

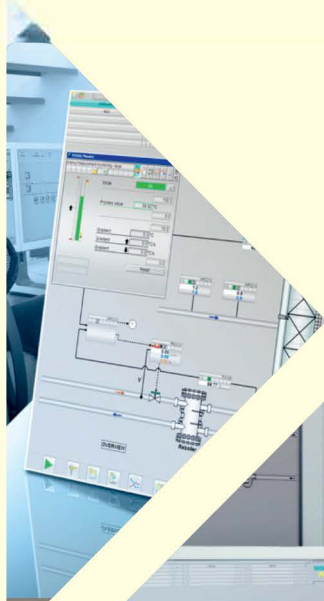
ISSN online 2658-6436

**№ 2 (2)**  
**2018**

Научно-технический журнал

# Автоматизация и моделирование

в проектировании и управлении



# АВТОМАТИЗАЦИЯ

# И МОДЕЛИРОВАНИЕ

## В ПРОЕКТИРОВАНИИ И УПРАВЛЕНИИ

Издается с 2018 года

№ 2(02), 2018

Сетевое издание

Выходит 1 раз в квартал

Учредитель издания – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**«Брянский государственный технический университет» (БГТУ)**

*Председатель редакционного совета - Сигов А.С., д-р. физ. мат. наук, проф., академик РАН*

*Заместитель председателя редакционного совета – Аверченков А.В., д-р. тех. наук, доц.*

*Заместитель председателя редакционного совета – Федонин О.Н., д-р. тех. наук, проф.*

**Бобырь М.В., д-р. тех. наук, проф. (Курск)**

**Бочкарев П.Ю., д-р. тех. наук, проф. (Саратов)**

**Долгов Ю.А., д-р. тех. наук, проф. (Тирасполь)**

**Еременко В.Т., д-р. тех. наук, проф. (Орел)**

**Ивашук О.А., д-р. тех. наук, проф. (Белгород)**

**Карпенко А.П., д-р. физ. мат. наук, проф. (Москва)**

**Квятковская И.Ю., д-р. тех. наук, проф. (Астрахань)**

**Кравец А.Г., д-р. тех. наук, проф. (Волгоград)**

**Курейчик В.В., д-р. тех. наук, проф. (Таганрог)**

**Ланцов В.Н., д-р. тех. наук, проф. (Владимир)**

**Носков С.И., д-р. тех. наук, проф. (Иркутск)**

**Пестер А., д-р. тех. наук, проф. (Австрия)**

**Петрешин Д.И., д-р. тех. наук, проф. (Брянск)**

**Подвесовский А.Г., канд. тех. наук, доц. (Брянск)**

**Пылькин А.Н., д-р. тех. наук, проф. (Рязань)**

**Скрышников А.В., д-р. тех. наук, проф. (Воронеж)**

**Соснин П.И., д-р. тех. наук, проф. (Ульяновск)**

**Феофанов А.Н., д-р. тех. наук, проф. (Москва)**

**Хейфец М.Л., д-р. тех. наук, проф. (Белорусь)**

**Чепчуров М.С., д-р. тех. наук, проф. (Белгород)**

**Шептунов С.А., д-р. тех. наук, проф. (Москва)**

**Ярушкина Н.Г., д-р. тех. наук, проф. (Ульяновск)**

*Редколлегия*

*Главный редактор – Аверченков В.И. д-р. тех. наук, проф.*

*Зам. главного редактора – Подвесовский А.Г. канд. тех. наук*

*Ответственный секретарь – Кузьменко А.А. канд. биол. наук*

*Корректор – Малюкина А.Ю.*

*Адрес редакции:*

241035, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
тел.: (4832) 56-49-90

Адрес размещения: <https://aimpu.ru>

E-mail: [aim-pu@mail.ru](mailto:aim-pu@mail.ru)

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации средства массовой информации  
ЭЛ №ФС-77-73748 от 05 октября 2018 года

ISSN 2658-6436 (online)

---

**Журнал включен в специализированный референтный библиографический сервис Crossref**

---

Журнал публикует основные результаты научных исследований по специальностям:

**05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами**  
**05.13.10 – Управление в социальных и экономических системах**

**05.13.12 – Системы автоматизации проектирования**  
**05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ**

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале «Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении», допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции

© Брянский государственный технический университет, 2018

# **AUTOMATION AND MODELING**

SCIENTIFIC TECHNICAL  
JOURNAL



## **in design and management**

Issued since 2018

№ 2(02), 2018

Online edition

Published once a quarter

The founder of the publication – the Federal state budgetary  
educational institution of higher education  
«**Bryansk State Technical University**» (BSTU)

*Chairman of Editorial Board – Sigov A.S., D.Phys.-Mat., Professor, Academician of RAS*  
*Deputy Chairman of Editorial Board – Averchenkov A.V., D. Eng., Associate professor*  
*Deputy Chairman of the editorial Board – Fedonin O.N. D. Eng., Professor*

**M.Yu. Bobyr**, *D. Eng., Prof., (Kursk)*  
**P.Yu. Bochkaryov**, *D. Eng., Prof., (Saratov)*  
**Yu.A. Dolgov**, *D. Eng., Prof., (Tiraspol)*  
**V.T. Yeremenko**, *D. Eng., Prof., (Orel)*  
**O.A. Ivashchuk**, *D. Eng., Prof., (Belgorod)*  
**A.P. Karpenko**, *D. Phys.-Mat., Prof., (Moscow)*  
**I.Yu. Kvyatkovskaya**, *D. Eng., Prof., (Astrakhan)*  
**A.G. Kravets**, *D. Eng., Prof., (Volgograd)*  
**V.V. Kureichik**, *D. Eng., Prof., (Taganrog)*  
**V.N. Lantsov**, *D. Eng., Prof., (Vladimir)*  
**S.Yu. Noskov**, *D. Eng., Prof., (Irkutsk)*

**A. Pester**, *D. Eng., Prof., (Austria)*  
**D.I. Petreshin**, *D. Eng., Prof., (Bryansk)*  
**A.G. Podvesovskiy**, *Can. Eng., (Bryansk)*  
**A.N. Pylkin**, *D. Eng., Prof., (Bryansk)*  
**A.V. Skrypnikov**, *D. Eng., Prof., (Voronezh)*  
**P.I. Sosnin**, *D. Eng., Prof., (Ulyanovsk)*  
**A.N. Feofanov**, *D. Eng., Prof., (Moscow)*  
**M.L. Kheifets**, *D. Eng., Prof., (Minsk, Belarus)*  
**M.S. Chepchurov**, *D. Eng., Prof., (Belgorod)*  
**S.A. Sheptunov**, *D. Eng., Prof., (Moscow)*  
**N.G. Yarushkina**, *D. Eng., Prof., (Ulyanovsk)*

*Editorial board*  
*Editor-in-Chief – Averchenkov V.I. D. Eng., Prof.,*  
*Deputy Editor-in Chief – Podvesovskiy A.G. Can. Eng.*  
*Executive Secretary – Kuzmenko A.A. Can. Biol. Sc.*  
*Corrector – Maliukina A.Yu.*

*Address of edition* 7, 50 Years of October Avenue,  
Bryansk, Russia, 241035  
тел.: (4832) 56-49-90  
Accommodation address: <https://armpu.ru>  
E-mail: [aim-pu@mail.ru](mailto:aim-pu@mail.ru)

The Journal is registered by the Federal  
Service for Supervision in the Sphere of Telecom, Information  
Technologies and Mass Communications of Russian Federation  
(ROSKOMNADZOR).  
Registration certificate Эл № ФС77-73848 of October 05, 2018

ISSN 2658-6436 (online)

**Journal is included in a specialized consultant bibliographical service Crossref**

Reprinting, all kinds of material copying and reproduction of materials published in the journal “Automation and modeling in design and management” is allowed only with the Editorial Board’s permission and a reference to the source of information

© Bryansk State Technical University, 2018

**СОДЕРЖАНИЕ**

**CONTENTS**

**Математическое моделирование,  
численные методы  
и комплексы программ**

**Mathematical modeling,  
numerical methods  
and program complexes**

Асланов Г.А., Сугарова Л.Ф. Исследование факторов, влияющих на скорость вызова процедур языка C++

4 Aslanov G.A., Sugarova L.F. Study of factors influencing the speed of calling procedures, language C++

Козак Л.Я., Сташкова О.В., Гарбузьяк Е.С., Шестопап О.В. Математическое и программное обеспечение поддержки принятия решений в процессе формирования расписания аудиторных занятий

9 Kozak L.Y., Stashkova O.V., Garbuznyak E.S., Shestopal O.V. The mathematical and software of decision support making during the process of formation the schedule of education activities

