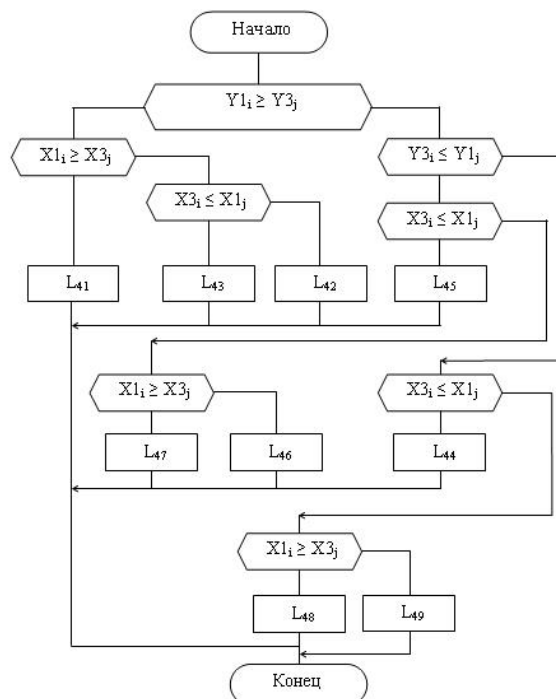


Рис. 5. Блок-схема алгоритма подпрограммы L4

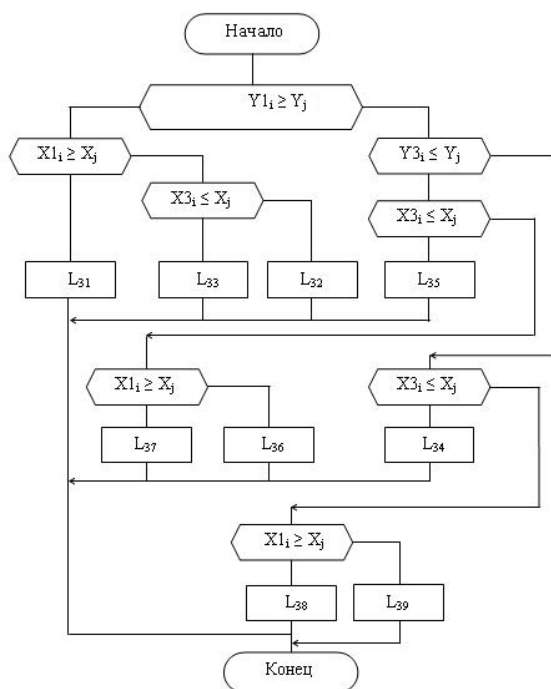


Рис. 4. Блок-схема алгоритма подпрограммы L3

$$l_{ij} = ((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2)^{0.5} - r_i - r_j$$

которая должна быть вписана в головном модуле вместо символа L1 (здесь:  $x_i, y_i, r_i$  и  $x_j, y_j, r_j$  — соответственно координаты центров и радиусы окружностей, представляющих  $i$ -й и  $j$ -й объекты).

Необходимые для работы подпрограмм, соответствующих алгоритмам L2 — L4, значения координат  $XR_k$  и  $YR_k$  ( $R = 1, \dots, 4; k = i, j$ ) вершин прямоугольников, представляющих геометрические образы объектов, рассчитываются в головном модуле по формулам:

$$XR_k = x_k \pm 0,5a_k; \quad (2)$$

$$YR_k = y_k \pm 0,5b_k. \quad (3)$$

В зависимости (2) верхний знак удерживается для 2-й и 3-й вершин ( $R=2; 3$ ) четырехугольника, а в зависимости (3) — для 1-й и 4-й ( $R=1; 4$ ). В остальных случаях используется знак минус.

Следует заметить, что координаты  $x_k$  и  $y_k$  ( $k = i, j$ ) центров геометрических образов объектов рассчитываются в общей программе оптимизационного синтеза схем расположения объектов [6].

На основе выделенных в пространстве свободных параметров подобластей, запрещенных для расположения в них центра одного объекта относительно контура другого, предложены дополнительные алгоритмы, достаточные для разработки вычислительных подпрограмм автоматизированного расчета функции штрафа при любом сочетании геометрических образов объектов и при любом их расположении относительно друг друга в ходе оптимизационного синтеза схем расположения объектов производственных комплексов в автоматическом режиме.

#### Библиографический список

1. Зуга, И. М. Автоматизированное проектирование схем размещения объектов предприятий из условия минимизации занимаемой ими площади / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2011. — № 2 (90). — С. 163–167.
2. Зуга, И. М. Автоматизированное проектирование схем размещения объектов предприятий из условия минимизации коммуникационных затрат / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2009. — № 3 (83). — С. 96–99.
3. Зуга, И. М. Разработка системы автоматизированного проектирования схем расположения объектов промышленных предприятий / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко; ОмГТУ. — Омск, 2011. — 17 с. — Деп. в ВИНТИ 06.03.2011, № 110-B2011.

4. Зуга, И. М. Формирование функции штрафа при автоматизированном проектировании схем расположения объектов производственных комплексов / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — №1 (117). — С. 114–118.

5. Зуга, И. М. Алгоритм формирования функции штрафа при автоматизированном проектировании схем расположения объектов производственных комплексов / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко ; ОмГТУ // Динамика систем, механизмов и машин : материалы IX Междунар. науч.-техн. конф. — Омск, 2014. — Кн. 3. — С. 176–178.

6. Зуга, И. М. Разработка системы автоматизированного проектирования схем расположения объектов промышленных предприятий / И. М. Зуга, В. Г. Хомченко. — Омск, 2011. — 17 с. — Деп. в ВИНТИ 06.03.2011, №110-B2011.

**ЗУГА Игорь Михайлович**, кандидат технических наук, член Совета Федерации Федерального собрания Российской Федерации.

Адрес для переписки: zugaim.2012@gmail.com

**ХОМЧЕНКО Василий Герасимович**, доктор технических наук, профессор (Россия), заведующий кафедрой «Автоматизация и робототехника».

Адрес для переписки: v\_khomchenko@mail.ru

Статья поступила в редакцию 02.06.2015 г.

© И. М. Зуга, В. Г. Хомченко

УДК 681.3

**А. М. ПУРТОВ**

Омский филиал Института математики СО РАН

## МЕТОДЫ И СРЕДСТВА АНАЛИЗА АВТОТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ В GISAUTO

Разработаны способы применения таксономии, редукции графов, имитационного моделирования и методов геоинформационных систем для анализа влияния задержек на время прохождения маршрутов в автотранспортных сетях. Технология демонстрируется на примере анализа популярного маршрута г. Омска. Приведен пример построения ГИС-карты графа задержек на маршруте. Методом редукции графов получены оценки влияния задержек на время прохождения маршрута. Приведены примеры использования разработанных методов и средств.

**Ключевые слова:** геоинформационная система, имитационное моделирование, редукция графов, таксономия, анализ данных, автотранспортные сети.

*Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 12-07-00149-а.*

**Введение.** Увеличение потоков автомобилей в крупных городах приводит к перегрузке автотранспортных сетей. Поэтому задачи анализа и организации автодорожного движения становятся все более актуальными. Современные компьютерные технологии и математические методы имеют большие возможности для решения задач анализа сложных систем. Интеграция различных методов и средств позволяет с разных сторон оценить возникающие проблемы. Создаваемая автором система GisAuto ориентирована на анализ задержек при прохождении автомобилями различных участков транспортной сети. В GisAuto используются методы геоинформационных систем (ГИС), математические методы, в частности, методы редукции графов, таксономии, имитационного моделирования. Статья является обобщением публикаций по отдельным этапам создания GisAuto [1–3]. Суть разрабатываемой технологии можно отобразить следующими этапами.

1. Построение ГИС-модели задержек на основных маршрутах города.

Задержки происходят на перекрестках, светофорах, пешеходных переходах.

2. Построение на ГИС-карте графов исследуемых маршрутов.

3. Сбор данных о задержках.

На этом этапе могут быть использованы экспертные, расчетные оценки, результаты наблюдений, имитационного моделирования.

4. Анализ маршрутов методом редукции графов.

В результате получаются коэффициенты, показывающие влияние каждой задержки на общую задержку при прохождении маршрута.

5. Раскраска задержек (вершин графа) на ГИС-карте в зависимости от их значимости.

6. Анализ полученных результатов.

Выявление задержек и участков, оказывающих наибольшее влияние на время прохождения маршрута.

7. Микроанализ проблемных участков (дополнительные наблюдения, имитационное моделирование).

**1. Построение ГИС-модели задержек и графов маршрутов.** ГИС-модель задержек на дорогах разрабатывается с целью предоставления первичных данных для анализа транспортных сетей различными методами (аналитическое и имитационное моделирование, геоанализ). Подробно ГИС-модель задержек и построение графов маршрутов описаны в [1]. Основными объектами модели являются задержки и участки дорог. Выделены следующие типы задержек: перекресток, светофор, пешеходный переход. Остановки пассажирского





Рис. 1. ГИС-карта задержек и граф маршрута

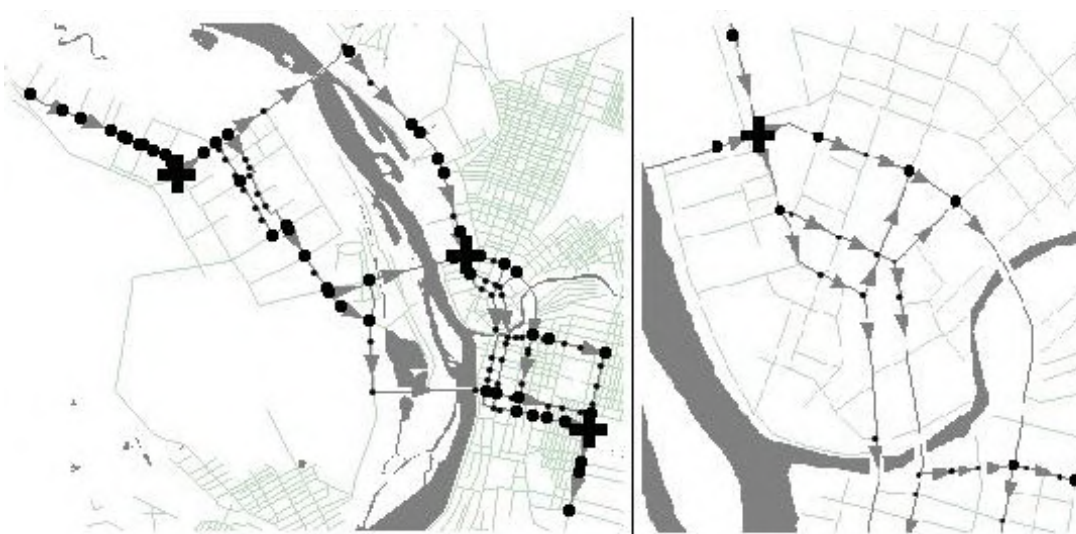


Рис. 2. Коэффициенты значимости задержек на маршруте

транспорта в модели не учитываются. Если на переходе имеется светофор, задержка перед ним относится к типу «светофор». Участки дорог соединяют задержки. На основе ГИС-модели задержек строятся графы маршрутов. Для перемещения между двумя точками могут использоваться разные пути. На основе множества основных путей получается граф маршрута. В левой части рис. 1 показаны основные задержки на дорогах г. Омска. В правой части рис. 1 показан граф одного из популярных маршрутов г. Омска (п. Солнечный – завод Баранова). ГИС-модель задержек и граф маршрута реализованы средствами пакета GIS ArcView 3.0.

**2. Анализ маршрутов методами ГИС и редукции графов.** Редукция заключается в свертке (последовательном упрощении) графа с помощью замен фрагментов графа упрощающими подстановками. Суть метода, подробно описанного в [1], заключается в следующем.

Оценки математического ожидания времени ( $T_i$ ) и дисперсии ( $D_i$ ) задержек, вероятностей выбора в узлах путей следования ( $P_{ij}$ ) задаются на входе программы редукции графов. На выходе программы получаются значения средней задержки при прохождении маршрута ( $T$ ), дисперсии  $T^2(D)$ , коэффициентов чувствительности  $T$  и  $D$  к параме-

трам задержек и вероятностям переходов (десять коэффициентов). Наиболее простую и физически объяснимую интерпретацию имеют абсолютный коэффициент чувствительности  $T$  к  $T_i$  ( $Ka[T, T_i]$ ) и относительный коэффициент чувствительности  $T$  к  $T_i$  ( $Kb[T, T_i]$ ). Дело в том, что при предположении о независимости параметров исходного графа,  $Ka[T, T_i]$  представляет собой частную производную  $T$  по  $T_i$ , интерпретируемую как вероятность реализации задержки  $T_i$  при прохождении маршрута. Выполняется равенство:

$$T = \sum Ka[T, T_i] T_i$$

Разделив обе части равенства на  $T$ , получаем сумму  $Kb[T, T_i]$ , равную 1. Таким образом, коэффициент  $Kb[T, T_i]$  показывает в долях от 1 вклад задержки  $T_i$  в общую задержку  $T$ . Учитывая свойства  $Kb[T, T_i]$ , будем называть его коэффициентом значимости задержки. Другие коэффициенты чувствительности не имеют такой простой интерпретации. Тем не менее они иногда оказываются полезными для оценки влияния параметров  $T_i$ ,  $D_i$ ,  $P_{ij}$  на  $T$  и  $D$ .

Целью анализа является сравнительная оценка величин задержек и вероятностей выбора участков дорог с точки зрения степени их влияния на общую

задержку при прохождении маршрута. Для достижения цели выполняются следующие действия.

1. Выбирается точка А (первая задержка на маршруте) и точка Б (последняя задержка на маршруте).

2. На ГИС-карте задержек выбираются те задержки и участки дорог, по которым обычно движется автотранспорт из точки А в точку Б (маршрут АБ).

3. Средствами GIS ArcView автоматически создаются слой задержек и слой участков дорог, относящихся к маршруту АБ. Слои отображаются на ГИС-карте. В результате получается граф маршрута АБ (рис. 1).

4. Определяются (различными доступными методами) и записываются в базу данных оценки исходных параметров графа  $T_i$ ,  $D_i$ ,  $P_{ij}$ .

5. Исходные параметры графа подаются на вход программы редукции графов.

6. На выходе программы редукции графов получаются оценки параметров  $T$ ,  $D$  и значения коэффициентов чувствительности.

7. Выбираются интересные для исследователя коэффициенты чувствительности. Создаются слои, на которых задержки и участки дорог изображаются в зависимости от значений соответствующих коэффициентов чувствительности.

8. Проводится геоанализ по всем полученным результатам (по результатам одного или нескольких экспериментов, по результатам анализа одного или нескольких маршрутов).

9. Результаты анализа представляются для обсуждения и принятия решений.

На рис. 2 показаны результаты анализа графа, представленного на рис. 1. Задержки изображены в зависимости от значения коэффициента  $Kb[T, T_i]$ . В левой части рисунка показан весь маршрут, в правой части изображена центральная часть г. Омска. Как выше было сказано,  $Kb[T, T_i]$  в долях от единицы показывает вклад задержки в общее время прохождения маршрута.

На рис. 2 чем больше коэффициент, тем крупнее точка (данные разбиты на 3 категории). Кресты показывают задержки, оказывающие наибольшее влияние на время прохождения маршрута. Рисунок на уровне города наглядно показывает степень влияния каждой из задержек на общую задержку при прохождении маршрута

**3. Использование таксономии для анализа задержек.** По классификации задач анализа данных, предложенной Н. Г. Загоруйко [4], таксономия

(классификация, кластеризация, категоризация) заключается в разделении «объектов по схожести их свойств».

При этом в шкале наименований каждая группа похожих объектов как-то обозначается. В настоящее время нет универсального алгоритма автоматической таксономии, который мог бы составить реальную конкуренцию человеческой способности к обобщению. Поэтому для таксономии в GisAuto используются автоматическая таксономия и предложенный автором статьи метод визуальной таксономии средствами ГИС [2].

Для автоматической таксономии студенткой СибАДИ Охотниковой К. В. при выполнении дипломной работы создана в среде C++ Builder программа, реализующая алгоритмы FOREL, FOREL2, KOLAPS [4]. В статье приведены результаты использования визуальной таксономии и алгоритма FOREL2, суть которого заключается в следующем.

В алгоритме FOREL2 таксоны имеют форму гиперсферы (два параметра-круг, три параметра-шар). Параметры объектов считаются их координатами в  $n$ -мерном пространстве. Параметры нормируются, приводятся в единый диапазон, например, от 0 до 1. Считается, что чем больше объекты похожи друг на друга, тем ближе расположены в пространстве соответствующие им точки. Тогда задача таксономии состоит в том, чтобы выявить ступки точек и объединить их в подмножества с похожими параметрами. В алгоритме FOREL2 на входе задается ограничение на допустимое количество таксонов, максимальный и минимальный радиусы гиперсферы. Оптимальным считается то разбиение, при котором минимальна сумма расстояний точек до центров таксонов.

При визуальной таксономии выбирается пара параметров объектов. Нормированные параметры считаются координатами объектов на плоскости. Средствами ГИС с помощью геометрических фигур произвольной формы (круг, прямоугольник, многоугольник), используя выбранные критерии, точки, соответствующие объектам, объединяются в таксоны.

Основное преимущество автоматической таксономии по сравнению с визуальной заключается в возможности выявления схожести объектов в  $n$ -мерном пространстве. Кроме ограниченности двумерным представлением параметров, к недостаткам визуальной таксономии можно отнести субъективизм разбиения на таксоны. С другой стороны, визуальная таксономия имеет следующие преимущества по сравнению с автоматической:

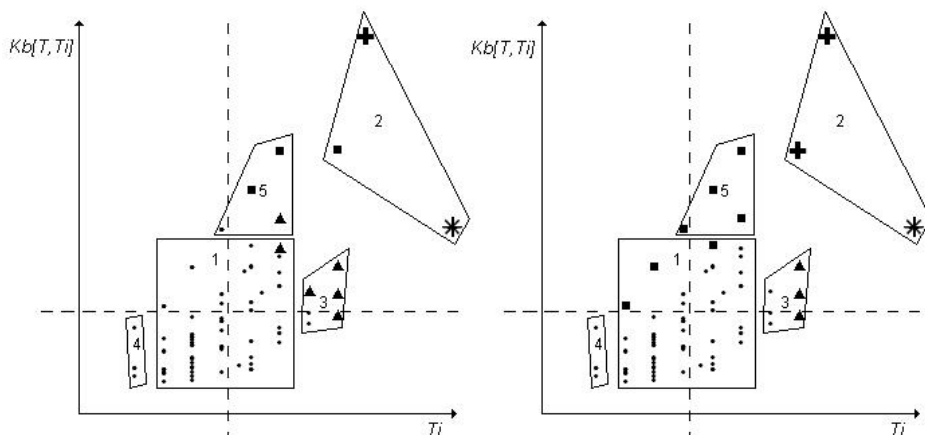


Рис. 3. Визуальная и автоматическая таксономии

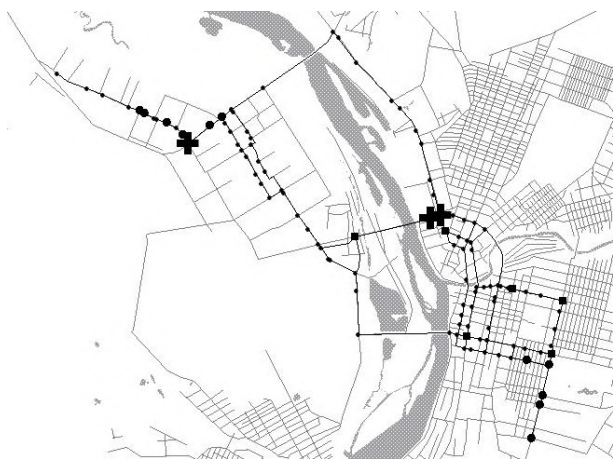


Рис. 4. Изображение результатов таксономии на графе маршрута

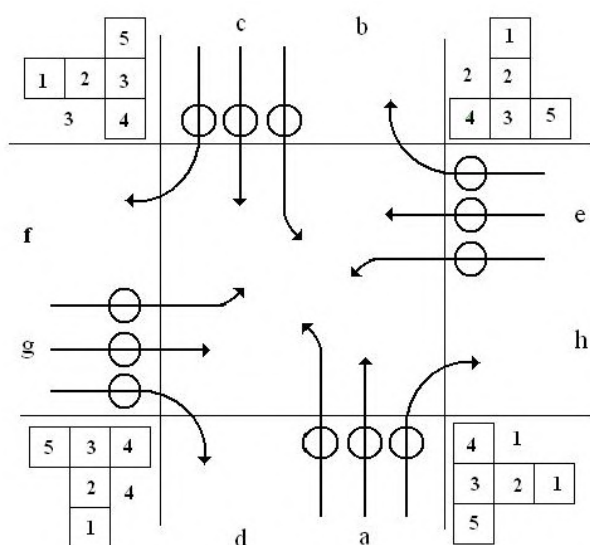


Рис. 5. Модель перекрестка

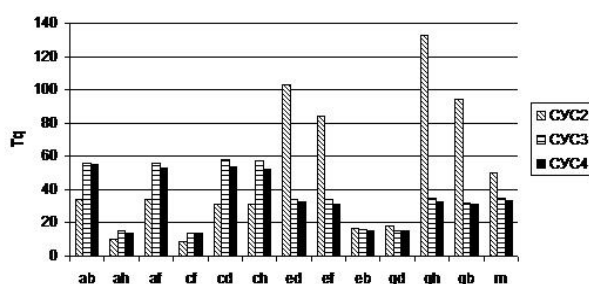


Рис. 6. Сравнение СУС при больших интенсивностях

— возможность использования эвристических процедур при разбиении на таксоны;

— быстрый переход от одних критериев классификации к другим;

— более простая и логичная интерпретация результатов таксономии.

На рис. 3 представлено визуальное и автоматическое разбиение задержек на таксоны. Пунктирные линии обозначают вычисленные средние арифметические значения параметров задержек  $T_i$  и  $Kb[T, T_i]$ . Визуальное разбиение на таксоны по-

казано геометрическими фигурами. При разбиении использовались критерии близости (кучности, похожести) и величины отклонения от среднего. Использование средних значений упрощает интерпретацию результатов. Например, в первый таксон попали задержки со средними значениями параметров, во втором таксоне задержки с высокими значениями параметров, в третьем таксоне задержки с высоким значением  $T_i$  и средним значением  $Kb[T, T_i]$ . Таксон 3 показывает, что не все большие задержки существенно влияют на время прохождения маршрута. Это из-за малой вероятности реализации этих задержек.

Результаты автоматической таксономии по алгоритму FOREL2 показаны с помощью разной формы точек. Точки, попавшие в разные таксоны, имеют разную форму. Например, мелкие точки попали в один таксон, треугольники в другой. Видно хорошее совпадение результатов визуальной и автоматической таксономии.

Возник вопрос о том, как изменятся результаты таксономии, если обработать алгоритмом FOREL2 три параметра. На вход программы таксономии были поданы значения параметров  $T_i$ ,  $Kb[T, T_i]$  и  $Ka[T, T_i]$ . В правой части рис. 3 показаны результаты таксономии в плоскости параметров  $T_i$  и  $Kb[T, T_i]$ . Для удобства сравнения геометрические фигуры левой части рисунка воспроизведены в правой. В результате учета параметра  $Ka[T, T_i]$  в число влияющих добавились три задержки (обозначенных квадратами), имеющих высокую вероятность реализации.

На основе результатов, представленных на рис. 3, можно сделать выводы:

— в рассматриваемом случае визуальная таксономия мало отличается от автоматической;

— таксономия по двум параметрам мало отличается от таксономии по трем параметрам.

На рис. 4 показано изображение задержек на маршруте в зависимости от номера таксона, в который они попали при визуальной таксономии. Кресты и крупные точки показывают наиболее значимые задержки (таксоны 2 и 5). Квадраты (таксон 3) иллюстрируют задержки с большим  $T_i$ , но редко реализуемые. Мелкие точки (таксоны 1 и 4) обозначают задержки, относительно слабо влияющие на прохождение маршрута. Разумеется, здесь речь не идет о спонтанно возникающих на дорогах пробках. Более подробно использование таксономии в GisAuto изложено в [2].

**4. Имитационная модель перекрестка.** Имитационная модель, разработанная для GisAuto, ориентирована на выполнение двух основных функций.

1. Поддержка GisAuto на этапах 3 и 7, перечисленных во введении.

2. Использование в автономном режиме для анализа систем управления перекрестками.

Приведем краткое описание имитационной модели. Более подробно имитационная модель описана в [3].

Разработанная имитационная модель использует структуру перекрестка, изображенную на рис. 5. В модели существует четыре потока: а, г, с, е. Для обозначения направлений движения используются пары букв (например, ab, af).

В каждом потоке три полосы движения автомобилей. Каждая полоса предназначена для движения в одном направлении. Кругами обозначены задержки автомобилей перед перекрестком в каждом из направлений.

Движением на перекрестке управляют четыре светофора (модели совокупности реальных светофоров). Каждый светофор имеет номер, пять секций и управляет одним потоком. Например, светофор 3 управляет потоком «е», светофор 2 управляет потоком «а».

На перекрестке в каждом направлении существует очередь автомобилей, управляемая светофорами. Для каждого направления задается интенсивность поступления автомобилей на перекресток (интенсивность генерации транзакций). Переключение светофоров осуществляет система управления светофорами (СУС). СУС может находиться в одном из пяти состояний.

В состоянии 1 разрешается движение в направлениях ab, ah, af потока а и в направлении gd (поворот направо) потока g.

В состоянии 2 разрешается движение в направлениях cf, cd, ch потока с и в направлении eb (поворот направо) потока е.

В состоянии 3 разрешается движение в направлениях ed, ef, eb потока е и в направлении ah (поворот направо) потока а.

В состоянии 4 разрешается движение в направлениях gd, gh, gb потока g и в направлении cf (поворот направо) потока с.

Состояние 5 является переходным между состояниями 1–4, что соответствует желтому свету светофора.

К моменту написания статьи реализованы алгоритмы четырех СУС. В модели различаются неадаптивные (детерминированные) и адаптивные СУС. Алгоритм неадаптивной СУС (СУС1) реализует переход между состояниями светофоров через заранее заданное время. Алгоритмы адаптивных СУС (СУС2, СУС3, СУС4) переключают состояния с учетом текущей ситуации на перекрестке (например, с учетом длин очередей в различных направлениях).

Алгоритм СУС1 переключает состояния светофоров в заданной последовательности через заданное время.

Алгоритм СУС2 последовательно переключает состояния светофоров либо при отсутствии автомобилей во всех открытых направлениях, либо по истечении заданного максимального времени нахождения в состоянии (как для СУС1).

Алгоритм СУС3 разрешает движение автомобилям того потока, для которого суммарная длина очередей направлений максимальна. Исключение составляют направления, для которых время ожидания превышает заданную величину. Такие направления имеют высший приоритет. В остальном СУС3 аналогичен СУС2.

Алгоритм СУС4 использует эталонные состояния для принятия решения о выборе потока для открытия. Суть алгоритма состоит в следующем.

Считаем, что текущее состояние перекрестка определяется как  $S = \{Q_a, Q_c, Q_e, Q_g\}$ , где  $Q_a, Q_c, Q_e, Q_g$  — суммарные длины очередей автомобилей в направлениях соответствующих потоков (а, с, е, g). Тогда каждому потоку можно задать такой набор  $ST = \{Q_a, Q_c, Q_e, Q_g\}$ , при котором ему однозначно отдается предпочтение при принятии решения о разрешении движения. Такой набор будем назы-

вать эталонным состоянием. Эталонное состояние можно считать точкой в четырехмерной системе координат. Таким образом, имеем четыре точки, соответствующих потокам а, с, е, g. Вычисляются расстояния текущего состояния S до каждой из четырех точек. СУС разрешает движение тому потоку, расстояние до точки которого минимально. В остальном СУС4 аналогичен СУС3.

Проведены имитационные эксперименты для сравнительного анализа СУС. Эксперименты показали, что чем выше интенсивность поступления автомобилей, тем дольше ожидание в очереди Tq для СУС1 по сравнению с СУС2. Один из результатов сравнения адаптивных алгоритмов показан на рис. 6. Анализируя диаграмму, можно сделать вывод о том, что с точки зрения времени задержки автомобилей перед перекрестком СУС4, по крайней мере, не хуже других алгоритмов.

**Заключение.** Во всех крупных городах растут проблемы организации автомобильного движения. Не является исключением г. Омск. Разрабатываемая система GisAuto ориентирована на анализ задержек при проезде автомобилями различных участков пути разветвленной автотранспортной сети. В системе GisAuto используется оригинальное сочетание различных методов и средств (методы геоинформационных систем, анализа графов, классификации, имитационного моделирования) для анализа задержек на маршрутах автотранспорта. В статье показано, какие результаты можно получить при автономном и совместном использовании перечисленных методов. Систему GisAuto можно использовать в научных исследованиях, для анализа существующей и проектируемой автотранспортной сети. Дальнейшее развитие GisAuto предполагает вести в направлении расширения возможностей и соединения с практикой.

#### Библиографический список

1. Пуртов, А. М. Интеграция технологии ГИС и метода редукции графов для анализа транспортных сетей / А. М. Пуртов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2011. — № 1 (97). — С. 164–168.
2. Пуртов, А. М. Использование таксономии при анализе задержек в автотранспортных сетях / А. М. Пуртов // Вестник СибАДИ. — 2013. — № 2 (30). — С. 73–78.
3. Пуртов, А. М. Разработка и анализ имитационной модели перекрестка для системы GisAuto / А. М. Пуртов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2013. — № 1 (117). — С. 225–229.
4. Загоруйко, Н. Г. Прикладные методы анализа данных и знаний / Н. Г. Загоруйко. — Новосибирск : Изд-во Ин-та математики, 1999. — 270 с.

**ПУРТОВ Андрей Михайлович**, кандидат технических наук, доцент (Россия), старший научный сотрудник лаборатории методов проблем преобразования информации (МППИ).  
Адрес для переписки: andr.purtov@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 15.08.2015 г.

© А. М. Пуртов

## ЧТО ТАКОЕ «ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ КОМПЬЮТЕРНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ТРОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ» И ОСНОВНЫЕ ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ИХ УСТРОЙСТВО

Статья посвящена проектированию интеллектуальных компьютерных компонентов тройного назначения. В ней рассказывается, что такое «интеллектуальные компьютерные компоненты тройного назначения». Работа содержит определение алгоритмов, отделимых от знаний и неотделимых от знаний.

**Ключевые слова:** компонент, образование, Интернет.

Что такое интеллектуальные компьютерные компоненты тройного назначения, удовлетворяющие U-требованиям. «По мере развития системы «университетов онлайн» существенно усилится конкуренция между вузами не только на отечественном, но и на мировом уровне, что со временем приведет к тому, что страны начнут делать упор не на собственные системы высшего образования, а на глобальные» — это цитата из выступления ректора Финуниверситета М. А. Эскиндарова на Международной научно-методической конференции «Стратегия развития высшего и среднего профессионального образования в России» (журнал «Финансист» № 135, май 2013). Мы полностью с этим согласны.

Из прочитанного в Омске доклада президента Международного консорциума «Электронный университет», научного руководителя МЭСИ В. П. Тихомирова «Правовое обеспечение электронного обучения в России и электронное «породнение» образовательных учреждений» мы так же знаем, что ради создания электронных курсов для компьютеризации образования в мире объединяются по 100 университетов. Они понимают, что от качества этих курсов во многом будет зависеть будущее университетов и что впереди нешуточная конкуренция.

Все это стало возможным благодаря усилиям различных авторов. Чтобы понять достигаемый на основе этих усилий уровень качества электронных курсов, рассмотрим для примера две ближайшие к нам диссертации — диссертацию Карповой И. П. «Исследование и разработка подсистемы контроля знаний в распределенных автоматизированных обучающих системах» (2002 г.) и диссертацию Левинской М. А. «Инструментальные средства создания интеллектуальных обучающих систем с визуальным преобразованием, сопоставлением и вычислением формул» (2004 г.)

На наш взгляд, с одной стороны, достоинством, а с другой — недостатком первой работы является обстоятельство, что она посвящена устройству автоматизированных обучающих систем (АОС) для обучения **любой** предметной области. Поэтому

подача материала осуществляется через чтение выставляемых в Интернете курсов лекций с соответствующими заданиями, а в качестве контроля рассматривается тестирование в том или ином виде. Это действительно самый общий способ обучения, пригодный для всех предметных областей (литература, история, география, экономика, математика, физика, инженерное дело и т. д.), но, **на наш взгляд, не всегда самый эффективный.**

Вторая работа посвящена фактически тестированию, но только по элементарной школьной алгебре. Для тестируемой группы по шаблону происходит генерация похожих задач и ответов к ним. Затем учащиеся решают на бумаге эти задачи и вводят ответ. Он сверяется со сгенерированным ответом, анализируются отклонения, генерируются замечания («не хватает слагаемого», «сомножитель не верен» и т. д.) и генерируется оценка, зависящая от сделанных замечаний. Делается это на основе разрабатываемого в диссертации языка Т-РЕФАЛ.

**На наш взгляд, в ситуациях, когда предметные области, предоставляют человеку не только знания (история, география и т. д.), но и задачи, решаемые с помощью этих знаний (математика, экономика, инженерное дело и т. д.), качество нынешних АОС можно, а следовательно, и нужно улучшить.** На наш взгляд, в таких ситуациях (**предметные области с задачами**) недостаточно публиковать в интернете конспекты лекций, задания и тесты.