**Управление в социальных  
и экономических системах**

**Management in social  
And economic systems**

Сазонова А.С. Подход к измерению и практика оценки инновационного потенциала региональных систем

20 Sazonova A.S. Approach to measurement and practice of evaluating an innovative potential of regional systems

**Автоматизация и управление  
технологическими процессами и  
производствами, системы  
автоматизации проектирования**

**Automation and control of technological  
processes and production,  
automated design systems**

Афанасьев А.Н., Бригаднов С.И. Автоматизация структурно-параметрического анализа проектных решений и обучения проектировщика изделий машиностроения средствами сапр компас

25 Afanasyev A.N., Brigadnov S.I. Automation of structural and parametric analysis of project decisions and training of the designer of machine-building products with cad compass

Лабутип А.Н., Невиницын В.Ю., Волкова Г.В., Сальков В.М. Алгоритм управления концентрацией целевого продукта в химическом реакторе

33 Labutin A.N., Nevinitsyn V.Yu., Volkova G.V., Salkov V.M. The control algorithm for concentration of the target product in the chemical reactor

Невиницын В.Ю., Лабутип А.Н., Волкова Г.В. Управление температурным режимом химического реактора

40 Nevinitsyn V.Yu., Labutin A.N., Volkova G.V. Temperature mode management of chemical reactor

УДК: 004.074.32

DOI: 10.30987/article\_5c387d60657774.94658729

Г.А. Асланов, Л.Ф. Сугарова

## ИССЛЕДОВАНИЕ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА СКОРОСТЬ ВЫЗОВА ПРОЦЕДУР ЯЗЫКА C++

*Представлены результаты исследования, доказывающие, что время на передачу управления функции и возврат из нее при использовании методов макрозамен не влияют на скорость работы программы, написанной на C++.*

*Ключевые слова:* программный код, оптимизация, модель, качество, производительность.

G.A. Aslanov, L.F. Sugarova

## STUDY OF FACTORS INFLUENCING THE SPEED OF CALLING PROCEDURES, LANGUAGE C++

*The results of the research are presented, which prove that the time spent on transferring control of a function and returning from it when using methods of macro-substitutions does not affect the speed of the program written in C++.*

*Keywords:* program code, optimization, model, quality, output.

### Введение

Целью проведенного исследования является: определение факторов, влияющих на скорость вызова функции в языке C++.

Значение прироста в производительности в результате макрозамен включает два слагаемых: 1) время на передачу управления в функцию и возврат из неё; 2) время на выделение стековой памяти функции, необходимой для размещения всех локальных переменных и массивов, - и может быть представлено в виде выражения (1):

$$T = t^{call} + t^{stack} \quad (1)$$

$t^{call}$  – время на передачу управления в функцию и возврат из нее без учета времени, необходимого на выделение локального стека функции. Эта величина является постоянной и соответствует времени выполнения машинной инструкции CALL(передающей управление процедуре на языке Ассемблера).

$t^{stack}$  – время, затрачиваемой на выделение локальной (стековой) памяти, предназначенной для размещения переменных, объявленных внутри блока функции. Это время зависит от суммарного размера локальных данных, ниже данное утверждение будет подтверждено экспериментально.

Чтобы оценить порядок величин  $t^{call}$ ,  $t^{stack}$  и оценить их значимость в выражении (1) были проведены ряд экспериментов. Экспериментальные замеры проводились с помощью тестового кода, написанного на языке C++ в среде Visual Studio. Для получения максимально объективных оценок в настройках проекта параметру «Optimization» было присвоено значение «Disabled (/Od)», что предотвращает влияние встроенных в компилятор Microsoft методов оптимизации. Кроме того, параметр «Inline function expansion» был установлен в

«Only \_\_inline (/Ob1)» - данный флаг запрещает компилятору игнорировать инструкцию inline при построении исполняемого кода (рис.1). Замеры проводились в режиме «Release» для исключения диагностического кода.

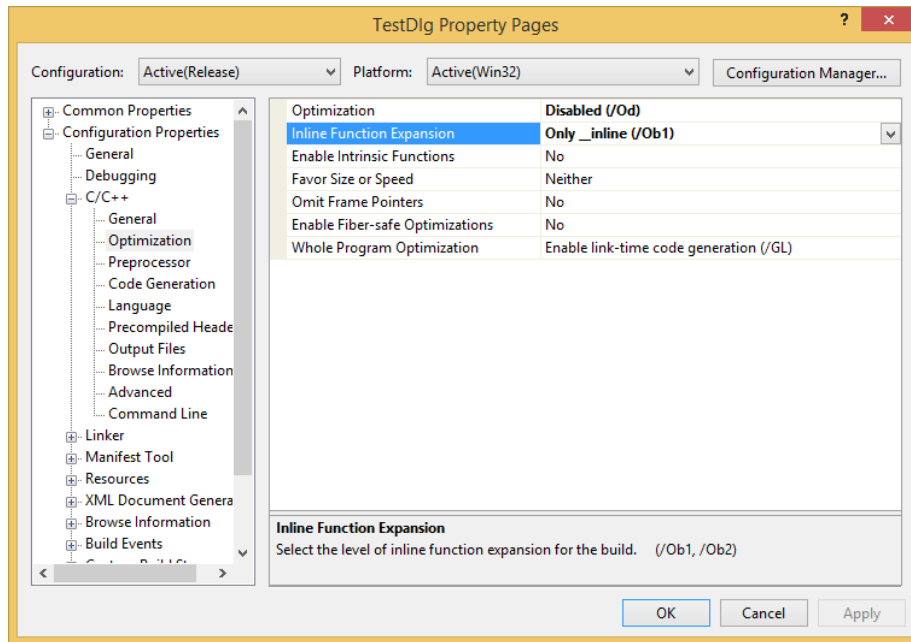


Рис. 1. Настройки тестового проекта

## 1. Процесс тестирования

Для оценки величины времени вызова и возврата из функции  $t^{call}$  был проведен тест, в котором замерялось время выполнения кода, выполняющего в цикле функцию с пустым телом и без параметров (чтобы исключить влияние операторов выделения стека). Количество итераций цикла последовательно изменялось от 1000000 до 20000000 с шагом 1000000. Исходный код теста имеет вид:

```
CString cstr="";
for (int N=1000000; N<=20000000; N+=1000000){
    DWORD dwStart = GetTickCount();
    for (int i=0; i<N; i++){
        f();
    }
    DWORD dwTime = GetTickCount() - dwStart;
    CString cs; cs.Format("%u\n",dwTime);
    cstr += cs;
}
AfxMessageBox(cstr);
```

Были проведены два замера: в первом функция была объявлена обычным образом:

```
void f()
{
}
}
```

Во втором случае с использованием инструкции `__forceinline`:

```
__forceinline void f()
{
}
}
```



Результаты замеров показали, что отличия во времени работы лежали в пределах статистической погрешности. Максимальное время выполнения (для 20000000 итераций) составило около 47 микросекунд.

Так как существовала возможность того, что компилятор игнорирует флаг запрета встроенной оптимизации и все-таки исключает функции с пустым телом из объектного кода, то были проведены 2 дополнительных теста: в первом вместо функции  $f()$  в цикле вызывалось выражение  $\log(10.5)$ :

```
CString cstr="";
for (int N=1000000; N<=20000000; N+=1000000){
    DWORD dwStart = GetTickCount();
    for (int i=0; i<N; i++){
        log(10.5);
    }
    DWORD dwTime = GetTickCount() - dwStart;
    CString cs; cs.Format("%u\n",dwTime);
    cstr += cs;
}
AfxMessageBox(cstr);
```

А во втором тесте выражение  $\log(10.5)$ ; было помещено в тело функции  $f()$ :

```
void f()
{
    log(10.5);
}
```

Сравнение результатов этих двух тестов также показало очень незначительные расхождения. Это говорит о том, что затраты на вызов функции и возврат из неё незначительны. Выражение (1) примет следующий вид:

$$T = t^{stack} \quad (2)$$

Для оценки зависимости времени выделения стековой памяти от размера локальных данных был проведен следующий эксперимент: число итераций было зафиксировано значением 20000000, Далее были проведены 10 замеров для каждого из которых менялся размер массива «у», объявленного в теле функции  $f()$  (Листинг 1) от 100000 до 1000000 байт включительно:

```
void f()
{
    char y[1000000];
    y[0] = 'a';
}
```

## 2. Результаты экспериментов

Аналогичный эксперимент был проведен для варианта функции  $f()$  с использованием модификатора `__forceinline`. Результаты обоих экспериментов приведены в таблице 1.