На наш взгляд, в этих ситуациях необходимо создавать способные взаимодействовать между собой интеллектуальные компьютерные компоненты тройного назначения (название наше), выводящие в Интернет различные предметные области с задачами. **Внешне, для удобства пользователей, они все, на наш взгляд, должны выглядеть единообразно, т. е. удовлетворять следующим требованиям, которые мы назвали U-требования:**

а) они должны содержать как минимум UML-учебник (наше понятие), приспособленный для единообразного компьютерного системного изложения материала;

б) они должны уметь **самостоятельно** решать предложенные задачи и на основе этого предоставлять

и объяснять решение, следить за решением человека и локализовать ошибки, подсказывать ход решения намеками или сделав один шаг решения. Сделанные ошибки должны фиксироваться для генерации в будущем задач с подобными вызвавшими затруднения ситуациями.

Умение самостоятельно решать задачи **должно поддерживаться самообучаемостью** компонентов, заключающейся в том, что задачи, которые компонент не может решить, передаются человеку, чтобы он показал ход решения, а компонент выделил в нем и показал человеку те переходы, которые он делать не умеет. Если человек после этого перепрограммирует компонент, то тот сможет в дальнейшем справляться с подобными моментами.

Эффективности обучения должна способствовать **возможность компонентов обращаться друг к другу через Интернет для выполнения каждой из них той части решения, на которой он специализируется**. При этом взаимодействие компонентов должно быть таким, чтобы все педагогические функции сопровождали и этапы решения подзадач. Тогда во время решения, например, задачи по физике будут стандартно обработаны также ошибки по алгебре, арифметике и т. д.;

в) умение самостоятельно решать задачи, делать следствия и доказательства **должно предоставляться не только учащимся и учителям, но также программистам, а в перспективе и ученым**. Именно поэтому мы и назвали такие компоненты компонентами тройного назначения.

**Основные факторы, влияющие на способ проектирования интеллектуальных компьютерных компонентов тройного назначения, удовлетворяющих U-требованиям.** Возникает вопрос о том, как проектировать и программировать такие компоненты и взаимодействие между ними. Как показывает наш опыт и анализ, **внешне единообразные внутри эти компоненты должны быть устроены по-разному в зависимости от наличия различных факторов**.

Прежде всего, на проектирование и программирование компонентов влияет, являются ли изучаемые алгоритмы **отделимыми от знаний** или **неотделимыми от знаний** (терминология наша).

Примером алгоритма, отделимого от знаний, является алгоритм решения квадратного уравнения. Многие знают, какие действия и в какой взаимосвязи необходимо делать на каждом шаге, но немногие смогут объяснить, доказать, почему это так, т. к. **в этом случае объяснения, доказательства каждого действия в отдельности объединяют в объяснение, доказательство всего алгоритма**. Поэтому тут можно делать **отдельно** описание сово-

купности **необходимых действий** и описание **доказательства необходимости и достаточности этих действий**. **Употребляться эти описания могут отдельно**. Именно в этом смысле алгоритм является **отделимым от знаний**.

Другое дело, когда мы решаем задачу по геометрии или упрощаем алгебраическое выражение, или решаем уравнение и т. д. Тут мы **заранее известную совокупность шагов, решающую задачу, не знаем**. Здесь мы тоже действуем пошагово, но **должны с помощью знаний обосновать допустимость каждого шага отдельно** (однако эта допустимость еще не означает необходимость). Так мы поступаем пока либо не получим ответ, либо пока не откажемся от попыток решить задачу. Получив ответ, мы можем отделить все шаги, необходимые для решения от других допустимых, но не необходимых шагов. **Как видим, при использовании алгоритма, неотделимого от знаний, мы на каждом шаге должны использовать знания, позволяющие увидеть и обосновать возможность некоторого действия**. Именно в этом смысле алгоритм является **неотделимым от знаний**.

Разумеется, возможны смешанные алгоритмы, например, алгоритм решения уравнения, когда часть шагов, например, ведущих к эквивалентному квадратному уравнению, необходимо обосновывать, а другую часть шагов, например, решающую квадратное уравнение, обосновывать не нужно.

О том, как проектировать в различных ситуациях компоненты, удовлетворяющие U-требованиям, мы расскажем в следующих статьях.

Примеры реализации рассмотренных алгоритмов можно найти в [1, 2].

#### Библиографический список

1. Ультан, А. Е. Разработка обучающей программы «Решение текстовых задач по алгебре» / А. Е. Ультан, В. А. Закандырин // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2009. — № 6 (82). — С. 200–201.
2. Ультан, А. Е. Разработка обучающей информационной системы «Алгебра» / А. Е. Ультан, Д. А. Кравцов // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. — 2011. — № 3 (98). — С. 169–173.

**УЛЬТАН Александр Ефимович**, кандидат технических наук, доцент кафедры «Информатика и информационные технологии».

Адрес для переписки: ultan\_ae@mail.ru

Статья поступила в редакцию 25.05.2015 г.

© А. Е. Ультан

## Книжная полка

004.4/B29

**Венедюхин, А. Домены: Все, что нужно знать о ключевом элементе Интернета / Александр Венедюхин.** — М. : ЭКСМО, 2014. — 331 с.

Без доменов современный Интернет невозможен. Читатель найдет сведения о том, как домены появились, как устроена система доменов и как ими эффективно управлять, как домены связаны с информационной безопасностью, какие административные, технические и правовые коллизии возникают вокруг них и что ждет доменные имена в будущем.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОЦЕССА СИМБИОТИЧЕСКОЙ АЗОТФИКСАЦИИ И ИХ РЕАЛИЗАЦИЯ В ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ В СРЕДЕ ANYLOGIC

Рассмотрена модель симбиотической фиксации азота, описывающая прирост биомассы побега, корней, клубеньков и динамику почвенного азота. Модель представлена системой дифференциальных уравнений. Общий запас доступного азота и углерода для роста распределяется между корнями и побегом в определенном отношении. Численный анализ особенностей симбиотической фиксации азота выполнен в среде AnyLogic.

**Ключевые слова:** азотфиксация, минеральный азот почвы, бобовые культуры, условия окружающей среды, алгоритм, модель.

**Введение.** Для реализации всестороннего комплексного подхода к моделированию продукционного процесса бобовых культур возникла необходимость в разработке модели симбиотической фиксации азота клубеньковыми тканями их корней и включения модели в систему имитационного моделирования продуктивности сельскохозяйственных культур AGROTOOL.

Эта необходимость связана с биологическими особенностями бобовых культур. Вступая в симбиоз с клубеньковыми бактериями, бобовые приобретают свойство ассимилировать молекулярный азот воздуха, что играет важную роль в азотном питании самих растений и сохранении плодородия почвы.

Создание специфических севооборотов с участием бобовых культур за счет использования бобово-ризобияльных систем составляет основу «биологического земледелия». Поэтому включение алгоритмов симбиотической азотфиксации в математические модели продукционного процесса бобовых культур, а следовательно, и в комплексные модели расчета системы сельскохозяйственных севооборотов с участием бобовых культур, представляется важной практической задачей.

А моделирование процессов превращения и трансформации азота в почве, поступление его в растение позволит целенаправленно влиять на развитие сельскохозяйственных культур с целью получения максимально возможных урожаев, рационально использовать азотные удобрения, снизив тем самым загрязнение окружающей среды нитратами.

В научных обзорах [1–4] синтезирован имеющийся экспериментальный материал по симбиотическим системам, как ассоциациям микроорганизмов и растений, выявлены основные факторы, наиболее важные для процесса моделирования с учетом их приоритетности.

Обзоры охватывают все аспекты процесса симбиотической фиксации азота, включая описание механизма, почвенных условий, влияющих на образование клубеньков и азотфиксацию, роль фотосинтеза и фаз развития бобовых культур.

В работе [1] приведен достаточно полный список литературы, на основе анализа которой установлены связи симбиотической фиксации азота не только с почвенными факторами и физиологическими особенностями бобовых, но и выявлено обратное действие процесса азотфиксации на физиологию культур, плодородие почвы, определена роль азотфиксации в азотном питании сельскохозяйственных растений.

В работах [3, 4] представлены методы для количественной оценки симбиотической азотфиксации бобовых культур, разработанные российскими и зарубежными исследователями, проведено сравнение функций, которые используются для моделирования симбиотической азотфиксации бобовых культур в разных моделях, оценены их относительно сильные и слабые стороны.

**Постановка задачи и математическая модель симбиотической азотфиксации.** Модель, описывающая прирост биомассы побега, корней, клубеньков и динамику почвенного азота, представлена

следующей системой дифференциальных уравнений [5]:

$$\begin{cases} \frac{\partial Biomass_{shoot}}{\partial t} = TGR u_s; \\ \frac{\partial Biomass_{root}}{\partial t} = TGR(1-u_s)u_r; \\ \frac{\partial Biomass_{nodules}}{\partial t} = TGR(1-u_s)(1-u_r) - Biomass_{decay}; \\ \frac{\partial N_{soil}}{\partial t} = -N_{uptake} + N_{decay}; \end{cases}$$

где  $Biomass_{shoot}$  — биомасса побега,  $Biomass_{root}$  — биомасса корней,  $Biomass_{nodules}$  — биомасса клубеньков,  $Biomass_{decay}$  — биомасса отмерших клубеньков, подлежащая разложению,  $N_{soil}$  — общее содержание азота в почве,  $N_{uptake}$  — количество поглощенного азота растением,  $N_{decay}$  — количество азота в почве за счет разложения клубеньков,  $TGR$  (Total Growth Resource) — биомасса растения.

Для учета влияния процесса фотосинтеза была использована линейная модель, в которой интенсивность аккумуляции листьями углерода полагается пропорциональной биомассе побега. Таким образом, количество углерода, полученное в процессе фотосинтеза, равно:

$$C_{photosynthesis} = \sigma_C Biomass_{shoot} Radiation$$

где  $\sigma_C$  — условный параметр, равный удельному фотосинтезу единицы биомассы побега,  $Radiation$  — приходящая солнечная радиация.

Интенсивность поглощения корнями азота также полагается пропорциональной биомассе корней. Количество азота, полученное из почвы, вычисляется по формуле:

$$N_{uptake} = \sigma_N Biomass_{roots} N_{soil},$$

где  $\sigma_N$  — условный параметр, равный удельному поглощению азота из почвы единицей биомассы корней растения.

Ниже представлены уравнения, описывающие процессы в клубеньках. Количество фиксированного азота полагается пропорциональным биомассе клубеньков:

$$N_{fixation} = K_{fix} Biomass_{nodules},$$

$K_{fix}$  — удельная фиксация азота единицей биомассы клубеньков,  $Biomass_{nodules}$  — биомасса клубеньков.

Клубеньки отмирают с определённой интенсивностью, и их разложение пополняет запасы почвенного азота:

$$N_{decay} = K_{decay} Biomass_{nodules},$$

$K_{decay}$  — коэффициент разложения клубеньков.

$$N_{decay} = f_N Biomass_{decay},$$

$f_N$  — доля содержания азота в структурной биомассе растения.

Общий запас азота и углерода, доступного для роста, распределяется между корнями и побегом в определённом соотношении:  $u_s$  — доля ассимилятов, направляемая на рост побега,  $(1-u_s)$  — доля ассимилятов, направляемая на рост корней и клубеньков. Доля  $u_s$  рассчитывается таким образом, что в каждый момент времени все доступные

ресурсы направляются к тому органу, рост которого наиболее важен. Так, например, при недостатке углерода прирост биомассы побега позволит увеличить количество синтезированного углерода. Таким образом, доля субстрата, направляемая на рост побега, рассчитывается по формуле:

$$u_s = \begin{cases} 0, & \frac{C_{photosynthesis}}{f_c} > \frac{N_{uptake} + N_{fixation}}{f_N}; \\ 1, & \frac{C_{photosynthesis}}{f_c} < \frac{N_{uptake} + N_{fixation}}{f_N}. \end{cases}$$

Аналогично распределяются ресурсы между корнями и клубеньками, т.е. в зависимости от того, в какой орган более выгодна «инвестиция» с точки зрения получения азотных ассимилятов на следующем шаге, — в биомассу поглощающих «внешний» азот корней или производящих «внутренний» азот клубеньков:

$$u_r = \begin{cases} 0, & \sigma_N * N_{soil} < K_{fix}; \\ 1, & \sigma_N * N_{soil} > K_{fix}. \end{cases}$$

Общий потенциальный прирост биомассы растения при текущих ресурсах углерода и азота рассчитывается по формуле:

$$TGR = \min\left(\frac{C_{photosynthesis}}{f_c}; \frac{N_{uptake} + N_{fixation}}{f_N}\right),$$

т.е. темп производства новой структурной биомассы подчиняется правилу монолимитирования.

**Разработка алгоритма и реализация модели в специализированной среде имитационного моделирования AnyLogic.** На первом этапе была разработана упрощённая структура и функциональное содержание аналитической модели симбиотической азотфиксации в рамках поточно-балансового подхода (рис. 1). В качестве программного обеспечения для реализации модели выбрана специализированная среда имитационного моделирования AnyLogic. Численный анализ выполнен с привлечением мультипарадигмного подхода (системная динамика, дискретно-событийное моделирование и агентные модели), предоставляемого средой AnyLogic (рис. 2). Модель состоит из четырех контуров: прирост



Рис. 1. Упрощенная структура модели



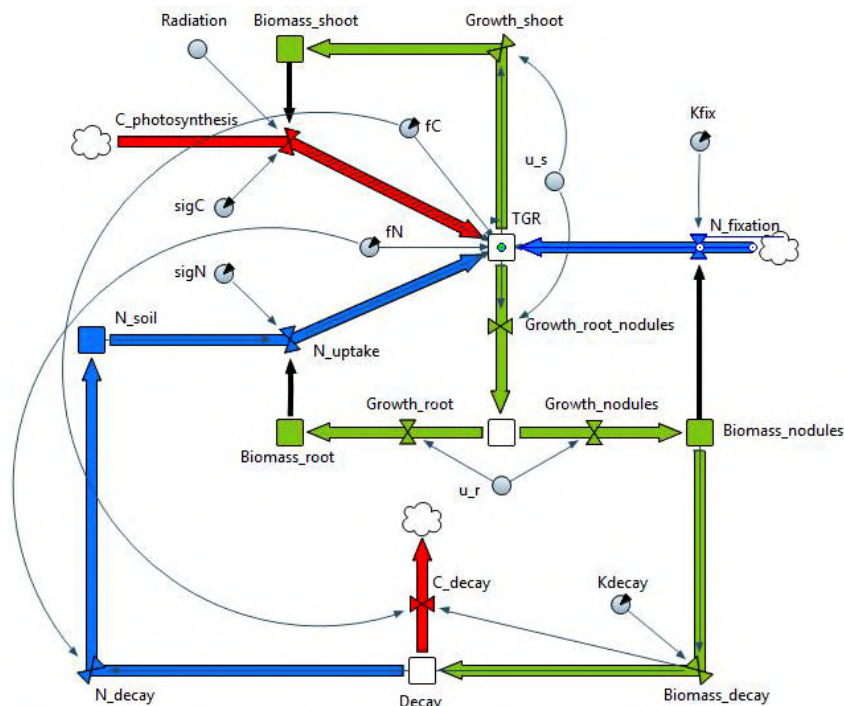


Рис. 2. Реализация модели в среде AnyLogic

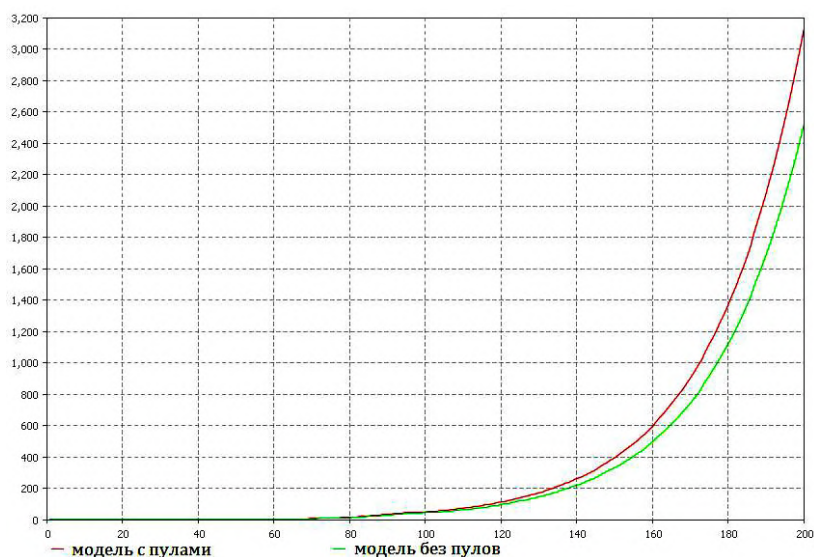


Рис. 3. Total Growth Rate

биомассы побега, корней, клубеньков и динамика почвенного азота.

В рамках формализации подмодели органогенеза «shoot-root» — двухпоточной модели роста и углеродно-азотного взаимодействия в растении, реализованной в модели AGROTOOL [6], была разработана модель без явного выделения клубеньков в качестве динамической переменной. Клубеньки входили в биомассу корней, пропорционально которой происходила фиксация азота. В процессе реализации модели и ее тестировании были обнаружены некоторые противоречия: 1) фиксация азота происходила при любой концентрации почвенного азота, даже при больших его количествах; отношение фиксированного азота к поглощенному корнями оставалось постоянным; 2) часть фиксированного азота сразу поступала в почву и могла быть использована рядом растущими растениями

или последующими культурами севооборота. Однако, согласно литературным данным [1, 2, 4], при определенной концентрации азота в почве растение не образует клубеньков, так как для него менее затратно питаться азотом из почвы напрямую, а обмен азотом с окружающей средой происходит, скорее всего, только за счет разрушения структурной биомассы отмерших клубеньков. В построенной модели нет ограничений на темпы потенциального роста рассматриваемых органов. Она отвечает начальному этапу чисто вегетативного роста, который характеризуется динамикой накопления биомассы, близкой к экспоненте.

На следующем этапе полученная модель была усложнена добавлением накопителей (пулов) запасных ресурсов азота ( $N_{pool}$ ) и углерода ( $C_{pool}$ ), что позволило уточнить такой нефизичный момент, как потерю неиспользованных (оказавшихся в избытке

и неустребованными) на текущем шаге первичных ассимилятов. Запас углерода пополняется с помощью фотосинтеза ( $C_{photosynthesis}$ ), запас азота — путём поглощения почвенных азотных соединений корнями растения ( $N_{uptake}$ ) и путём симбиотической азотфиксации ( $N_{fixation}$ ). Таким образом, запас углерода равен:

$$C_{pool} = C_{photosynthesis} - TGRf_c,$$

запас азота соответственно равен:

$$N_{pool} = N_{uptake} + N_{fixation} - TGRf_N.$$

Слагаемые  $TGRf_c$  и  $TGRf_N$  показывают расход углерода и азота из запасов на рост растения. Однако значительного влияния на результаты моделирования это изменение не оказало. Пулы оказывают незначительное буферное влияние на динамику системы и позволяют незначительно скорректировать темпы экспоненциального роста в установившемся режиме (рис. 3).

По результатам проведённых исследований был осуществлен анализ чувствительности модели к вариациям параметров [7], её качественная верификация и итеративная процедура модификации структуры модели (с использованием базовых принципов методологии абстрагирования моделей [8, 9]). Планируется реализация подмодели симбиотической азотфиксации бобовых культур в форме объектно-процедурных модулей комплексной модели продукционного процесса AGROTOOL, исследование, параметрическая идентификация и верификация подмодели симбиотической азотфиксации на базе набора данных натуральных экспериментов, взятых из открытых источников. Разработанная модель будет включена в качестве составного блока в компьютерную систему имитационного моделирования продукционного процесса растений в многолетнем севообороте.

#### Библиографический список

1. Хворова, Л. А. Моделирование влияния азотного питания на продукционный процесс посева люцерны: дис. ... канд. техн. наук / Л. А. Хворова. — СПб., 1992. — 202 с.
2. Хворова, Л. А. Подходы к описанию симбиотической азотфиксации. В 2 ч. Ч. 1. Анализ и выделение перечня факторов с оценкой их приоритетности / Л. А. Хворова, А. Г. Топаж, А. В. Абрамова, К. Г. Неупокоева // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2015. — №1/1 (85). — С. 187–191.

## Книжная полка

004.4/K17

Калекин, Д. В. **Технология программирования. Разработка и тестирование эффективных вычислительных методов : учеб. пособие / Д. В. Калекин. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — 127 с.**

Приведены методы систематизации первостепенных задач в области разработки программного обеспечения; специфика применения различных подходов, методологий и инженерных практик; средства обеспечения качества программных продуктов. Систематизирован опыт крупных компаний в вопросах сопровождения разных этапов жизненного цикла программного обеспечения. Рассмотрены примеры разработки приложений на языке PHP для web с использованием объектно-ориентированного подхода.

Предназначено для студентов специальностей, связанных с изучением информационных технологий и системных вопросов построения информационных систем.

3. Хворова, Л. А. Подходы к описанию симбиотической азотфиксации. В 2 ч. Ч. 2. Анализ подходов к математическому моделированию процесса / Л. А. Хворова, А. Г. Топаж, А. В. Абрамова, К. Г. Неупокоева // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2015. — №1/1 (85). — С. 192–196.

4. Liu Y., Wu L. et al. Models of biological nitrogen fixation of legumes // *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag (Germany). 2011. № 31 (1).

5. Топаж, А. Г. Математические модели симбиотической азотфиксации: взаимопомощь или подчинение? / А. Г. Топаж, А. В. Абрамова // Математика. Компьютер. Образование : сб. тез. докл. XXII Междунар. конф. — Пушино, 2015. — С. 101.

6. Хворова, Л. А. Математическое моделирование и информационные технологии в экологии и природопользовании / Л. А. Хворова, В. М. Брыксин, Н. В. Гавриловская, А. Г. Топаж. — Барнаул : Изд-во Алтайского гос. ун-та, 2013. — 277 с.

7. Хворова, Л. А. Методы исследования чувствительности моделей продуктивности агроэкосистем / Л. А. Хворова // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2013. — № 1/1 (77). — С. 128–132.

8. Хворова, Л. А. Адаптивная идентификация структуры динамических моделей продукционного процесса сельскохозяйственных растений / Л. А. Хворова, Н. В. Гавриловская // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2010. — № 1/2. — С. 139–144.

9. Хворова, Л. А. Оптимизация процесса структурно-параметрической идентификации моделей продуктивности агроэкосистем / Л. А. Хворова // Известия Алтайского гос. ун-та. — 2012. — № 1/1. — С. 171–175.

**АБРАМОВА Анастасия Владимировна**, аспирантка кафедры теоретической кибернетики и прикладной математики Алтайского государственного университета, г. Барнаул.

Адрес для переписки: [abramova.math@gmail.com](mailto:abramova.math@gmail.com)

**ТОПАЖ Александр Григорьевич**, доктор технических наук, заведующий лабораторией математического моделирования агроэкосистем Агрофизического НИИ, г. Санкт-Петербург.

Адрес для переписки: [topaj@hotmail.ru](mailto:topaj@hotmail.ru).

**ХВОРОВА Любовь Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры теоретической кибернетики и прикладной математики Алтайского государственного университета, г. Барнаул.

Адрес для переписки: [hla@math.asu.ru](mailto:hla@math.asu.ru)

Статья поступила в редакцию 15.06.2015 г.

© А. В. Абрамова, А. Г. Топаж, Л. А. Хворова

## ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА ПОЧВ В ОДНОМЕРНЫХ И ДВУМЕРНЫХ ЗАДАЧАХ С ГРАНИЦЕЙ РАЗДЕЛА

Рассматриваются задачи: распределение температуры в почве, имеющей неоднородную структуру почвенных слоев; определение теплофизических характеристик почвы — теплоемкости, теплопроводности и температуропроводности черноземов выщелоченных Алтайского Приобья; алгоритм и численный метод решения двумерной задачи теплового режима почв с границей раздела между двумя участками с различными теплофизическими параметрами. На границе раздела почвенных компартментов задаются условия непрерывности температур и тепловых потоков. Для решения задачи применяется численный метод с использованием продольно-поперечной конечно-разностной схемы (метод переменных направлений). Исследуются вопросы определения теплофизических коэффициентов при различных значениях влажности; суточный и сезонный ход теплофизических характеристик, зависящих от влажности и плотности почвы.

**Ключевые слова:** тепловой режим почвы, теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность почвы, модель, разностная схема.

**Введение.** Теплофизическое состояние почвы характеризуется комплексом теплофизических параметров — теплоемкостью, тепло- и температуропроводностью, соответствующим температурным полем и тепловыми потоками, формирующимися в почвенном профиле. С тепловым режимом почв тесно связаны начало и конец вегетационного периода, пространственное размещение растений, характер распространения корневых систем, скорость поступления к корням питательных элементов. С температурным режимом связаны внутрпочвенное испарение и транспирация, интенсивность азотных трансформаций [1, 2], а температурный градиент оказывает непосредственное влияние на движение воды в почве. Поэтому разработка математических моделей, корректно учитывающих процессы теплопереноса в почве, является сложной и актуальной задачей.

В подавляющем большинстве в современных моделях, описывающих продукционный процесс сельскохозяйственных растений, расчет производится отдельно для каждой опорной точки поля с параметрами, характерными только для данного типа почвы.

Все точки считаются независимыми друг от друга, и предполагается, что все окружение данной точки обладает теми же свойствами и, соответственно, никаких горизонтальных перетоков вещества и энергии не происходит [3, 4]. Однако для целей точного земледелия горизонтальная неоднородность поля является важнейшим фактором, влияющим на выбор агротехники и определяющим результат хозяйствования [5].

**Постановка задачи моделирования теплового режима почв.** Теплота, поступающая на поверхность почвы, под действием создаваемого градиента температур перераспределяется в толщине почвенного слоя. Уравнение теплопереноса в почве имеет вид [1, 3, 4, 6]:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \chi \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \chi \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \chi \frac{\partial T}{\partial z} \right) + f(x, y, z, t),$$

где  $T$  — температура почвы;  $\rho(x, y, z)$  — плотность почвы;  $c(w(x, y, z))$  — теплоемкость;  $\chi$  — коэффициент теплопроводности, зависящий от влажности почвы  $w$ :  $\chi = \chi(w(x, y, z))$ . Теплоперенос осуществляется вдоль координатных осей  $Ox$ ,  $Oy$ ,  $Oz$ ;  $f(x, y, z, t)$  — функция источника тепла.

Искомая функция  $T$  удовлетворяет начальным и некоторым граничным условиям. Нижняя граница помещается, как правило, на глубине, на которой температура либо постоянна, либо зависит от времени известным образом. В качестве верхнего граничного условия записывается соотношение, обеспечивающее «сшивание» решений задачи в почве и в приземном воздухе, — условие теплового баланса на поверхности почвы [1, 3, 4, 6].

Рассмотрим двумерную модель теплового режима почвы (рис. 1). Пусть неоднородный почвенный компартмент  $\Omega$  состоит из двух участков

$$\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2, \text{ где } \Omega_1 = \{x_1 \leq x \leq 0; -H \leq y \leq 0\},$$

$$\Omega_2 = \{0 \leq x \leq x_2; -H \leq y \leq 0\},$$

значительно отличающихся по влиянию характеристик поля на продукционный процесс посева и на движение почвенных растворов (в действительности свойства почвы меняются от точки к точке непрерывно). Границы участков  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  полагаются известными и прямолинейными.

Пусть система координат выбрана таким образом, что ось  $Oy$  проходит по границе раздела областей  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ . Функция  $T_1$  определяет температуру почвы в области  $\Omega_1$ , а  $T_2$  — температуру почвы в области  $\Omega_2$ . Тогда в силу почвенной однородности каждой из областей  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  можно записать условия:

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = 0 \text{ при } x = x_1; \quad \frac{\partial T_2}{\partial x} = 0 \text{ при } x = x_2. \quad (1)$$

На границе раздела компартментов  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  ( $x=0$ ) должны выполняться условия непрерывности температуры и тепловых потоков:

$$T_1 = T_2 \text{ и } \chi_1 \frac{\partial T_1}{\partial x} = \chi_2 \frac{\partial T_2}{\partial x} \text{ при } x=0. \quad (2)$$

Уравнения теплопереноса в двумерном случае будут иметь вид:

$$\rho_i c_i \frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left( \chi_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \chi_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right) + f(x, y, t), i = 1, 2. \quad (3)$$

Введем коэффициенты температуропроводности  $K_i$ :  $K_i = \frac{\chi_i}{\rho_i c_i}$ , которые также будут функциями пространственных координат  $x, y$ , и перепишем уравнение (3) в следующем дивергентном виде:

$$\frac{\partial T_i}{\partial t} = \frac{1}{\rho_i c_i} \left( \frac{\partial}{\partial x} \left( \chi_i \frac{\partial T_i}{\partial x} \right) \right) + \frac{1}{\rho_i c_i} \left( \frac{\partial}{\partial y} \left( \chi_i \frac{\partial T_i}{\partial y} \right) \right) + \frac{1}{\rho_i c_i} f(x, y, t), i = 1, 2. \quad (4)$$

Для решения уравнения (4) применяется численный метод с использованием продольно-поперечной конечно-разностной схемы (метод переменных направлений). Согласно [3, 6], схема расчета для областей  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$  записывается в следующем общем виде:

$$\frac{T^{k+\frac{1}{2}} - T^k}{0,5\Delta t} = [KT_x]_x^k + [KT_y]_y^{k+\frac{1}{2}} + F^k,$$

$$\frac{T^{k+1} - T^{k+\frac{1}{2}}}{0,5\Delta t} = [KT_x]_x^{k+\frac{1}{2}} + [KT_y]_y^{k+\frac{1}{2}} + F^k.$$

Здесь  $F = \frac{k}{pc} \left[ \frac{\partial(pc)}{\partial x} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial(pc)}{\partial y} \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{1}{pc} f(x, y, t), \Delta t$  — шаг по времени.

Для реализации представленной схемы для каждой области  $\Omega_i$   $i=1, 2$ , вводится равномерная разностная сетка  $(x_n, y_m)$ . Значения сеточной функции  $T(x, y, t)$  в узлах сетки обозначим  $T_{n,m}^k = T(x_n, y_m, t^k)$ . При этом используется следующая разностная аппроксимация для слагаемых:

$$[KT_x]_x \approx \bar{K}_{n+1} \frac{T_{n+1,m} - T_{n,m}}{h_x^2} - \bar{K}_n \frac{T_{n,m} - T_{n-1,m}}{h_x^2},$$

где  $\bar{K}_{n+1} = K_{n+\frac{1}{2},m}$ ,  $K_{n+\frac{1}{2},m} = K\left(x_{n+\frac{1}{2}}, y_m\right)$ ,  $x_{n+\frac{1}{2}} = x_n + 0,5h_x$ ,  $h_x = h$  (для области  $\Omega_1$ ) или  $h_x = h_2$  (для области  $\Omega_2$ ). В результате преобразований получим систему линейных алгебраических уравнений:

$$-a_{n,m} T_{n,m-1}^{k+\frac{1}{2}} + b_{n,m} T_{n,m}^{k+\frac{1}{2}} - c_{n,m} T_{n,m+1}^{k+\frac{1}{2}} = d_{n,m},$$

$$-a_{n,m} T_{n-1,m}^{k+1} + b_{n,m} T_{n,m}^{k+1} - c_{n,m} T_{n+1,m}^{k+1} = d_{n,m},$$

соответствующую (4). Данные системы решаются методом прогонки. При этом в направлении  $y$  используется обычный вариант данного метода [6].

Для определения  $T_1$  и  $T_2$  на  $(k+1)$  временном слое используем условия непрерывности температур и тепловых потоков на границе раздела (2) и представление решения (т.е. температуры в каждой из областей) в таком виде, когда  $(T_1)_{n,m}$  и  $(T_2)_{n,m}$  выражаются через неизвестные значения температуры  $(T_1)_{n_1,m} = (T_2)_{l,m}$  на границе раздела  $x=0$ . Представления вида:

$$(T_1)_{n,m} = \beta_{n,m}^1 + \gamma_{n,m}^1 \bar{T}_m, (T_2)_{n,m} = \beta_{n,m}^2 + \gamma_{n,m}^2 \bar{T}_m,$$

где  $\bar{T}_m$  — температура на границе раздела областей и  $\Omega_1$ ,  $\Omega_2$  позволяют организовать своеобразную прогонку с параметрами, коими являются граничные значения температуры  $\bar{T}_m$ , и найти сначала сами эти значения, а затем и распределение температуры в областях  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ .

Общая схема численного решения задачи состоит в осуществлении следующих этапов.

1. Переход на новый временной слой  $t^{k+1}$  начинается с расчета температуры  $T_1^{k+\frac{1}{2}}$  и  $T_2^{k+\frac{1}{2}}$  на промежуточном временном слое  $t^{k+\frac{1}{2}}$ . Расчет производится в каждой из областей  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ .

2. Затем, с помощью прогонки с параметрами, вычисляются значения температур  $T_i^{k+1}$ ,  $i=1, 2$ , на слое  $(k+1)$  одновременно в обеих областях  $\Omega_1$  и  $\Omega_2$ . Разработка и отладка процедуры восстановления характеристик теплового режима почв осуществлялась на одномерной задаче о распределении температуры в почве, имеющей неоднородную структуру почвенных пластов [7–10].