Полученные результаты говорят о высокой эффективности использования модификатора `__forceinline`: очевидно, что объявление данных компилятор поместил перед циклом. На графике, изображенном на рисунке 2 хорошо виден линейный характер зависимости времени выделения локального стека функции от его размера: поверх кривой экспериментальных данных, взятых из первой и второй колонок таблицы 1, проведена прямая (пунктиром), коэффициенты, которой получены аппроксимацией данных методом МНК.

Таблица 1 - Результаты замеров времени выделения локальной памяти

Размер данных	время работы обычной функции	время работы __forceinline функции
100000	579	47
200000	1312	47
300000	2187	47
400000	3468	47
500000	4343	47
600000	5187	47
700000	6079	47
800000	6922	47
900000	7781	47
1000000	8641	47

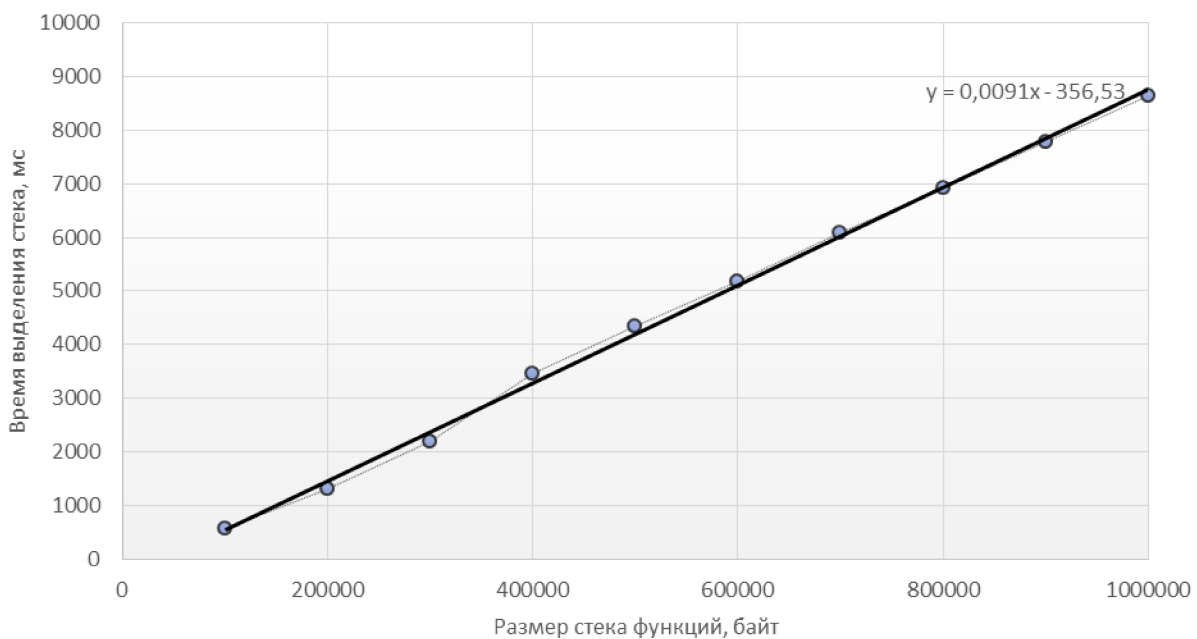


Рис. 2. Кривая экспериментальных данных и прямая, описывающая линейную зависимость времени выделения стековой памяти от её размера.

На графике, изображенном на рисунке 2 ось абсцисс, соответствует размеру стека (в байтах), а ось ординат – времени выделения стека (в миллисекундах).

Проведенные эксперименты показали, что в выражение (1) можно упростить, убрав из него представив выигрыш от макрозамены  $t^{call}$ , ввиду его фактической несущественности. Кроме того, подтвержденный экспериментально линейный характер зависимости времени выделения стека от его размера позволяет с высокой степенью точности использовать для прогнозирования времени выделения стека коэффициенты пропорциональности либо более наглядный показатель скорости выделения стека, с учетом этого выражение (1) можно преобразовать в следующее (2):

$$T = \frac{v}{s} \tag{2}$$

$v$  – суммарный размер локальных переменных (стека функции);

$s$  – скорость выделения стека.



## Выводы

В методе макрозамен, как и во всех задачах, относящихся к категории моделей «экстремального программирования», улучшение качества программы достигается за счет использования дополнительных вычислительных ресурсов. Макрозамены приводят к увеличению размера кода программы пропорционально количеству вызовов функций, для которых такая замена будет осуществляться. Естественно, в сложных системах с большим числом функций, неограниченное использование макрозамен невозможно – прежде всего из-за того, что оперативная память, используемая для размещения исполняемого кода, является ресурсом достаточно дорогим. Таким образом имеет место оптимизационная проблема выбора стратегии макрозамен, улучшающей производительность кода, в условиях ограниченного объема ресурсов оперативной памяти, необходимого для достижения данной цели.

### Список литературы:

1. Томаев М.Х., Асланов Г.А., Ванюшенкова Н.В. Использование оптимизационных моделей экстремального программирования в проектировании ПО // IT-Технологии: теория и практика, Материалы семинара, 2017.
2. Соколова Е.А., Определение параметров быстродействия алгоритма компрессии статичных изображений // Междунар. науч. конф. молодых ученых, студентов и аспирантов «Перспектива-2008»: сб. матер. Нальчик: Каб.-Балк. ун-т, 2008. С.143-147.
3. Соколова Е.А. Математическая модель компрессии статичных изображений переменными фрагментами с учетом погрешностей // деп. в ВИНТИ 19.07.07. № 748-В2007, указатель № 9, 12 с.
4. Соколова Е.А. К проблеме повышения эффективности компрессии изображений // Безопасность информационных технологий, Министерство образования и науки РФ, МИФИ, ВНИИПТИ. 2008. № 2. С.57-60.
5. Соколова Е.А. Разработка метода сохранения пикселей в массив с дифференциацией на цветовые компоненты // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 7 (61). С. 7.
6. Соколова Е.А. Метод компрессии цифровых трехмерных изображений с помощью анализа таблицы текстурных координат // Международный научно-исследовательский журнал. 2017. № 7 (61). С. 9.

### References:

1. Tomaev M.KH., Aslanov G.A., Vanyushenkova N.V. (2017). Use of optimization models of extreme programming in software design. IT-Technologies: theory and practice, Seminar materials. [in Russian language]
2. Sokolova E.A. (2008). Determination of the parameters of the speed of the compression algorithm for static images. International scientific conference young scientists, students and post-graduate students «Perspective-2008»: Cal. mater. Nalchik: Cab-Balk. University, pp.143-147. [in Russian language]
3. Sokolova E.A. (2007) Mathematical model of compression of static images with variable fragments taking into account errors. Dep. in VINITI No. 748-B2007, the index No. 9. [in Russian language]
4. Sokolova E.A. (2008). To the problem of increasing the efficiency of image compression. Information Technology Security, Ministry of Education and Science of the Russian Federation, MEFhI, VNIIPhI, (2), pp. 57-60. [in Russian language]
5. Sokolova E.A. (2017). Development of a method for storing pixels in an array with differentiation into color components. International Scientific and Research Journal, 61(7). [in Russian language]
6. Sokolova E.A. (2017). The method of compression of digital three-dimensional images using the analysis of the table of texture coordinates. International Scientific and Research Journal, 61(7). [in Russian language]

*Статья поступила в редколлегию 31.09.18.*

*Рецензент: к.т.н., доцент Брянского государственного технического университета*

*Подвесовский А.Г.*

*Статья принята к публикации 12.12.18.*

### Сведения об авторах

**Асланов Геворг Артурович**  
магистр, ФГБОУ ВО «Северо-Кавказский горно-металлургический институт (ГТУ)»,  
тел.: +7 (962) 747-88-47  
E-mail: [gevork5@mail.ru](mailto:gevork5@mail.ru)

**Сугарова Лаура Феликсовна**  
ГБОУ "Гимназия "Диалог", 11-а класс,  
тел.: +7 (918) 828-71-24

### Information about authors:

**Aslanov Gevorg Arturovich**  
Master, FSBEI HE "North Caucasus Mining and Metallurgical Institute (State Technological University) "  
tel.: +7 (962) 747-88-47  
E-mail: [gevork5@mail.ru](mailto:gevork5@mail.ru)

**Sugarova Laura Feliksovna**  
GBOU "High School"Dialogue", 11th grade,  
phone: +7 (918) 828-71-24

УДК: 519.711

DOI: 10.30987/article\_5c387d60b9b3f6.51323603

Л.Я. Козак, О.В. Сташкова, Е.С. Гарбузьяк, О.В. Шестопап

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ В ПРОЦЕССЕ ФОРМИРОВАНИЯ РАСПИСАНИЯ АУДИТОРНЫХ ЗАНЯТИЙ

*В настоящее время не существует единых подходов к методике составления расписания занятий в образовательных учреждениях, так как каждое учреждение обладает своей определенной спецификой и различными ограничениями. Разработок в области автоматизации задачи составления расписания, которые соответствовали бы нормативам филиала ПГУ им. Т.Г. Шевченко, практически не существует. Таким образом, в настоящий момент, весьма актуальной является задача автоматизации процесса формирования расписания, что избавит специалистов учебного отдела от «ручного» способа составления.*

*В работе представлена информационная система, реализующая генетический алгоритм формирования расписания аудиторных занятий. Разработанный программный продукт используется для формирования семестровых двухнедельных графиков аудиторных занятий в филиале ПГУ им. Т.Г. Шевченко в г. Рыбница.*

**Ключевые слова:** генетический алгоритм; автоматизация процесса формирования расписания; информационно-логическая модель.