#### Результаты численных расчетов.

1. При расчете теплового поля суточные колебания температуры почвы затухают уже на глубине 40–60 см; сезонные же изменения распространяются на значительно большую глубину [1, 3]. В модели нижнюю границу поместили на расстоянии 160 см от поверхности почвы. Это объясняется наличием экспериментальных данных и отсутствием суточного хода температуры. Поэтому нижнее граничное условие по температуре на этой глубине внутри каждых суток считается постоянным, а его изменение в сезоне вегетации задается в виде зависимости от температуры воздуха.

2. Анализ многолетних данных показал существование лага, то есть смещения во времени температуры почвы на глубине 160 см по сравнению с изменением температуры воздуха (рис. 2). Минимум температуры почвы на глубине 160 см наблюдается в апреле, максимум — в сентябре. Наличие смещения позволило определить некоторый средний промежуток времени, на который необходимо сдвинуть уровни одного ряда относительно друго-

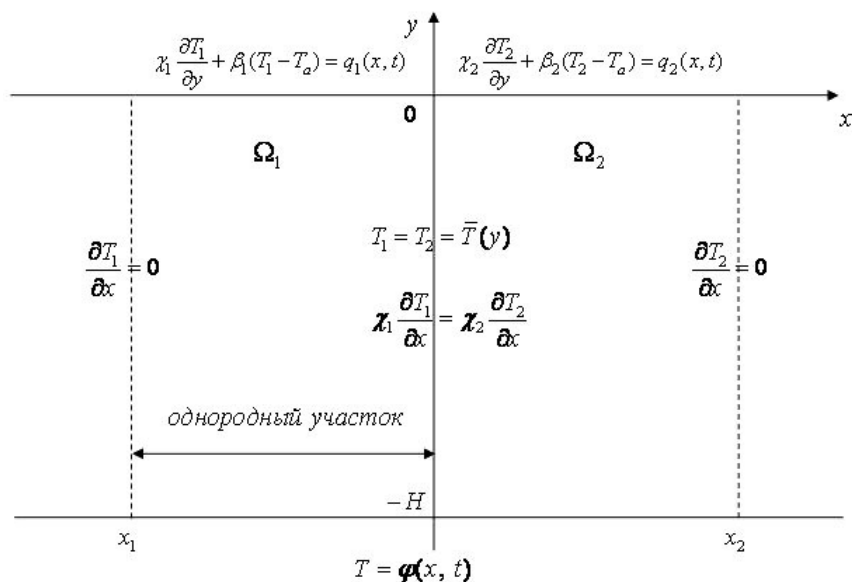
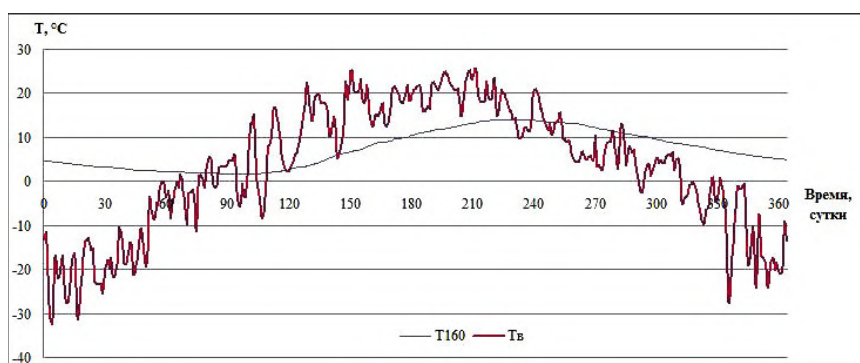
Рис. 1. Почвенный компармент  $\Omega = \Omega_1 \cup \Omega_2$ 

Рис. 2. Зависимость температуры воздуха и почвы на глубине 160 см

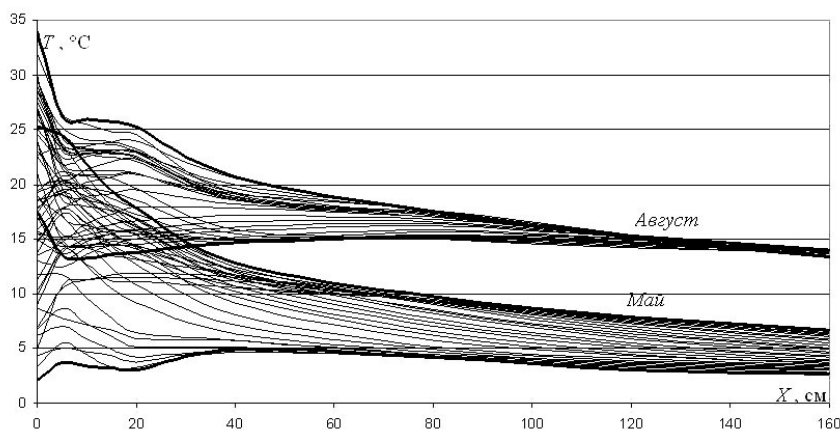


Рис. 3. Профили температуры почвы в различные периоды вегетации

го, и построить зависимость температуры почвы на глубине 160 см от температуры воздуха. Коэффициент корреляции между рядами динамики при этом хорошо характеризует тесноту связи и равен 0,91.

3. В период вегетации в течение каждых суток температура поверхности почвы достигает минимума, примерно, в момент восхода Солнца, максимума — когда Солнце находится в зените, после чего

вновь уменьшается.

4. Температура почвы на глубине 120–160 см не изменяется в течение суток, но имеет явно выраженный сезонный ход. Характерные профили температуры для мая и августа приведены на рис.3.

5. В математическую постановку задачи входят коэффициенты теплоемкости и теплопроводности, которые зависят от влажности и плотности почвы. Объемная теплоемкость почвы определяется

по формуле:

$$c(w) = \left( 0,2 + \frac{w}{100} \right) \rho.$$

6. Связь теплопроводности и влажности почвы хорошо аппроксимируется квадратичной зависимостью вида:

$$\chi(w) = c(w) (\lambda_1 (w - \lambda_4)^2 + \lambda_2 \rho + \lambda_3). \quad (5)$$

Неизвестные коэффициенты  $\lambda_i$ , входящие в (5), определены по литературным источникам и уточнены при проведении численных экспериментов:

$$\lambda_1 = -0,013; \lambda_2 = 3,1; \lambda_3 = 1,21; \lambda_4 = 20.$$

Численный алгоритм решения задачи реализован для неоднородного почвенного компартамента. Полученные результаты хорошо согласуются с данными по теплофизическим свойствам выщелоченных черноземов Алтайского Приобья. Они близки как по значениям, так и по характеру зависимостей, и отражают объективные почвенно-физические факторы. Результаты моделирования отражают динамику распределения температур по почвенному профилю в течение суток и в течение года. По результатам проведенных расчетов получены следующие выводы: коэффициент объемной теплоемкости линейно растет при увеличении влажности; коэффициент температуропроводности имеет ярко выраженный максимум при определенных влажностях; коэффициент теплопроводности нелинейно возрастает, стремясь к «насыщению». Теплофизические свойства почвы закономерно изменяются в зависимости от плотности сложения генетических горизонтов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке благотворительного фонда В. В. Потанина.*

#### Библиографический список

1. Хворова, Л. А. Динамическое моделирование и прогнозирование в агрометеорологии / Л. А. Хворова, А. Г. Топаж. — Барнаул : Изд-во АлтГУ, 2010. — 263 с.
2. Хворова, Л. А. Модель теплового режима почвы в пространственно-дифференцированных технологиях точного земледелия / Л. А. Хворова // Научно-технические ведомости СПбГПУ. — 2011. — № 4 (128). — С. 101–106.

3. Хворова, Л. А. Численное моделирование составляющих теплового режима почв Алтайского Приобья / Л. А. Хворова, А. В. Жариков // Известия АлтГУ. — 2013. — № 1/2. — С. 126–130.

4. Khvorova, L. A. Using of a dynamic computer model of the agricultural ecosystem for the operational and long-term forecasting of agricultural production / L. A. Khvorova, N. V. Gavrilovskaya // European Researcher. — 2012. — Vol. 20, № 5-1. — P. 499–502.

5. Хворова, Л. А. Математические модели в теории и практике точного земледелия / Л. А. Хворова // Известия АлтГУ. — 2011. — № 2. — С. 123–128.

6. Воеводин, А. Ф. Численные методы исследования конвективных течений: реализация метода расщепления по физическим процессам / А. Ф. Воеводин, О. Н. Гончарова, Т. В. Протопопова // Известия АлтГУ. — 2013. — № 1/1. — С. 88–93.

7. Брыксин, В. М. Математическое моделирование и информационные технологии в экологии и природопользовании / В. М. Брыксин, Н. В. Гавриловская, А. Г. Топаж, Л. А. Хворова. — Барнаул : Изд-во АлтГУ, 2013. — 256 с.

8. Хворова, Л. А. Применение информационных технологий, математических методов и моделей для обработки и анализа многомерных данных / Л. А. Хворова, Н. В. Гавриловская, Н. Н. Лопатин // Известия АлтГУ. 2006. — № 1. — С. 83–88.

9. Гавриловская, Н. В. Информационно-прогностическая система сбора, обработки, анализа и обобщения агрометеорологической информации / Н. В. Гавриловская, Л. А. Хворова // Известия АлтГУ. — 2010. — №1/1. — С. 65–68.

10. Хворова, Л. А. Методы исследования чувствительности моделей продуктивности агроэкосистем / Л. А. Хворова // Известия АлтГУ. — 2013. — №1/1. — С. 128–132.

**БОЯРСКАЯ Алина Викторовна**, магистрант гр. 447ММИТ факультета математики и информационных технологий.

Адрес для переписки: bosya\_241292@mail.ru

**ХВОРОВА Любовь Анатольевна**, кандидат технических наук, доцент (Россия), профессор кафедры теоретической кибернетики и прикладной математики.

Адрес для переписки: KhvorovaLA@gmail.com

Статья поступила в редакцию 15.06.2015 г.

© А. В. Боярская, Л. А. Хворова

## Книжная полка

004.7/Г27

**Гегечкори, Е. Т. Информационные системы в производстве : учеб. электрон. изд. локального распространения : учеб. пособие / Е. Т. Гегечкори, О. Б. Малков. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — 1 о=эл. опт. диск (CD-ROM).**

Излагаются основные концепции управления, широко использующиеся на промышленных предприятиях различного профиля во всем мире. Рассматриваются эволюция систем управления — от самых простых к более сложным (MRP-системы), новые, только получающие широкое распространение компьютерные системы (APS-системы), теория ограничений и теория «Точно вовремя», некоторые практические аспекты использования корпоративных компьютерных систем (ERP-систем), а также место ERP-систем в информационном пространстве предприятия и возможности интеграции ERP-систем с другими системами. Учебное пособие предназначено для студентов заочной формы обучения специальности 080801 «Прикладная информатика (в экономике)», а также для сотрудников отделов информационных технологий компаний, специалистов по управлению — всех тех, кто будет выбирать, внедрять и использовать эти системы.

## СЕТИ FANET

**В данной работе рассматривается одно из самых перспективных направлений развития беспроводных самоорганизующихся сетей, так называемые сети FANET (англ. Flying Ad Hoc Network) на основе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). В статье исследуются вопросы и нерешенные проблемы по организации связи в сетях FANET. Представлен обзор существующих протоколов для физического уровня, управления доступом к среде, сетевого и транспортного уровня.**

**Ключевые слова:** беспроводные самоорганизующиеся сети, беспилотные летательные аппараты, БПЛА, одноранговые сети, летающие самоорганизующиеся сети, FANET.

FANET (англ. Flying Ad Hoc Network) по аналогии с мобильными одноранговыми сетями MANET (англ. Mobile Ad Hoc Network) и автомобильными одноранговыми сетями VANET (англ. Vehicular Ad Hoc Network) представляет особый вид одноранговой самоорганизующейся сети на основе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [1]. Эти сети обеспечивают широкий спектр для гражданского и коммерческого применения. Организация такого вида связи необходима не только для выполнения задач по обеспечению наблюдения, мониторинга, но и, например, для эффективной координации движения транспортных средств, повышения уровня безопасности (например, в качестве средства для предотвращения столкновений) и т.д.

Быстрое изменение топологии и движение в 3D-пространстве накладывает множество дополнительных трудностей на физическом уровне (англ. physical layer, PHY), управлении доступом к среде (англ. media access control, MAC) и сетевом уровне.

В этом исследовании рассматриваются различные аспекты и нерешенные проблемы по организации связи в сетях FANET. Представлен обзор существующих протоколов физического уровня, управления доступом к среде, сетевого и транспортного уровня.

**Физический уровень.** На физическом уровне рассматриваются основные технологии передачи сигналов, например, модуляции или кодирования сигнала. Различные последовательности бит данных могут быть представлены с помощью различных сигналов путем изменения частоты, амплитуды и фазы сигнала. В целом, на физическом уровне биты данных модулируются для синусоидальных сигналов и передается по воздуху за счет использования антенн.

Производительность сети MANET в значительной степени зависит от физического уровня, а крайне высокая мобильность узлов сети создает дополнительные сложности при реализации сети FANET. Для того, чтобы разработать надежную и стабильную архитектуру передачи данных, физический уровень должен быть хорошо изучен и описан. Исследования моделей распространения радиоволн и структуры антенн являются ключевыми факторами, влияющими на физический уровень FANET.

**Модель распространения радиоволн.** Электромагнитные волны распространяются от передатчика к приемнику через беспроводные каналы связи. Сеть FANET имеет ряд специфических проблем с точки зрения распространения радиоволн по сравнению с другими типами беспроводных сетей. Отметим важнейшие проблемы:

- распространение радиоволн;
- диаграмма направленности антенн;
- влияние отражения от поверхности земли;
- подавление помех от бортового электронного оборудования БПЛА;
- влияние пространственного положения БПЛА относительно Земли (тангаж, крен, рыскание и т. д.) на качество беспроводного соединения;
- природно-климатические условия;
- интерференция и помехозащищенность от деструктивного воздействия.

Вследствие действия указанных факторов качество связи может значительно изменяться.

В работе [2] исследована проблема организации канала связи для сценария типа БПЛА-БПЛА (рис. 1). В этой топологии каждый ведомый БПЛА (например, БПЛА 1) передает свои данные главному БПЛА К, а он, в свою очередь, передает информацию на наземную базовую станцию. По результатам исследований было отмечено, что статистика ошибок в беспроводных каналах между БПЛА не является величиной постоянной. В зависимости от изменения расстояния между БПЛА была предложена Марковская модель с двумя состояниями для включения эффектов замирания сигналов с распределением Райса, которое подойдет для траектории радиоволны при распространении в пределах прямой видимости, как в FANET. Результаты моделирования показали, что предложенная модель способна имитировать потерю пакетов с изменяющимся значением ошибок.

В работе [3] предлагается модель распространения радиоволн для FANET. Полученные результаты согласуются с эмпирическими данными, полученными для сетей VANET. Предложенная модель оценивает мощность принимаемого сигнала в условиях многолучевого распространения с учетом эффекта замирания сигнала и представляется в виде функции двух параметров: среднего значения мощности

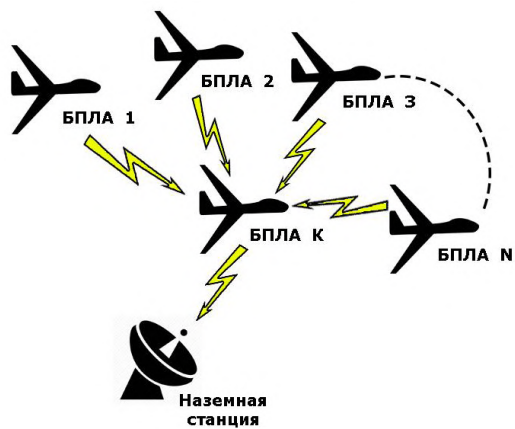
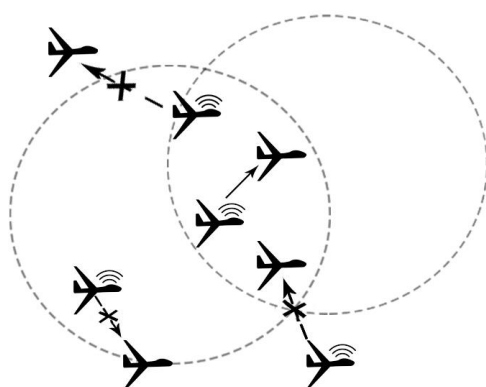
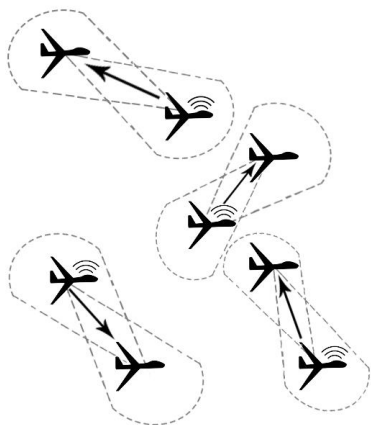


Рис. 1. Схема организации канала связи



### Всенаправленная антенна



### Направленная антенна

Рис. 2. Наглядный пример, демонстрирующий преимущества при использовании направленных антенн

полученного радиосигнала и интенсивности замирания.

Анализ эффективности многоканальной ретрансляции на основе сети БПЛА был смоделирован аналитически с учетом замирания каналов в [4]. Общая аналитическая формула была предоставлена для вероятности отключения связи в сценариях БПЛА-БПЛА и БПЛА-земля. Было отмечено, что модель замирания канала должна быть выбрана в соответствии с условиями эксплуатации. Например, рэлеевские замирания являются более

подходящими для применения на малых высотах и в людных местах,  $m$ -распределение Накагами и распределение Вейбулла лучше подходят для космических полетов на больших высотах.

**Конструкции антенн для FANET.** Структура антенны является одним из наиболее важных факторов для эффективной коммуникационной архитектуры FANET. Расстояние между БПЛА, как правило, больше, чем среднее значение для узлов в сетях MANET и VANET, а это непосредственно влияет на конструкцию антенны. Более мощные приемопередатчики могут быть использованы для решения этой проблемы, но при распространении на большие расстояния могут возникнуть высокие потери в канале связи. В работе [5] доказано, что одним из эффективных решений является использование нескольких приемопередатчиков на каждом из узлов сети.

Тип антенны является еще одним фактором, который влияет на производительность сети FANET. Существуют два основных типа антенн, используемых в FANET: направленного и всенаправленного действия.

В мобильной среде, такой как FANET, расположение узлов часто меняется и, как следствие этого, всенаправленные антенны имеют естественное преимущество. При использовании всенаправленных антенн не требуется иметь информацию о местоположении узла. Однако направленные антенны также имеют ряд преимуществ по сравнению с всенаправленными антеннами (рис. 2). Во-первых, дальность передачи системы с направленной антенной больше, чем радиус действия сигнала всенаправленной антенны. Это может быть важным преимуществом для FANET, где расстояние между узлами значительно больше, чем среднее расстояние между узлами в MANET. С увеличением эффективной дальности передачи уменьшается количество переходов, что позволяет увеличить производительность и уменьшить задержку.

Повышение уровня безопасности является еще одним вопросом, который может быть частично решен за счет применения направленных антенн. Системы, основанные на использовании всенаправленных антенн, более уязвимы перед угрозой воздействия преднамеренных помех.

Характеристики физического уровня напрямую влияют на структуру других уровней и на производительность FANET в целом. Несмотря на то что узлы сети расположены в 3D-пространстве, большинство существующих исследований использует 2D-структуру топологии FANET. Как показали исследования, поведение антенны в 3D-пространстве может отличаться от поведения в 2D [6], а это может непосредственно повлиять на физический уровень. Анализ производительности существующих протоколов физического уровня и разработки новых моделей физического уровня для 3D-пространства во многом остаются неизученными вопросами для сетей FANET.

**MAC-уровень.** Наиболее важным для эффективной работы радиосетей с коммутацией пакетов является канальный уровень, точнее его MAC-подуровень, который обеспечивает адресацию и механизмы управления доступом к каналам.

Несмотря на то что MANET, VANET и FANET имеют различные проблемы и характеристики, у них есть ряд общих конструктивных особенностей. В целом FANET является подмножеством MANET и VANET. В этом смысле первые примеры



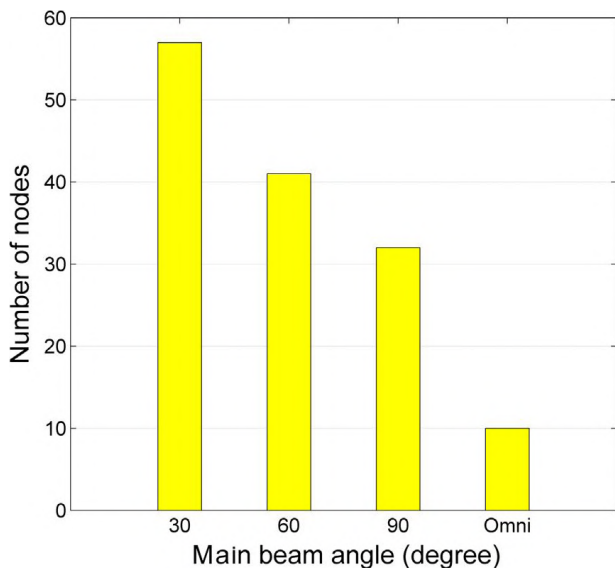


Рис. 3. Зависимость максимального количества активных узлов от значения угла главного луча для 30°, 60°, 90° и всенаправленной антенны

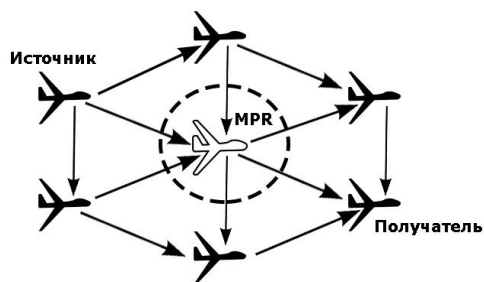


Рис. 4. Множества транзитных узлов MPR

реализации FANET используют стандарт IEEE 802.11 с всенаправленными антеннами. С помощью RTS/CTS (англ. Request To Send/Clear To Send — запрос на отправку/разрешение отправки) — механизм CSMA/CA, используемый в беспроводных сетях стандарта IEEE 802.11 для исключения коллизий кадров и в качестве способа для решения проблем «скрытого узла» и «незащищенного узла» [7].

Высокая мобильность является одним из наиболее характерных свойств FANET, вследствие нее и большого различия расстояний между узлами часто возникают проблемы с качеством канала связи. Изменения значения задержки при передаче пакетов — это еще одна из проблем MAC-уровня в FANET. Особенно это критично для приложений реального времени. Направленные антенны, полнодуплексный радиоканал являются примерами перспективных технологических достижений, которые могут быть использованы в FANET для MAC-уровня [8].

В работе [LODMAC: Location Oriented Directional MAC protocol for FANETs] рассмотрен протокол LODMAC (англ. Location Oriented Directional MAC protocol for FANET), который обеспечивает как эффективный способ использования передачи данных с помощью направленных антенн, так и метод определения и распространения данных о точном местоположении узлов.

В этом случае предполагается, что каждый БПЛА в FANET оборудован двумя приемопередатчиками.

Один приемопередатчик применяется для оценки местоположения и отвечает за управление обменом пакетами, а второй применяется только для передачи данных. В качестве направленной антенны предлагается использовать антенну с коммутируемым лучом, в которой каждый из лучей занимает достаточно узкий угловой сектор. Как показано на рис. 3 [9], значение угла главного луча оказывает существенное влияние на максимальное количество активных БПЛА. Кроме этого, при узких углах возможно установление большего количества одновременных соединений.

**Сетевой уровень.** Первоначальные исследования и эксперименты в области сетей FANET были разработаны на основе существующих протоколов маршрутизации для MANET.

В одном из первых экспериментов с архитектурой FANET использовался проактивный протокол TBRPF (Topology dissemination base on reverse-path forwarding). Проактивные протоколы маршрутизации заранее строят маршруты между всеми узлами сети и поддерживают на каждом узле актуальную таблицу маршрутизации. Неотъемлемой частью таких протоколов маршрутизации является механизм управления соединениями, который устанавливает логические соединения между узлами сети, находящимися в зоне слышимости друг друга, а также закрывает логические соединения. Все станции распространяют информацию об установленных логических соединениях по сети. Таким образом, каждая из станций децентрализованно строит логическую топологию сети и заполняет свою таблицу маршрутизации [10]. Кроме того, проактивные протоколы маршрутизации обеспечивают минимальную задержку доставки пакетов данных, а при изменении топологии сети инициируется широковещательная рассылка сообщений об этих изменениях [11].

В работе [12] предложен реактивный протокол DSR (англ. Dynamic Source Routing). В реактивных протоколах маршрутизации маршруты существуют только тогда, когда они необходимы, то есть когда по ним ведется передача данных. При первоначальном определении маршрута пакеты отправляются по всем возможным направлениям, в заголовок добавляется информация о пройденном узле. В итоге, по достижении цели, заголовок пакета содержит полностью сформированный маршрут между заданными узлами. В случае возникновения петель, т.е. повторного приема первого пакета, узел уничтожает данный пакет [13].

Из-за высокой подвижности узлов в FANET поддержание таблицы маршрутизации, как в проактивных протоколах, не является оптимальным. Тем не менее повторяющиеся запросы поиска пути перед каждой доставкой пакетов, как это происходит в протоколах реактивной маршрутизации, могут быть исчерпывающими.

В отдельную группу протоколов маршрутизации можно выделить протоколы, использующие данные о местоположении абонентов сети. Протоколы гео-маршрутизации удовлетворяют основным требованиям FANET. Например, протокол GPSR (англ. Greedy Perimeter Stateless Routing). Эта группа протоколов показывает лучшие результаты при использовании для FANET, особенно в сетях с высокой плотностью узлов.

Для систем с немногочисленными БПЛА надежность может быть серьезной проблемой, поэтому рекомендуется использовать протоколы геомаршрутизации в сочетании с проактивными протоколами,

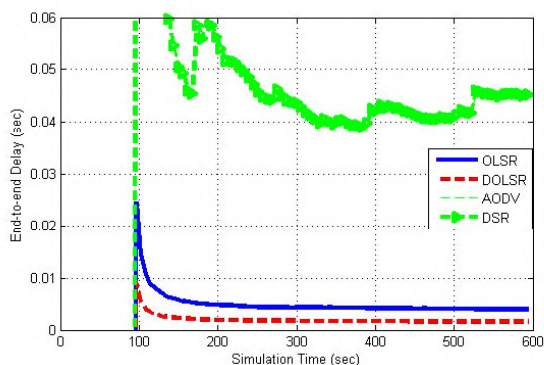


Рис. 5. Сравнение между протоколами OLSR, DOLSR, AODV и DSR по задержке

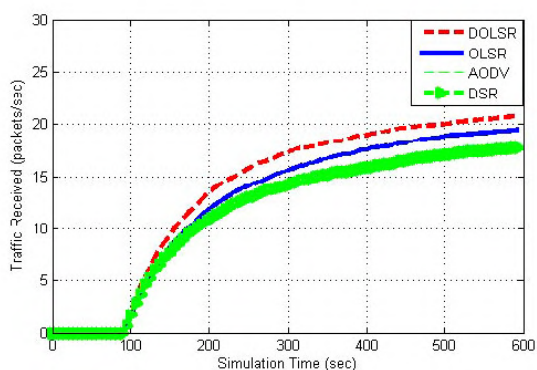


Рис. 6. Сравнение протоколов OLSR, DOLSR, AODV и DSR по количеству полученного трафика

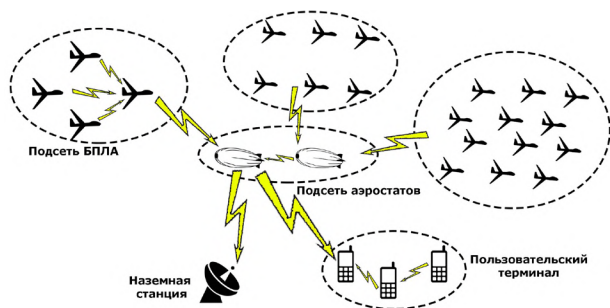


Рис. 7. Система связи для сетей БПЛА

особенно для приложений, требующих 100 % надежности.

На основе известного проактивного протокола OLSR (англ. Optimized Link State Routing Protocol) международной группой ученых был разработан новый протокол маршрутизации с использованием направленной антенны, получивший название DOLSR (англ. Directional Optimized Link State Routing Protocol) [14]. Одними из наиболее важных факторов, которые влияют на производительность OLSR, является выбор множества транзитных узлов MPR (англ. multipoint relay nodes), которые оказывают существенное влияние на задержку (рис. 4).

Использование направленных антенн позволяет уменьшить количество транзитных узлов и, как следствие этого, уменьшается время задержки, которая является важным критерием сети FANET. Задержка при использовании всенаправленной ан-

тенны выше, чем направленной, а разница в значении задержки между AODV/DSR и OLSR/DOLSR объясняется принципиальными различиями в работе реактивных и проактивных протоколов (рис. 5). Из сравнения (рис. 6) протоколов DOLSR, OLSR, AODV и DSR, видно, что DOLSR имеет самый лучший показатель по количеству полученного трафика, такой результат был достигнут за счет уменьшения количества управляющих сообщений.

Другим вариантом классического дистанционно векторного протокола является AODV (англ. Ad-hoc On-Demand Distance Vector). Протокол строит таблицы маршрутизации на каждом узле сети для минимизации времени передачи информации между узлами и находит пути маршрутизации независимо от использования маршрутов.

Еще одним из решений для маршрутизации в FANET являются иерархические протоколы, которые были разработаны для решения проблемы масштабируемости сети, как изображено на рис. 7. Гибридные протоколы маршрутизации сочетают в себе преимущества реактивных и проактивных протоколов маршрутизации, которые могут быть использованы как отдельно, так и одновременно в одной сети. К недостаткам гибридных протоколов относятся относительная сложность реализации и снижение эффективности маршрутизации, связанные с необходимостью разбиения структуры сети на кластеры. Один из самых известных гибридных протоколов является HWMP (англ. Hybrid Wireless Mesh Protocol) [15].

Маршрутизация является одной из наиболее сложных проблем для FANET. Существующие решения не могут удовлетворить всех требований FANET. Таким образом, остается актуальным направление по разработке протоколов маршрутизации для FANET.

**Транспортный уровень.** Успех проектов FANET тесно связан с надежностью коммуникационной архитектуры, а создание надежного транспортного механизма имеет важное значение, особенно в высокоскоростной среде.

Основные функции транспортного протокола для FANET заключаются в следующем:

- надежность является основной задачей для транспортных протоколов в сетях связи. Сообщения должны доставляться надежно к узлу назначения для обеспечения надлежащих функциональных возможностей. Поэтому транспортные протоколы должны поддерживать различные уровни надежности в зависимости от используемых приложений в FANET;

- механизм управления перегрузкой является необходимым для достижения эффективной и надежной работы FANET. Типичными последствиями перегруженной сети являются снижение коэффициента доставленных пакетов и увеличение задержки. Если сеть перегружена, обеспечение защиты от столкновений между БПЛА не может быть выполнено должным образом;
- управление потоком по-прежнему остается серьезной проблемой, особенно для разнородных систем мульти-БПЛА.

Первые системы FANET были реализованы на основе существующих транспортных протоколов TCP и UDP. Протокол TCP плохо работает в сетях MANET и не подходит для использования в FANET.

Совместная архитектура для беспилотных систем JAUS (Joint Architecture for Unmanned Systems) является развивающимся стандартом для обмена

сообщениями между беспилотными системами [16]. Хотя JAUS изначально был разработан для наземных систем, позднее он стал общим для всех видов беспилотных аппаратов (воздушных, наземных, надводных и подводных транспортных средств).

AS5669A определяет передачу данных для JAUS, и это делает возможным использование эффективных транспортных протоколов, которые имеют свои собственные форматы пакетов и семантики. В AS5669a JTCP/JUDP разработан поверх TCP/UDP. JAUS также предлагает протокол JSerial, который поддерживает пакеты данных переменной длины при низкой пропускной способности по последовательному каналу.

На сегодняшний день архитектура JAUS доказала свою эффективность благодаря активному использованию в большом числе проектов, поэтому военные, гражданские и коммерческие организации намерены внедрять ее в робототехнические комплексы самого разного масштаба, в том числе и в сетях FANET.

**Заключение.** Приложения FANET используют различные типы данных, такие как изображения, звуковые сигналы и др. Эти приложения предъявляют разные требования к уровню надежности. С другой стороны, трафик мультимедийных данных имеет и ряд других жестких требований по задержке, пропускной способности и джиттеру (колебанию задержки при передаче пакетов). Таким образом, необходимо разработать новые решения для транспортного уровня, удовлетворяющие требованиям различных приложений FANET.

Организация связи для группы БПЛА является одной из самых сложных задач. В этой статье были рассмотрены особенности FANET с точки зрения мобильности, плотности узлов, изменения топологии, модели распространения радиоволн и локализации. Представлен обзор существующих протоколов физического уровня, управления доступом к среде, сетевого и транспортного уровня. На сегодняшний день остаются неисследованными такие аспекты, как разработка новых моделей антенн для БПЛА и протоколов MAC-уровня. Кроме этого, создание собственных и совершенствование существующих алгоритмов маршрутизации с целью повышения эффективности передачи данных является актуальной задачей для сетей типа FANET.

#### Библиографический список

1. I. Bekmezci, O. K. Sahingoz, S. Temel, Flying Ad-Hoc Networks (FANETs): A Survey, *Ad Hoc Networks*, 2013, Vol. 11, № 3, pp. 1254–1270.
2. Y. Zhou, J. Li, L. Lamont, C. Rabbath, Modeling of packet dropout for UAV wireless communications, in: *International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 2012, pp. 677–682.
3. I. Y. Abualhaol, M. M. Matalgah, Outage probability analysis in a cooperative UAVs network over nakagami-m fading channels, in: *IEEE Conference on Vehicular Technology*, 2006, pp. 1–4.