L.Y. Kozak, O.V. Stashkova, E.S. Garbuznyak, O.V. Shestopal

## THE MATHEMATICAL AND SOFTWARE OF DECISION SUPPORT MAKING DURING THE PROCESS OF FORMATION THE SCHEDULE OF EDUCATION ACTIVITIES

*Currently, there are no common approaches to the methodology of scheduling classes in educational institutions, as each institution has its own specific and different restrictions. Developments in the field of automation of the task of scheduling, which corresponded to the standards of the branch of the PGU named by*

*T.G. Shevchenko, virtually non-existent. Thus, at the moment, the task of automating the process of forming the schedule is very important, which will save the specialists of the instructional Department from the "manual" method of compilation.*

*The paper presents an information system that implements the genetic algorithm for forming the schedule of Auditory lessons studies. The developed program complex is used for the formation of two-week semester schedules of classroom studies in the branch of PGU named by T.G. Shevchenko in Rybnitsa.*

**Keywords:** genetic algorithm; automation of scheduling; information and logical model.

### Введение

Корректность расписания зависит от того, насколько точно и правильно расставлены дисциплины в сетке часов в соответствии с психологическими и физиологическими особенностями студентов. При составлении расписания обязательно следует обратить внимание на то, чтобы практические занятия проводились после лекционных, а лабораторные – после практических занятий. Такой подход гарантирует повышение эффективности использования учебного времени. В работе проведено обоснование применения генетического алгоритма как наиболее оптимального из существующих методологий. Обоснованный метод показал свою высокую эффективность при программной реализации.

**Цель исследования** – разработка и реализация программной системы, предназначенной для автоматизации процесса составления расписания аудиторных занятий в филиале Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко в г. Рыбнице.

**Объект исследования** – автоматизация формирования расписания аудиторных занятий.

**Предмет исследования** – реализация генетического алгоритма как один из адаптивных

методов поиска для решения задач функциональной оптимизации с целью автоматизации формирования расписания.

На этапе исследования предметной области была изучена методика составления расписания в вузах. Разработок в области автоматизации задачи составления расписания не так много. Это говорит о том, что данная задача является **актуальной** и единых подходов к ее решению до сих пор еще не существует. Новым подходом в реализации решения задачи поиска оптимального расписания явилось применение экспертного подхода, основанного на использовании генетического алгоритма.

### 1. Обоснование выбора метода реализации

Расписание аудиторных занятий – это документ, регламентирующий работу студентов, профессорско-преподавательского состава филиала, всего учебного заведения, распределяющий содержание учебного плана и рабочих программ по календарным дням учебного года и обеспечивающий их реализацию. Разрабатываемое расписание должно удовлетворять педагогическим требованиям, основанным на принципах аналитической дидактики и кибернетической аналогии. Оптимально составленное расписание не должно изменяться в течение семестра или учебного цикла, чтобы не нарушить учтенные в расписании межпредметные связи и выполненные требования [2].

Эффективность и качество учебного процесса во многом зависят от качества расписания аудиторных занятий, формирование расписания целесообразно осуществлять в автоматизированном режиме с использованием персонального компьютера. Это в значительной степени облегчит работу по составлению расписания и повысит его качество. Для этого необходимо формализовать перечисленные требования и реализовать их в соответствии с приведенным разработанным алгоритмом.

Для решения существующей проблемы необходимо построить гибкую и легко адаптируемую систему на основе новых принципов, с использованием современных компьютерных технологий. Необходима система, составляющая расписание в соответствии с выбранными критериями и заданными требованиями, т.е. берущая на себя как можно больше функций человека, чтобы расписание приходилось меньше доводить вручную. Данные возможности должны осуществляться также без изменения исходного кода системы. Для покрытия наиболее типичных случаев необходимо выбрать наиболее оптимальный алгоритм, реализующий задачу составления расписания занятий в вузе. Данная система должна иметь возможность дополнения и изменения существующей базы данных и пользовательского интерфейса. Всё это давало бы возможность задавать в каждом вузе требования, отвечающие его условиям, и с помощью подбора и настройки подходящего алгоритма получать требуемое расписание.

В последнее время для решения большинства задач составления расписания учебных занятий предлагается использовать генетический алгоритм решения квадратичной задачи о назначениях с запретами и целевой функцией специального вида.

Формально задачу составления учебного расписания можно поставить следующим образом. Заданы множество преподавателей  $P$ , множество учебных групп  $K$ , множество учебных дисциплин  $U$ , учебный план, фиксирующий количество часов каждого предмета в каждой группе, множество аудиторий  $A$ . Необходимо найти такое расписание, которое бы обслуживало все имеющиеся дисциплины и удовлетворяло требованиям профессорско-преподавательского состава к проведению занятий, а также не имело противоречий относительно аудиторного фонда.

Расписание представляется в виде таблицы. Все участвующие в составлении расписания ячейки пронумерованы от 1 до  $m$  ( $m$  – общее количество ячеек.) Объекты – предметы, подлежащие вставке в расписание, также нумеруются от 1 до  $n$  ( $n$  – общее количество объектов), причем количество экземпляров каждого объекта равно количеству часов в неделю данной дисциплины (согласно содержанию учебного плана).

Если структура расписания полностью определена, то количество пронумерованных ячеек таблицы совпадает с количеством дисциплин для расстановки (т.е.  $m = n = N$ ). Заранее зафиксированная структура расписания позволяет гарантировать отсутствие «окон» в расписании, а также позволяет в какой-то степени учитывать санитарно-гигиенические нормы (оптимальное соотношение учебной нагрузки по дням недели).

Для решения поставленной задачи необходимо ввести в рассмотрение матрицу совместимости предметов  $S$ :

$$S_{ik} = \begin{cases} 1, & \text{если предмет } I \text{ совместим с предметом } k; \\ 0, & \text{иначе.} \end{cases} \quad (1)$$

Несовместимость предметов выражается в том, что они используют общий ресурс (учитель или кабинет) и поэтому не могут находиться в расписании на одной строке. Предполагается что  $S_{ii} = 0, i = 1 \dots n$  (так как предмет не может появиться на строке с  $i$ -м номером дважды).

Кроме этого, необходимо в рассматриваемой задаче вводят матрицу сравнения ячеек  $R$ :

$$R_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если ячейка } j \text{ подлежит сравнению с ячейкой } l; \\ 0, & \text{иначе; } j=1 \dots N, l=1 \dots N. \end{cases} \quad (2)$$

В данной ситуации подлежат сравнению ячейки, расположенные на одной строке.

Переменные задачи также определяются матрицей, где

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{если в ячейку } i \text{ назначается предмет } j; \\ 0, & \text{иначе } i=1 \dots N, j=1 \dots N. \end{cases} \quad (3)$$

Целевая функция задачи составления расписания должна максимально минимизировать количеству несовместимых между собой предметов:

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N \sum_{J=1}^N \sum_{l=j+1}^N S_{ik} R_{jl} X_{ij} X_{kl} \rightarrow \min \quad (4)$$

При формировании целевой функции учтены свойства симметричности матриц  $S$  и  $R$ . При этом необходимо отметить тот факт, что если для выбранной структуры расписания существует непротиворечивый вариант его составления, то оптимальное значение целевой функции равно 0.

Для нахождения решения в рассмотрение вводится множество  $I(j)$  – номера тех ячеек, в которых допускается расположение предмета  $j$  (в соответствии с учебным планом или пожеланий преподавательского состава). Тогда основные ограничения задачи выглядят следующим образом:

$$\sum_{i \in I(j)} x_{ij} = 1, j = 1 \dots N \quad (5)$$

Каждый предмет назначается ровно в одну ячейку.

$$\sum_{j \in I(i)} x_{ij} = 1, j = 1 \dots N \quad (6)$$

В каждую ячейку назначается ровно один предмет.