4. I. Y. Abualhaol, M. M. Matalgah, Performance analysis of cooperative multi-carrier relay-based UAV networks over generalized fading channels, *International Journal of Communication Systems*, 2011, Vol. 24, № 8, pp. 1049–1064.
5. H. T. Kung, C.-K. Lin, T.-H. Lin, S. J. Tarsa, D. Vlah, Measuring diversity on a low-altitude UAV in a ground-to-air wireless 802.11 mesh network, in: *IEEE Globecom Workshops*, 2010, pp. 1799–1804.
6. N. Ahmed, S. Kanhere, S. Jha, Link characterization for aerial wireless sensor networks, in: *GLOBECOM Wi-UAV Workshop*, 2011, pp. 1274–1279.
7. P. Chatzimisios, A. C. Boucouvalas, V. Vitsas, Effectiveness of RTS/CTS handshake in IEEE 802.11 a wireless LANs, *Electronics Letters*, 2004, Vol. 40, № 14, pp. 915–916.
8. J. I. Choi, M. Jain, K. Srinivasan, P. Levis, S. Katti, Achieving single channel, full duplex wireless communication, in: *Proceedings of the Sixteenth Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, 2010, pp. 1–12.
9. T. Samil, B. Ilker, LODMAC: Location Oriented Directional MAC protocol for FANETs, *Computer Networks*, 2015, Vol. 83, № 4, pp. 76–84.
10. Анализ механизмов построения логической топологии в сетях MANET / А. Кирьянов [и др.] // Информационные процессы. – 2015. – Т. 15. – № 2. – С. 183–197.
11. Прозоров, Д. Е. Протокол иерархической маршрутизации самоорганизующейся мобильной сети / Д. Е. Прозоров, С. В. Романов // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. – 2014. – Т. 15. – № 3. – С. 74–80.
12. T. Brown, S. Doshi, S. Jadhav, D. Henkel, R. Thekkekkunnel, A full scale wireless ad hoc network test bed, in: *Proc. of International Symposium on Advanced Radio Technologies*, 2005, pp. 50–60.
13. Павлов, А. А. Протоколы маршрутизации в беспроводных сетях / А. А. Павлов, И. О. Датъев // Труды Кольского научного центра РАН. – 2014. – Т. 24. – № 5. – С. 64–75.
14. A. I. Alshabtat, L. Dong, J. Li, F. Yang, Low latency routing algorithm for unmanned aerial vehicles ad-hoc networks, *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2010, Vol. 6, № 1, pp. 48–54.
15. Зацепин, Э. С. Обзор характеристик протоколов маршрутизации в mesh-сетях / Э. С. Зацепин // Международный журнал экспериментального образования. – 2013. – Т. 10. – № 2. – С. 342–345.
16. R. Wade, Joint architecture for unmanned systems, in: *Proc. of 44th Annual Targets, UAVs & Range Operations Symposium & Exhibition, 2006* [Electronic resource]. – Mode of Access : <http://www.dtic.mil/ndia/2006targets/Wade.pdf> (Date of Access: 15.09.2015).

**ЛЕОНОВ Алексей Викторович**, начальник сектора Internet-технологий Центра телекоммуникаций и вычислительной техники; соискатель по кафедре средств связи и информационной безопасности.

Адрес для переписки: kot@omgtu.ru

**ЧАПЛЫШКИН Владислав Андреевич**, студент гр. ИСС-121 радиотехнического факультета.

Адрес для переписки: cva@omgtu.ru

Статья поступила в редакцию 28.03.2015 г.

© А. В. Леонов, В. А. Чаплышкин

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВОЙСТВ СВЯЗЕЙ В ЗАДАЧЕ ПОСТРОЕНИЯ СХЕМ РЕЛЯЦИОННЫХ БАЗ ДАННЫХ

В данной статье исследуются свойства связей между атрибутами сущностей. Вводятся понятия: «область определения связи», «область значений связи», «композиция связей», строится матрица композиций связей. Связи и их свойства положены в основу разрабатываемого метода построения схем реляционных баз данных. Использование композиции связей позволяет осуществлять логический вывод новых связей, уменьшить число ручных операций при построении схем баз данных и сделать процесс проектирования схем баз данных более наглядным.

**Ключевые слова:** схемы реляционных баз данных, построение схем баз данных, модели данных, ER-модель.

**1. Введение.** В настоящее время существует достаточно много работ, посвящённых исследованию принципов и методов формирования схем реляционных баз данных (БД). Несмотря на это, формализация процесса формирования схем реляционных баз данных остаётся важной задачей теории и практики.

В настоящее время для моделирования БД на инфологическом уровне чаще всего используются различные варианты модели «Сущность – Связь» [1–3]. Одним из недостатков этой модели является то, что при её использовании процесс формирования БД строго не формализуется.

Существуют модели, поддерживающие более строгий процесс проектирования БД [4–8]. С этими моделями планируется сравнивать метод, в основу которого положены рассматриваемые в данной статье понятия.

В данной работе вводятся понятия «связь», «область определения связи», «область значений связи» и рассматривается композиция связей. Эти понятия используются в разрабатываемом методе построения схем реляционных БД [9].

Данный метод обладает следующими свойствами:

- высокий уровень формализации процесса получения схем БД;

- наличие выразительных средств, сравнимых с возможностями диаграмм «Сущность – Связь», обеспечивающих наглядность и удобство построения схем БД для конечного пользователя;

- возможность автоматизации процесса построения схем БД.

**2. Связи между атрибутами.** В разрабатываемом методе построения схем реляционных БД [9] большую роль играют связи между атрибутами сущностей. Формализуем понятие «связь».

*Определение 1.* Пусть  $A$  и  $B$  — множества, не обязательно различные. Связью  $RS$  из  $A$  в  $B$  является правило сопоставления элементов множества  $A$  с элементами множества  $B$ , такое, что  $RS \subseteq A \times B$ , где  $RS$  множество пар:  $\langle a_i, b_i \rangle$ , где  $a_i \in A$ ,  $b_i \in B$ ,  $1 \leq i \leq k$ ,  $k$  — мощность  $RS$ .

По определению 1 понятие «связь» полностью

эквивалентно математическому понятию *соответствие (correspondence)* [10].

*Определение 2.* Триплет  $C = (RS, A, B)$  — является соответствием или связью из  $A$  в  $B$ , где  $RS \subseteq A \times B$ ,  $A$  и  $B$  — множества, не обязательно различные.

Соответствие может иметь область определения и область значений.

*Определение 3.* Областью определения соответствия (связи)  $RS$  называется множество  $Dom RS = \{ a \in A \mid \exists b \in B : (a, b) \in RS \}$ , где  $A$  и  $B$  — множества, не обязательно различные.

*Определение 4.* Областью значений соответствия (связи)  $RS$  называется множество  $Ran RS = \{ b \in B \mid \exists a \in A : (a, b) \in RS \}$ , где  $A$  и  $B$  — множества, не обязательно различные.

Рассмотрим случай. Пусть  $A$  и  $B$  — множества,  $RS$  — связь из  $A$  в  $B$ ,  $Dom RS$  — область определения связи  $RS$ . Пусть  $Dom RS \subset A$ , (рис. 1). Тогда, кроме множества кортежей  $\langle a, b \rangle$ , где  $a \in A$ ,  $b \in B$ , имеем множество элементов  $NoDom RS = A \setminus Dom RS$ . Все элементы  $a \in NoDom RS$  не имеют соответствий во множестве  $B$ . Так как связь определяется как подмножество декартова произведения  $A \times B$ , то для того чтобы все значения  $a \in NoDom RS$  представить в виде кортежей, введём символ отсутствующего значения — *Null*. Таким образом, для всех значений  $a \in NoDom RS$  получим множество кортежей вида  $\langle a, Null \rangle$ . Обозначение *Null* в теории баз данных в разных работах может иметь различную интерпретацию, например, значение неопределённо, значение неизвестно.

В данной работе обозначение *Null* отражает понятие — *пустое множество*. Интерпретация *Null* как пустого множества не эквивалентно часто используемой в литературе интерпретации *Null* как неопределённого значения. Эта разница интерпретаций отражена ниже в следствии 1 из определения 5.

С учётом возможности случаев подобных вышеописанному уточним определение понятия «связь».

*Определение 5.* Пусть  $A$  и  $B$  — множества,  $Dom RS$  — область определения связи  $RS$ ,  $Ran RS$  — область значений связи  $RS$ ,  $NoDom RS = A \setminus Dom RS$ ,  $NoRan = B \setminus Ran RS$ .

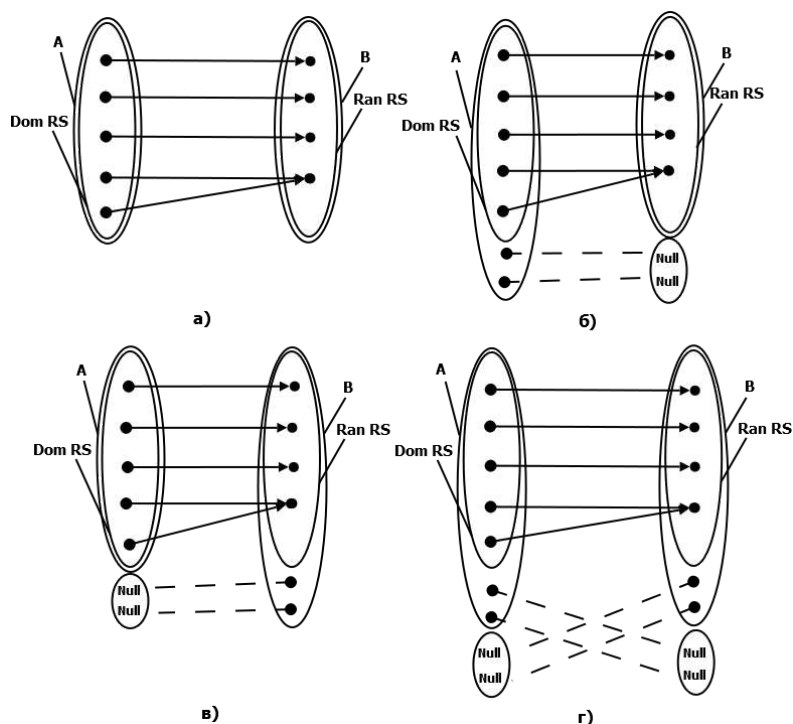


Рис. 1. Связь с областью определения и областью значений

- а) случай, когда  $Dom RS = A$  и  $Ran RS = B$ ;  
 б) случай, когда  $Dom RS \subset A$  и  $Ran RS = B$ ;  
 в) случай, когда  $Dom RS = A$  и  $Ran RS \subset B$ ;  
 г) случай, когда  $Dom RS \subset A$  и  $Ran RS \subset B$

1. Если  $Dom RS = A$  и  $Ran RS = B$ , то связью  $RS$  из  $A$  в  $B$  будет множество  $RS \subseteq A \times B$ ;

2. Если  $Dom RS \subset A$  и  $Ran RS = B$ , то связью  $RS$  из  $A$  в  $B$  будет множество  $RS = X \cup Y$ , где  $X \subseteq A \times B$  и  $Y$  — множество пар вида:  $\langle a_i, Null \rangle$ , где  $a_i \in NoDom RS$ ,  $Null$  — символ пустого множества,  $1 \leq i \leq k$ ,  $k$  — мощность  $NoDom RS$ ;

3. Если  $Dom RS = A$  и  $Ran RS \subset B$ , то связью  $RS$  из  $A$  в  $B$  будет множество  $RS = X \cup Y$ , где  $X \subseteq A \times B$  и  $Y$  — множество пар вида:  $\langle Null, b_j \rangle$ , где  $b_j \in NoRan RS$ ,  $Null$  — символ пустого множества,  $1 \leq i \leq k$ ,  $k$  — мощность  $NoRan RS$ ;

4. Если  $Dom RS \subset A$  и  $Ran RS \subset B$ , то связью  $RS$  из  $A$  в  $B$  будет множество  $RS = X \cup Y \cup Z$ ,  $X \subseteq A \times B$  и  $Y$  — множество пар вида:  $\langle a_i, Null \rangle$ , где  $a_i \in NoDom RS$ ,  $1 \leq i \leq k$ ,  $k$  — мощность  $NoDom RS$ ,  $Z$  — множество пар вида:  $\langle Null, b_j \rangle$ , где  $b_j \in NoRan RS$ ,  $1 \leq i \leq n$ ,  $n$  — мощность  $NoRan RS$ ,  $Null$  — символ пустого множества.

На рис. 1 представлена связь с областью определения и областью значений в соответствии с определением 5.

Определение 1 является частным определением связи, когда связь полностью эквивалентна понятию «соответствие». Определение 5 является определением понятия «связь» в общем случае, когда в состав связи входят не только кортежи принадлежащие соответствию, но и множество кортежей специального вида.

**Следствие 1.** Пусть  $A$  и  $B$  — множества,  $RS$  — связь из  $A$  в  $B$ .  $Dom RS$  — область определения связи  $RS$ ,  $Ran RS$  — область значений связи  $RS$ ,  $NoDom RS = A \setminus Dom RS$ ,  $NoRan = B \setminus Ran RS$ . Так как  $NoDom RS \cap Dom RS = \emptyset$ , то  $\{a \in A \mid a \in Dom RS \vee a \in NoDom RS\}$  и так как  $NoRan RS \cap Ran RS = \emptyset$ , то  $\{b \in B \mid b \in Ran RS \vee b \in NoRan RS\}$ .

В соответствии с определениями 1 и 5, связь — это правило сопоставление элементов одного множества с элементами другого множества. Для практики проектирования схем БД имеет значение некоторое множество таких правил (связей).

Опираясь на [11], выделим некоторое множество связей, которое обычно применяется при проектировании схем БД. Это множество связей будем называть *типами связей*.

**Определение 6.** Пусть  $A$  и  $B$  — множества, не обязательно различные, существует связь из  $A$  в  $B$ ,  $a \in A$ ,  $b \in B$ . Тогда типом связи будем называть один из вариантов правил сопоставления элементов из множества  $A$  с элементами из множества  $B$ , описанных в табл. 1.

Все рассматриваемые связи между атрибутами будут всегда принадлежать одному из типов связей представленных в табл. 1. В соответствии с определением типов связей (табл. 1), связи являются направленными, то есть заданными из одного множества в другое множество, и двусторонними, то есть каждая связь предполагает обратную связь. Например, дана связь от  $A$  в  $B$  типа 11 ( $0..M:0..1$ ). Данную связь будем обозначать следующим образом:  $A \xrightarrow{0..M:0..1} B$ , эта связь предполагает обратную связь:  $B \xrightarrow{0..1:0..M} A$ .

### 3. Композиция связей.

**Определение 7.** Пусть  $A$ ,  $B$  и  $C$  — множества, не обязательно различные. Пусть  $RS_1$  — связь из  $A$  в  $B$  и  $RS_2$  — связь из  $B$  в  $C$ . Композицией связей  $RS_1$  и  $RS_2$  будет связь  $RS_3$  из  $A$  в  $C$  такая, что множество кортежей, принадлежащих этой связи, определяется алгоритмом 1.