Таким образом, была получена модель задачи о назначениях с «запретами» и квадратичной целевой функцией.

$$\sum_{i=1}^N \sum_{k=i+1}^N \sum_{J=1}^N \sum_{l=j+1}^N S_{ik} R_{jl} x_{ij} x_{kl} \rightarrow \min \quad (7)$$

$$\sum_{\substack{i=1 \\ j=1}}^N x_{ij} = 1, j=1..N \quad (8)$$

$$\sum_{\substack{j=1 \\ i=1}}^N x_{ij} = 1, j=1..N \quad (9)$$

$$\begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}, i=1..N, j=1..N \quad (10)$$

Подобная организация задачи позволяет также предусмотреть возможность не фиксировать границы расписания (например, в определенные дни недели проводится минимум 4 занятия, а 5-е занятие только в какой-то один из них), то ограничения (9) разбиваются на две дополнительные подгруппы.

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} = 1, i \in I_1, \quad (10)$$

где  $I_1$  – номера тех ячеек, которые обязательно должны быть заполнены.

$$\sum_{j=1}^N x_{ij} \leq 1, i \in I_2, \quad (11)$$

где  $I_2$  – номера тех ячеек, в которых предметы могут отсутствовать.

Составленная задача относится к классу открытых задач о назначении [5] и сводится к обычной задаче путем введения дополнительных переменных.

Как было указано раньше, задача составления расписания учебных занятий является трудноразрешимой (*NP*-полной), поэтому для решения задачи и получения оптимального решения рекомендуется использовать **генетический алгоритм**.

Научно доказано, что генетические алгоритмы особенно эффективны при поиске глобального оптимума, поскольку они осуществляют поиск в широком пространстве решений. Кроме того, преимущество генетического алгоритма заключается в том, что он предоставляет целое множество приближенных к оптимальному решений. Если рассматривать полученные результаты, то в дальнейшем можно организовывать поиск по дополнительным критериям, которые не были учтены на начальной стадии постановки задачи. Например, необходимо минимизировать количество получившихся «окон» для преподавателей.

## 2. Описание применяемых алгоритмов

Разработанный алгоритм состоит из двух подалгоритмов: составления расписания (рис. 1) и осуществления расстановки видов занятий в расписании по приоритету учебного плана и профессорско-преподавательского состава.

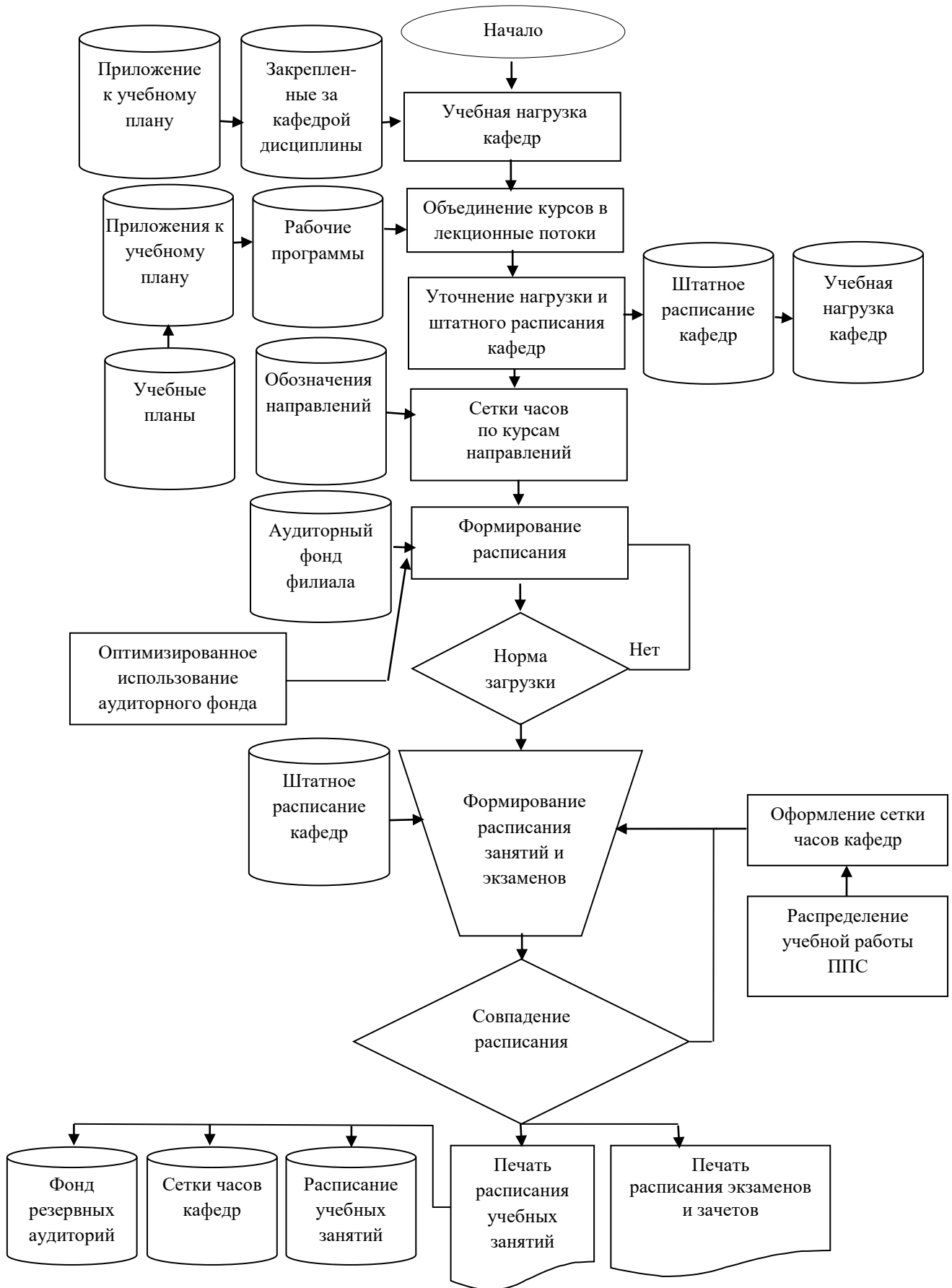


Рис. 1. Схема алгоритма составления расписания



**Подалгоритм составления расписания** аудиторных занятий включает [5]:

- ввод основной входной информации (аудиторного фонда кафедр филиала, сеток часов по курсам направлений, сводных данных для планирования и загрузки аудиторий занятиями (по семестрам));
- определения видов расписания аудиторных занятий;
- определения продолжительности рабочей недели по нечетной и по четной неделям, исходя из ежедневных аудиторных занятий по две пары и т.д.;
- выбора продолжительности рабочей недели, при условии выполнения равномерности учебной нагрузки студентов по неделям семестра и загрузки аудиторной работой по дням недели;
- определения свободного для выполнения студентами индивидуальных заданий и подготовки к написанию курсовых проектов и работ.

Расстановка видов занятий в расписании происходит согласно нижеприведенному подалгоритму расстановки видов дисциплин с указанием номеров аудиторий, в которых планируются аудиторные занятия (восьмичасовые занятия; поточные учебные занятия; занятия по курсам (физическое воспитание); лекционные занятия по профилирующим дисциплинам учебного плана; практические, лабораторные и семинарские двухчасовые занятия) [4].

**Подалгоритм осуществления расстановки видов занятий** в расписании базируется на использовании соответствующего приоритета профессорско-преподавательского состава с указанием наименования дисциплин, фамилий преподавателей, номеров аудиторий (см. рис. 1). Приоритетное право преподавателей филиала на расстановку аудиторных занятий устанавливается в зависимости от занимаемой должности и их основных функциональных обязанностей, например: заместители директора; профессора кафедр; ведущие преподаватели; преподаватели выпускающих кафедр; преподаватели других кафедр филиала; внешние совместители [3]. Все данные, необходимые для работы алгоритма, будут доступны при взаимодействии с информацией, хранящейся в таблицах разработанной базы данных.

Таким образом, автоматизация процесса составления расписания в филиале ПГУ им. Т.Г. Шевченко в г. Рыбнице позволит значительно упростить этот сложный процесс, так как в течение долгого периода на практике использовался «ручной» подход к составлению учебного расписания. Он предполагает сбор и разделение на классы входной информации, построение вспомогательных таблиц, непосредственно составление расписания, его проверку и корректировку. При таком подходе составителям проблематично в короткие сроки получить расписание, которое бы учитывало основные аспекты филиала и соответствовало всем предъявляемым требованиям, относящимся как к учебному процессу, студентам, так и к самим преподавателям.

### 3. Выбор средств реализации программного продукта

Для реализации программного продукта была выбрана среда разработки Microsoft Visual Studio, поставляемая вместе с .NET, которая предоставляет необходимый инструментарий для эффективного и быстрого создания приложений с графическим интерфейсом.

Несмотря на то, что C# и .NET предназначены в первую очередь для web-разработки, их также активно применяют для создания приложений, которые должны устанавливаться на устройстве конечного пользователя, где и будет выполняться вся обработка данных. Разработку таких приложений обеспечивает библиотека Windows Forms, позволяющая проектировать графический интерфейс. Поставляемая вместе со средой библиотека базовых классов обладает достаточным функционалом для решения задач практически любой сложности.

Для разработки и управления базой данных (рис. 2) была выбрана СУБД MySQL. Для разработки модели базы данных был задействован электронный ресурс [dbdesigner.net](http://dbdesigner.net).

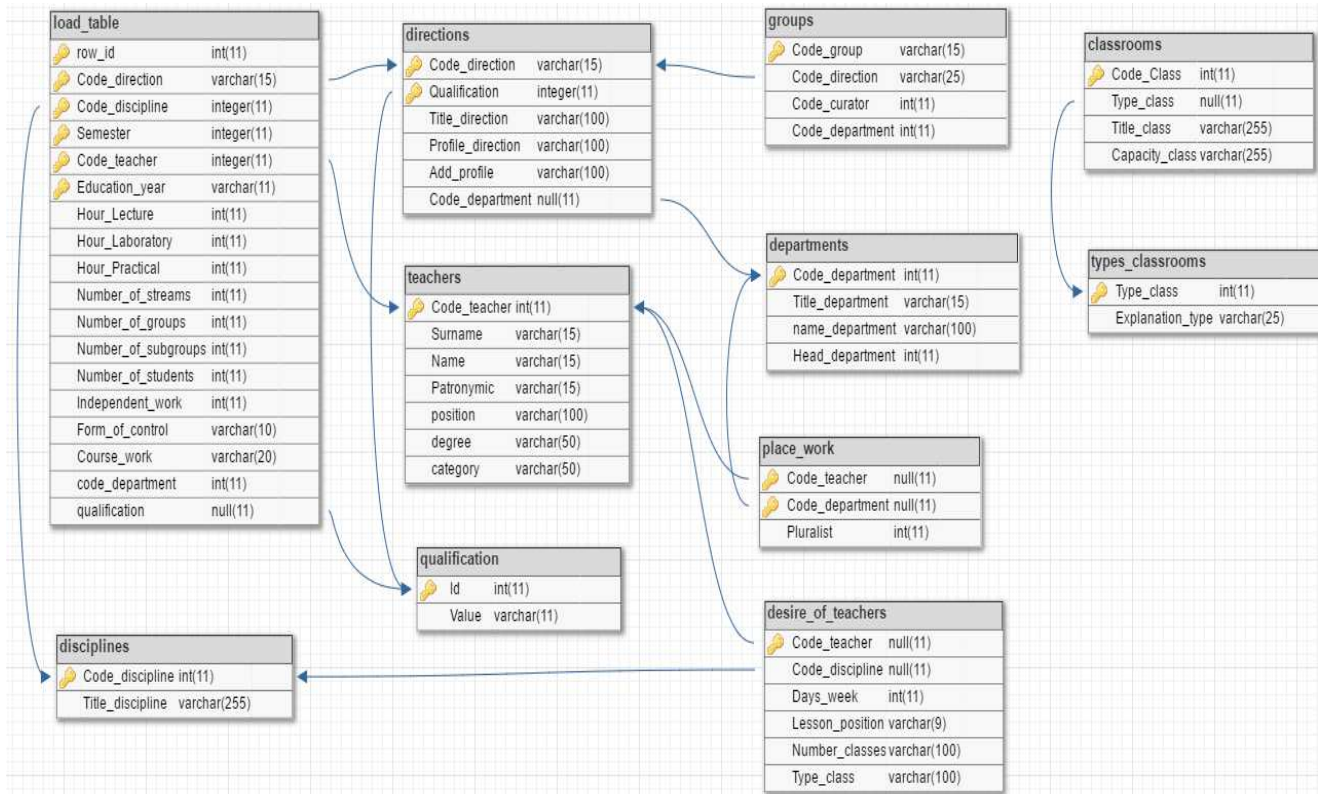


Рис. 2. Информационно-логическая модель базы данных для системы «Расписание»

#### 4. Описание логической структуры программного продукта

Формирование расписания происходит непосредственно заместителем директора по учебной работе и подчиняющимся ему учебным отделом. Но для того, чтобы собрать все сведения, необходимые для формирования расписания занятий, методистам учебного отдела приходится взаимодействовать с другими структурными подразделениями филиала (рис. 3).

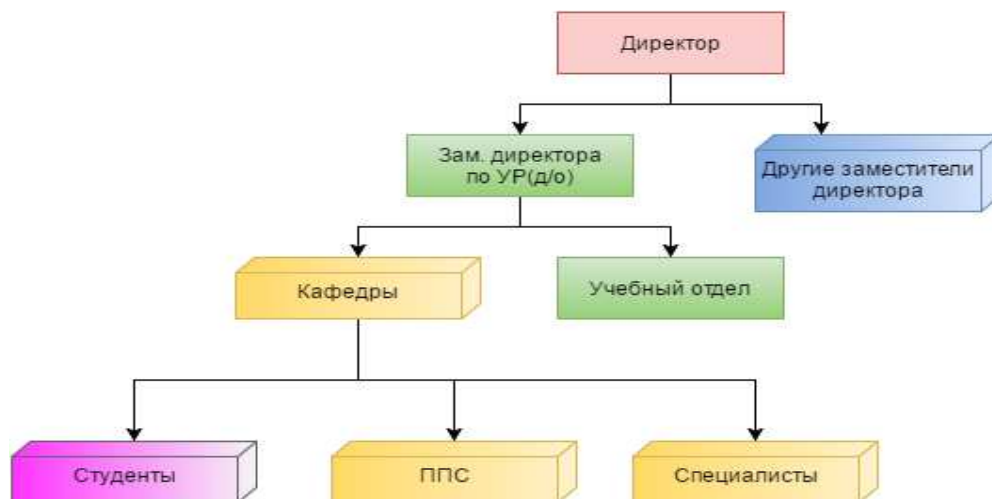


Рис. 3. Структурная модель предметной области

Основные действия при составлении расписания заместителя директора по учебной работе и движение основополагающих документов, используемых при формировании расписания [1], представлены ниже (рис. 4).

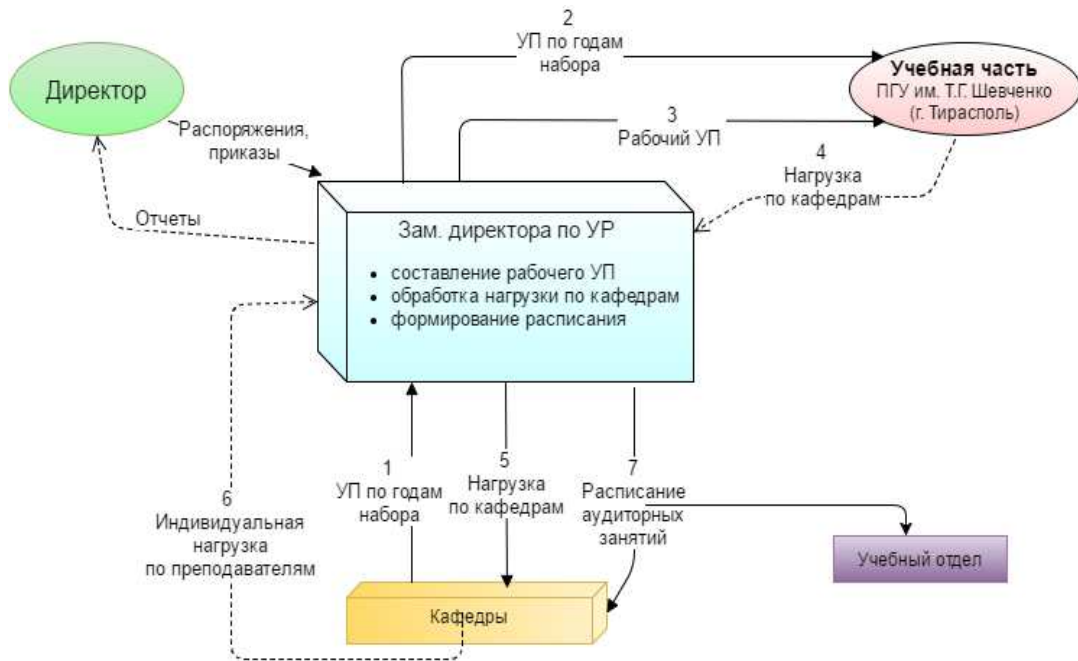


Рис. 4. Функции зам. директора по учебной работе при составлении расписания

При формировании базы данных и создании качественного программного продукта недостаточно учитывать только пожелания заказчика (зам. директора по учебной работе). Важно понимать, какой именно информацией система должна управлять. А для этого нужно знать, какие объекты попадают в предметную область проектируемой информационной системы и какие логические связи между ними существуют. Для формирования такого понимания построена информационно-логическая модель предметной области (рис. 5).