#### Алгоритм 1

**Вход:**  $RS_1$  — связь из  $A$  в  $B$ ,  $RS_2$  — связь из  $B$  в  $C$   
**Выход:**  $RS_3$  — связь из  $A$  в  $C$

Типы связей

№ типа связи	Определение связи	Обозначение	Области определения и области значений типов связей
Тип 1	Для заданного $a$ имеется строго один элемент $b$ и для заданного $b$ имеется строго один элемент $a$	1..1:1..1	$Dom RS = A,$ $Ran RS = B$
Тип 2	Для заданного $a$ имеется не более одного элемента $b$ и для заданного $b$ имеется строго один элемент $a$	1..1:0..1	$Dom RS \subset A, Ran RS = B$
Тип 3	Для заданного $a$ имеется строго один элемент $b$ и для заданного $b$ имеется не более одного элемента $a$	0..1:1..1	$Dom RS = A, Ran RS \subset B$
Тип 4	Для заданного $a$ имеется не более одного элемента $b$ и для заданного $b$ имеется не более одного элемента $a$	0..1:0..1	$Dom RS \subset A, Ran RS \subset B$
Тип 5	Для заданного $a$ имеется строго один элемент $b$ и для заданного $b$ имеется не менее одного элемента $a$	1..M:1..1	$Dom RS = A,$ $Ran RS = B$
Тип 6	Для заданного $a$ имеется не менее одного элемента $b$ и для заданного $b$ имеется строго один элемент $a$	1..1:1..M	$Dom RS = A,$ $Ran RS = B$
Тип 7	Для заданного $a$ имеется не более одного элемента $b$ и для заданного $b$ имеется не менее одного элемента $a$	1..M:0..1	$Dom RS \subset A, Ran RS = B$
Тип 8	Для заданного $a$ имеется не менее одного элемента $b$ и для заданного $b$ имеется не более одного элемента $a$	0..1:1..M	$Dom RS = A, Ran RS \subset B$
Тип 9	Для заданного $a$ имеется строго один элемент $b$ и для заданного $b$ имеется $M$ элементов $a$ , где $M \geq 0$	0..M:1..1	$Dom RS = A, Ran RS \subset B$
Тип 10	Для заданного $a$ имеется $M$ элементов $b$ и для заданного $b$ имеется строго один элемент $a$ , где $M \geq 0$	1..1:0..M	$Dom RS \subset A, Ran RS = B$
Тип 11	Для заданного $a$ имеется не более одного элемента $b$ и для заданного $b$ имеется $M$ элементов $a$ , где $M \geq 0$	0..M:0..1	$Dom RS \subset A, Ran RS \subset B$
Тип 12	Для заданного $a$ имеется $M$ элементов $b$ и для заданного $b$ имеется не более одного элемента $a$	0..1:0..M	$Dom RS \subset A, Ran RS \subset B$
Тип 13	Для заданного $a$ имеется не менее одного элемента $b$ и для заданного $b$ имеется не менее одного элемента $a$	1..M:1..M	$Dom RS = A,$ $Ran RS = B$
Тип 14	Для заданного $a$ имеется не менее одного элемента $b$ и для заданного $b$ имеется $M$ элементов $a$ , где $M \geq 0$	0..M:1..M	$Dom RS = A, Ran RS \subset B$
Тип 15	Для заданного $a$ имеется $M$ элементов $b$ и для заданного $b$ имеется не менее одного элемента $a$	1..M:0..M	$Dom RS \subset A, Ran RS = B$
Тип 16	Для заданного $a$ имеется $M$ элементов $b$ и для заданного $b$ имеется $M$ элементов $a$ , где $M \geq 0$	0..M:0..M	$Dom RS \subset A, Ran RS \subset B$

```

for( $i := 0$  to count of  $RS_1$ )
for( $j := 0$  to count of  $RS_2$ )
if( $RS_1[i].B = RS_2[j].B$  and  $RS_1[i].B \neq Null$  and  $RS_2[j].B \neq Null$ ) then
<  $RS_1[i].A, RS_2[j].C$  > insert to  $RS_3$ 
if( $RS_1[i].B = Null$ ) then
<  $RS_1[i].A, component C$  with  $Null$  > insert to  $RS_3$ 
if( $RS_2[j].B = Null$ ) then
< component  $A$  with  $Null, RS_2[j].C$  > insert to  $RS_3$ 
end for
end for

```

Шестнадцать типов связей (табл. 1) образует 256 комбинаций композиций связей каждого типа с каждым. Эти комбинации композиций связей образуют матрицу композиций связей (рис. 2).

Только часть вариантов композиций связей, представленных на рис. 2, применимы для логического вывода.

Разработана программная реализация алгоритма 1 и программное обеспечение (ПО), реализующее матрицу композиций связей [12] (рис. 2). Данное ПО реализовано в виде web-приложения, поэтому можно интерактивно просматривать реализации

исходных связей и композиции связей для каждого из 256 возможных вариантов композиций связей. Разработано ПО, моделирующее композиции связей с возможностью использования атрибутов из реальных предметных областей [13].

**4. Пример использования областей определения связей и композиции связей.** Пусть в некоторой предметной области (ПрО) задана сущность со следующими атрибутами: *Таб\_Номер* — табельный номер сотрудника, *Номер\_Отдела* — номер отдела в котором работает сотрудник, *Номер\_Здания* — номер здания в котором находятся отделы. Также в данной ПрО заданы следующие бизнес-правила:

- в каждом отделе может работать не менее одного сотрудника;
- каждый сотрудник может работать не более чем в одном отделе (0 или 1);
- в одном здании может располагаться не менее одного отдела (нет зданий, в которых нет отделов);
- каждый отдел располагается строго в одном здании.

Введённые в разделе 2 связи позволяют лаконично представить информацию из заданной

	1..1:1..1	1..1:0..1	0..1:1..1	0..1:0..1	1..M:1..1	1..1:1..M	1..M:0..1	0..1:1..M	0..M:1..1	1..1:0..M	0..M:0..1	0..1:0..M	1..M:1..M	0..M:1..M	1..M:0..M	0..M:0..M
1..1:1..1	1..1:1..1	1..1:0..1	0..1:1..1	0..1:0..1	1..M:1..1	1..1:1..M	1..M:0..1	0..1:1..M	0..M:1..1	1..1:0..M	0..M:0..1	0..1:0..M	1..M:1..M	0..M:1..M	1..M:0..M	0..M:0..M
1..1:0..1	1..1:0..1	1..1:0..1	0..1:0..1	0..1:0..1	1..M:0..1	1..1:0..M	1..M:0..1	0..1:0..M	0..M:0..1	1..1:0..M	0..M:0..1	0..1:0..M	1..M:0..M	0..M:0..M	1..M:0..M	0..M:0..M
0..1:1..1	0..1:1..1	0..1:0..1	0..1:1..1	0..1:0..1	0..M:1..1	0..1:1..M	0..M:0..1	0..1:1..M	0..M:1..1	0..1:0..M	0..M:0..1	0..1:0..M	0..M:1..M	0..M:1..M	0..M:0..M	0..M:0..M
0..1:0..1	0..1:0..1	0..1:0..1	0..1:0..1	0..1:0..1	0..M:0..1	0..1:0..M	0..M:0..1	0..1:0..M	0..M:0..1	0..1:0..M	0..M:0..1	0..1:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M
1..M:1..1	1..M:1..1	1..M:0..1	0..M:1..1	0..M:0..1	1..M:1..1	1..M:1..M	1..M:0..1	0..M:1..M	0..M:1..1	1..M:0..M	0..M:0..1	0..M:0..M	1..M:1..M	0..M:1..M	1..M:0..M	0..M:0..M
1..1:1..M	1..1:1..M	1..1:0..M	0..1:1..M	0..1:0..M	1..M:1..M	1..1:1..M	1..M:0..M	0..1:1..M	0..M:1..M	1..1:0..M	0..M:0..M	0..1:0..M	1..M:1..M	0..M:1..M	1..M:0..M	0..M:0..M
1..M:0..1	1..M:0..1	1..M:0..1	0..M:0..1	0..M:0..1	1..M:0..1	1..M:0..M	1..M:0..1	0..M:0..M	0..M:0..1	1..M:0..M	0..M:0..1	0..M:0..M	1..M:0..M	0..M:0..M	1..M:0..M	0..M:0..M
0..1:1..M	0..1:1..M	0..1:0..M	0..1:1..M	0..1:0..M	0..M:1..M	0..1:1..M	0..M:0..M	0..1:1..M	0..M:1..M	0..1:0..M	0..M:0..M	0..1:0..M	0..M:1..M	0..M:1..M	0..M:0..M	0..M:0..M
0..M:1..1	0..M:1..1	0..M:0..1	0..M:1..1	0..M:0..1	0..M:1..1	0..M:1..M	0..M:0..1	0..M:1..M	0..M:1..1	0..M:0..M	0..M:0..1	0..M:0..M	0..M:1..M	0..M:1..M	0..M:0..M	0..M:0..M
1..1:0..M	1..1:0..M	1..1:0..M	0..1:0..M	0..1:0..M	1..M:0..M	1..1:0..M	1..M:0..M	0..1:0..M	0..M:0..M	1..1:0..M	0..M:0..M	0..1:0..M	1..M:0..M	0..M:0..M	1..M:0..M	0..M:0..M
0..M:0..1	0..M:0..1	0..M:0..1	0..M:0..1	0..M:0..1	0..M:0..1	0..M:0..M	0..M:0..1	0..M:0..M	0..M:0..1	0..M:0..M	0..M:0..1	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M
0..1:0..M	0..1:0..M	0..1:0..M	0..1:0..M	0..1:0..M	0..M:0..M	0..1:0..M	0..M:0..M	0..1:0..M	0..M:0..M	0..1:0..M	0..M:0..M	0..1:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M
1..M:1..M	1..M:1..M	1..M:0..M	0..M:1..M	0..M:0..M	1..M:1..M	1..M:1..M	1..M:0..M	0..M:1..M	0..M:1..M	1..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	1..M:1..M	0..M:1..M	1..M:0..M	0..M:0..M
0..M:1..M	0..M:1..M	0..M:0..M	0..M:1..M	0..M:0..M	0..M:1..M	0..M:1..M	0..M:0..M	0..M:1..M	0..M:1..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:1..M	0..M:1..M	0..M:0..M	0..M:0..M
1..M:0..M	1..M:0..M	1..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	1..M:0..M	1..M:0..M	1..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	1..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	1..M:0..M	0..M:0..M	1..M:0..M	0..M:0..M
0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M	0..M:0..M

Рис. 2. Матрица композиций связей

ПрО в виде следующих двух связей между атрибутами:  $Таб\_Номер \xleftarrow{1..M:0..1} Номер\_Отдела$  и  $Номер\_Отдела \xleftarrow{1..M:1..1} Номер\_Здания$ .

Композиция связей в соответствии с определением 7 и матрицей композиций связей позволяет вывести новую связь  $Таб\_Номер \xleftarrow{1..M:0..1} Номер\_Здания$ . Эта новая связь отражает пропущенную или отсутствующую информацию о заданной ПрО. Таким образом композиция связей даёт возможность автоматизированного вывода новых связей. Наличие в заданной сущности двух связей принадлежащих типам 5 и 7 является формальным признаком декомпозиции данной сущности, а результирующая связь  $Таб\_Номер \xleftarrow{1..M:0..1} Номер\_Здания$  здесь является аналогом транзитивной функциональной зависимости.

Ещё одним полезным следствием введения связей является возможность строгого решения проблемы «синонимов» и «омонимов» при проектировании схемы БД. Так, в приведённом выше примере, в соответствии с композицией связей, получили следующую результирующую связь:  $Таб\_Номер \xleftarrow{1..M:0..1} Номер\_Здания$ . Предположим, что в заданной ПрО есть ещё одно бизнес-правило — все сотрудники обязательно находятся в одном из зданий. Это правило можно выразить связью:  $Таб\_Номер \xleftarrow{1..M:1..1} Номер\_Здания$  типа 5. Данное правило противоречит результирующей связи  $Таб\_Номер \xleftarrow{1..M:0..1} Номер\_Здания$ , которая допускает тот факт, что есть сотрудники, не работающие ни в одном из зданий (например, внештатные сотрудники). То есть области определения этих связей не совпадают. Несовпадение областей определения связей является формальным признаком того, что атрибут  $Номер\_Здания$  связи  $Таб\_Номер \xleftarrow{1..M:0..1} Номер\_Здания$  и атрибут  $Номер\_Здания$  связи

$Таб\_Номер \xleftarrow{1..M:1..1} Номер\_Здания$  являются разными атрибутами с одним и тем же именем, то есть являются «омонимами». Это, в свою очередь, является формальным признаком того, что эти атрибуты отражают разные понятия в ПрО и должны находиться в разных отношениях.

**5. Заключение.** В данной статье показано, что при построении схем БД использование связей, определённых в разделе 2, а также областей определения связей, областей значений связей и композиции связей позволяет:

- наглядно описывать правила из ПрО;
- автоматизированно выводить новые связи (определять недостающую информацию);
- предоставлять формальные критерии для автоматизированной декомпозиции;
- частично решать проблему «синонимов» и «омонимов» при проектировании схем БД.

Разработано программное обеспечение, позволяющее строить композиции связей [12, 13].

#### Библиографический список

1. Дейт, К. Дж. Введение в системы баз данных / К. Дж. Дейт; пер. с англ. — М.: Вильямс, 2001. — 1072 с.
2. Кузнецов, С. Д. Основы баз данных / С. Д. Кузнецов. — М.: БИНОМ, 2007. — 484 с.
3. Peter Pin-Shan Chen. The Entity-Relationship Model-Toward a Unified View of Data / Pin-Shan Chen Peter // ACM Transactions on Database Systems, 1976. — Vol. 1, №. 1. — P. 9–36.
4. Halpin, T. Conceptual Schema and Relation Database Design / T. Halpin. — 2th ed. — Sydney: Prentice-Hall of Australia Pty., Ltd, 1995. — 500 p.
5. Halpin, T. Information Modeling and Relational Databases / T. Halpin, T. Morgan. — 2th ed. — Kaufmann Publishers, 2008. — 943 p.

6. Articulated entity relationship (AER) diagram for complete automation of relational database normalization / P. S. Dhabhe [et al.] // International Journal of Database Management Systems (IJDMIS). — 2010. — Vol. 2, №. 2. — P. 84–100.

7. Diagrammatic approach for complete automation of relational database normalization at conceptual level / M. S. Patwardhan [et al.] // International Journal of Database Management Systems (IJDMIS). — 2010. — Vol. 2, №. 4. — P. 132–151.

8. Тулеев, У. А. Концептуальная, логическая модели и алгоритм проектирования баз данных в доменно-ключевой нормальной форме / У. А. Тулеев, А. А. Алтайбек // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции (RCDL'2011) : тр. 13-й Всерос. науч. конф. — Воронеж, 2011. — С. 119–125.

9. Убалехт, И. П. Метод построения схем реляционных баз данных, использующий семантическую информацию / И. П. Убалехт // Электронные библиотеки: перспективные методы и технологии, электронные коллекции (RCDL'2014) : тр. 16-й Всерос. науч. конф. — Дубна, 2014. — С. 428–434.

10. Mathematical Society of Japan Staff, Kiyosi Ito. Encyclopedic dictionary of Mathematics. — 2th ed. MIT Press Cambridge, 1993. — 2168 p.

11. Date, C. J. All for One, One for All (2006) / C. J. Date. — Режим доступа : <http://www.dcs.warwick.ac.uk/~hugh/TTM/AllforOne.pdf> (дата обращения: 17.09.2015).

12. Убалехт, И. П. Web-приложение, моделирующее матрицу композиций связей / И. П. Убалехт. — Режим доступа : <http://www.ubaleht.com/relationships> (дата обращения: 17.09.2015).

13. Убалехт, И. П. Web-приложение для прикладного применения композиций связей / И. П. Убалехт. — Режим доступа : <http://www.ubaleht.com/composition> (дата обращения: 17.09.2015).

**УБАЛЕХТ Иван Павлович**, аспирант кафедры прикладной математики и фундаментальной информатики; старший преподаватель кафедры автоматизированных систем обработки информации и управления.

Адрес для переписки: [ivan@ubaleht.com](mailto:ivan@ubaleht.com)

Статья поступила в редакцию 23.09.2015 г.

© И. П. Убалехт

## Книжная полка

### 004/P13

**Рабочая профессия «Оператор ЭВМ»: теория и практика : учеб. текстовое электрон. изд. локально-распространения : практикум / А. Г. Белик [и др.]. — Омск : Изд-во ОмГТУ, 2015. — 1 0=эл. опт. диск (CD-ROM).**

Приведены требования к выполнению практических заданий по дисциплине «Рабочая профессия». Даны основы теоретических знаний для приобретения навыков в области современных компьютерных информационных технологий с целью решения разнообразных прикладных задач с использованием операционных и офисных программных систем, сетевых и веб-технологий, инструментальных сред программирования, систем управления базами данных, программных комплексов схемотехнического и структурного моделирования.

Для студентов бакалавриата, обучающихся по следующим направлениям подготовки: 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», 09.03.04 «Программная инженерия», 27.03.03 «Системный анализ и управление».

### 004.3/C60

**Соловьев, В. В. Логическое проектирование цифровых систем на основе программируемых логических интегральных схем / В. В. Соловьев, А. Климович. — 2-е изд., стер. — М. : Горячая линия-Телеком, 2015. — 374 с.**

Посвящена проблемам логического проектирования отдельных цифровых устройств на основе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС). Показано место логического проектирования в общем процессе разработки цифровой системы, отмечаются особенности логического проектирования на основе ПЛИС. Предлагаются методы синтеза комбинационных схем, конечных и микропрограммных автоматов, позволяющие эффективно использовать архитектурные особенности ПЛИС, а также учитывать системные требования. Представлены новые модели конечных автоматов, позволяющие значительно снизить стоимость реализации и повысить быстродействие последовательностных устройств, а также учитывать местоположение конечного автомата в цифровой системе. Рассматриваются также вопросы верификации результатов синтеза и выбора наиболее эффективного метода синтеза. Описывается пакет ZUBR, в котором реализованы предлагаемые методы синтеза. Изложение материала сопровождается большим числом примеров. Преимущество предлагаемых методов синтеза подтверждается результатами экспериментальных исследований.

Для специалистов, разработчиков цифровых систем, может быть использована в качестве учебного пособия для студентов и аспирантов.