Информационно-логическая модель отображает данные предметной области в виде совокупности информационных объектов и связей между ними. Эта модель представляет данные в общем виде, подлежащие хранению в базе данных.

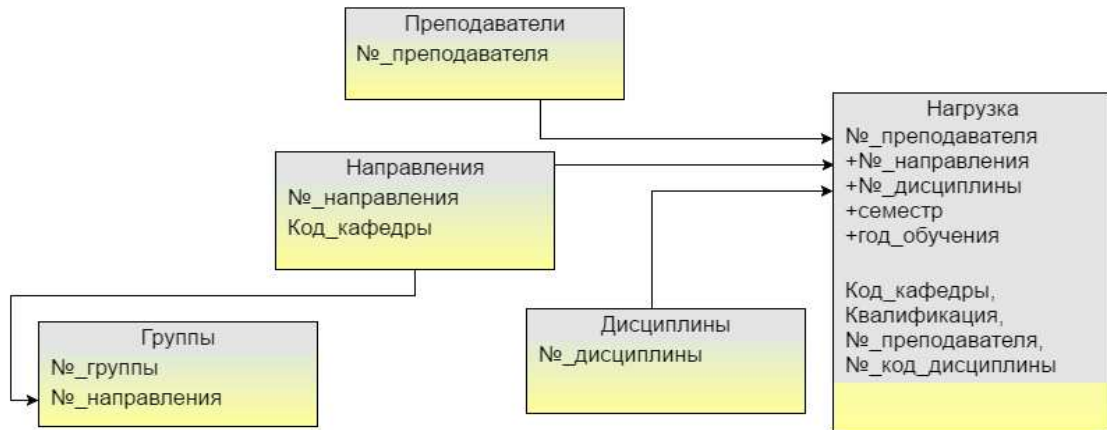


Рис. 5. Информационно-логическая модель предметной области

Проектирование структуры и архитектуры разработанного программного средства привело к выбору методов и средств реализации. Обоснован выбор среды разработки *Microsoft Visual Studio* и языка программирования *C#*. Описана методология формирования расписания и обоснована ее реализация на примере генетического алгоритма. Совокупность представленной структурной (см. рис. 3), функциональной (см. рис. 4) и информационно-логической (см. рис. 5) моделей после определения связей между объектами позволяет получить информационно-логическую модель разрабатываемой базы данных, не требующую дальнейших преобразований для создания реляционной базы данных, отвечающей требованиям нормализации.

### 5. Реализация и тестирование программного продукта

Работа программы начинается с ввода и отображения входной информации, содержащей данные о направлениях, кафедрах, преподавателях, группах и аудиторном фонде. В процессе работы программного продукта обрабатывается индивидуальная нагрузка преподавателей по кафедрам. К выходной информации относится окончательно сформированное расписание аудиторных занятий, которое можно экспортировать в документ Excel для дальнейшей работы.

Разработанный в программе алгоритм постоянно взаимодействует с сервером, на котором размещена разработанная база данных MySQL, обращаясь к основным таблицам: нагрузки ППС, преподавателей, академических групп, кафедр и направлений (рис. 6).

Кафедра	Направление	Дисциплина	Преподаватель	Семестр	Год обучения	Кол-во лекц.(ч)	Кол-во лаб.(ч)	Кол-во практ.(ч)	Поток	Группы	Подгруппы	Кол-во студ.
ИиПИ	09.03.2003	Физика	Глазов А. Б.	1	2015-2016	18	0	18	1	1	1	9
ИиПИ	44.03.052	Физика	Глазов А. Б.	1	2015-2016	18	0	18	1	1	1	8
ИиПИ	09.03.2004	Физика	Глазов А. Б.	3	2015-2016	36	0	18	1	1	1	8
ИиПИ	09.03.2004	Компьютерн...	Глазов А. Б.	4	2015-2016	38	38	0	1	1	1	8
ИиПИ	09.03.2004	Машинно-за...	Глазов А. Б.	5	2015-2016	38	76	0	1	1	2	15
ИиПИ	09.03.2004	Основы элек...	Глазов А. Б.	7	2015-2016	36	0	0	1	1	2	19
ИиПИ	09.03.2004	Сетевые техн...	Глазов А. Б.	7	2015-2016	36	0	0	1	1	2	19
ИиПИ	09.03.2004	Экономика п...	Тягульская ...	7	2015-2016	18	0	18	1	1	2	19
ИиПИ	09.03.2003	Физика	Глазов А. Б.	1	2015-2016	18	0	18	1	1	1	9
ИиПИ	44.03.052	Физика	Глазов А. Б.	1	2015-2016	18	0	18	1	1	1	8
ИиПИ	09.03.2004	Физика	Глазов А. Б.	3	2015-2016	36	0	18	1	1	1	8
ИиПИ	09.03.2004	Компьютерн...	Глазов А. Б.	4	2015-2016	38	38	0	1	1	1	8
ИиПИ	09.03.2004	Машинно-за...	Глазов А. Б.	5	2015-2016	38	76	0	1	1	2	15
ИиПИ	09.03.2004	Основы элек...	Глазов А. Б.	7	2015-2016	36	0	0	1	1	2	19
ИиПИ	09.03.2004	Сетевые техн...	Глазов А. Б.	7	2015-2016	36	0	0	1	1	2	19
ИиПИ	09.03.2004	Экономика п...	Тягульская ...	7	2015-2016	18	0	18	1	1	2	19
ИиПИ	09.03.2003	Физика	Глазов А. Б.	1	2015-2016	18	0	18	1	1	1	9
ИиПИ	44.03.052	Физика	Глазов А. Б.	1	2015-2016	18	0	18	1	1	1	8
ИиПИ	09.03.2004	Физика	Глазов А. Б.	3	2015-2016	36	0	18	1	1	1	8
ИиПИ	09.03.2004	Компьютерн...	Глазов А. Б.	4	2015-2016	38	38	0	1	1	1	8
ИиПИ	09.03.2004	Машинно-за...	Глазов А. Б.	5	2015-2016	38	76	0	1	1	2	15
ИиПИ	09.03.2004	Основы элек...	Глазов А. Б.	7	2015-2016	36	0	0	1	1	2	19
ИиПИ	09.03.2004	Сетевые техн...	Глазов А. Б.	7	2015-2016	36	0	0	1	1	2	19
ИиПИ	09.03.2004	Экономика п...	Тягульская ...	7	2015-2016	18	0	18	1	1	2	19

Выберите кафедру:  Год обучения:  Квалификация:

Рис. 6. Главное окно пользовательского интерфейса

Процесс составления расписания зависит от многих факторов, обуславливающих структуру и качество расстановки занятий. Для того, чтобы обеспечить оптимальное распределение предметов в сетке часов, необходимо строго учитывать специфику филиала.

Одним из главных ограничивающих условий, влияющих на процесс составления расписания, является шестидневный рабочий график преподавателей. В то время, когда в филиале использовался ручной способ составления расписания, он предполагал, что для большей части преподавателей, для которых университет – основное место работы, распределение дисциплин будет происходить в пятидневный срок, а на субботу будут вынесены занятия для преподавателей – внешних совместителей. Одно из требований заказчика заключалось в том, чтобы предлагаемая программа формировала расписание подобным образом.

При разработке была предусмотрена возможность смены количества рабочих дней и предложен выбор для указания их количества на текущий момент (рис. 7).

Кол-во раб. дней:  Кол-во пар:  Номер семестра:  Год обучения:

Рис. 7. Панель управления в разделе «Расписание»

Помимо этого, программа предусматривает возможность выбора количества пар, которое можно проводить в любой день недели. Но главные функции выполняются нажатием на соответствующие кнопки (на панели размещены три кнопки (см. рис. 7), отвечающие за определенные манипуляции над расписанием).

Кнопка «Сформировать» позволяет сформировать расписание согласно выбранным заранее данным о количестве рабочих дней, пар, номеру семестра, для которого планируется составить расписание и введенному году обучения.

Результат работы программы представлен на рисунке 8. Готовое расписание, по желанию пользователя, может быть экспортировано не только в файл формата Excel, но и размещен на сайт учебного заведения.

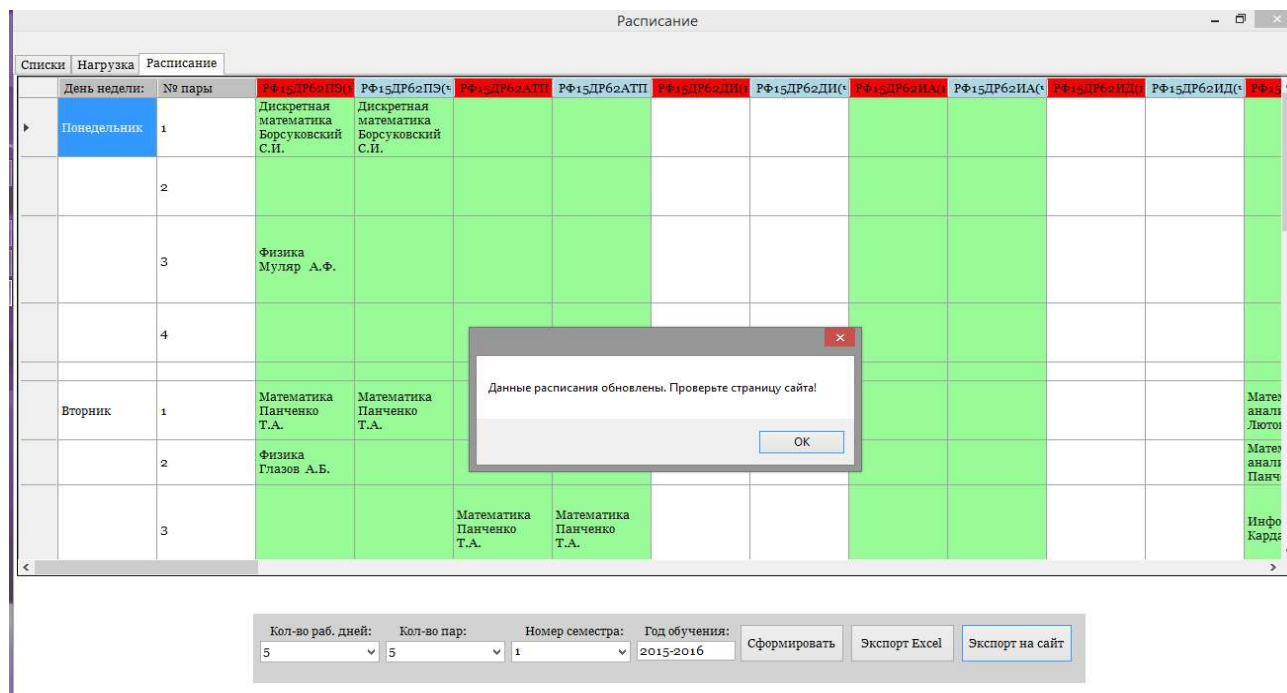


Рис. 8. Окно сообщения об окончании экспорта данных на сайт филиала

## Выводы

Результатом выполненного исследования является разработанный программный продукт, обеспечивающий автоматическое формирование расписания аудиторных занятий. Разработанный программный продукт динамически формирует около ста оптимальных вариантов расстановки занятий по курсам и академическим группам. Созданные варианты, получаемые при помощи генетического алгоритма составления расписания, обрабатываются в программе путем подсчета значений целевой функции (*fitness function*). Идеальный вариант результата работы алгоритма, когда значение целевой функции равняется нулю, то есть в расписании полностью отсутствуют окна, как у академических групп, так и у преподавателей. В случае если подобный вариант расстановки занятий в предлагаемых результатах отсутствует, то пользователю будет предложен вариант, значение целевой функции которого будет минимальным.

В итоге, разработанный программный продукт на основе введенных данных, а также оптимизирующих параметров расчета, позволяет получить наиболее правильный и отвечающий основным требованиям филиала вариант расписания аудиторных занятий. Дальнейшее его развитие может подразумевать разработку отчетности и ручную корректировку пользователем с элементом автоматической проверки расписания на корректность.



**Список литературы:**

1. Автоматическое составление расписания занятий образовательного учреждения [Электронный ресурс] / YouTube – Режим доступа: <https://www.youtube.com/watch?v=wFsqrX1a810>.
2. Деятельность вуза и ППС при кредитно-модульной организации учебного процесса [Электронный ресурс] / Факторы, обуславливающие корректность формирования расписания аудиторных занятий в вузах – Режим доступа: <http://pandia.ru/text/78/016/11164.php>.
3. Ерунов В.П. Некоторые вопросы формирования системы управления учебным процессом [Электронный ресурс] / В.П. Ерунов, И.И. Морковин. – Технология образовательного процесса: Межвузовской научн.-метод. конф, Оренбург: ОГБС, 2001. – с. 55. – Режим доступа к докладу: [http://vestnik.osu.ru/2001\\_3/7.pdf](http://vestnik.osu.ru/2001_3/7.pdf).
4. Кучеренко Ю.М. Формирование оптимального расписания аудиторных занятий в Рыбницком филиале ПГУ им. Т.Г. Шевченко / Л. Я. Козак, Ю.М. Кучеренко, И.А. Дубинин // Михаило-Архангельские чтения: X международная научн.-практ. конф. – 2015. – №3. С. 81-84.
5. Сборник нормативных актов по организации учебного процесса в ПГУ им. Т.Г. Шевченко. – Тирасполь, изд-во Приднестровского университета, 2014.
6. Составление расписания в вузе [Электронный ресурс] / Рекомендации по составлению расписания учебных занятий – Режим доступа: [http://irinaonina.narod.ru/5/5\\_1\\_8.html](http://irinaonina.narod.ru/5/5_1_8.html).

**Сведения об авторах**

**Козак Людмила Ярославовна**

Кандидат технических наук, доцент  
Филиал Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко в г. Рыбнице  
тел.: 00373-555-4-39-21  
E-mail: [Ludmilayaroslavovna@gmail.com](mailto:Ludmilayaroslavovna@gmail.com)

**Сташкова Ольга Витальевна**

Ст. преподаватель  
Филиал Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко в г. Рыбнице  
тел.: 00373-555-23912  
E-mail: [stashkova.ola@mail.ru](mailto:stashkova.ola@mail.ru)

**Гарбузник Елена Сергеевна**

Ст. преподаватель  
Филиал Приднестровского государственного университета им. Т.Г. Шевченко в г. Рыбнице  
тел.: 00373-555-23912  
E-mail: [goldfenix@mail.ru](mailto:goldfenix@mail.ru)

**References:**

1. Automatic scheduling of educational institutions [Electronic resource] / YouTube - Access mode: <https://www.youtube.com/watch?V=wFsqrX1a810>.
2. The activities of the university and the faculty at the credit-modular organization of the educational process [Electronic resource] / Factors that determine the correctness of the formation of the schedule of classroom classes in universities - Access mode: <http://pandia.ru/text/78/016/11164.php>.
3. Erunov B.P. Some issues of formation of the educational process management system [Electronic resource] / B.P. Erunov, I.I. Morkovin. - Technology of the educational process: Interuniversity scientific method. Conf, Orenburg: OGBBS, 2001. - с. 55. - The mode of access to the report: [http://vestnik.osu.ru/2001\\_3/7.pdf](http://vestnik.osu.ru/2001_3/7.pdf).
4. Kucherenko Y.M. Formation of the optimal schedule of classroom classes in the Rybnitsa branch of the PGU named T.G. Shevchenko / L. Y. Kozak, Y.M. Kucherenko, I.A. Dubinin // Michael-Arkhangelsk readings: X international scientific-practical. conf. - 2015. - №3. P. 81-84.
5. Collection of regulations on the organization of the educational process in PGU named T.G. Shevchenko. – Tiraspol: publishing house of Transnistrian University, 2014.
6. Scheduling at the university [Electronic resource] / Recommendations for scheduling studies - Access mode: [http://irinaonina.narod.ru/5/5\\_1\\_8.html](http://irinaonina.narod.ru/5/5_1_8.html).

*Статья поступила в редколлегию 10.09.18.*

*Рецензент: д.т.н., доцент Брянского государственного технического университета  
Аверченков А.В.*

*Статья принята к публикации 12.12.18.*

**Information about authors:**

**KozakLudmila**

Candidate of technical sciences, principal lecturer  
Rybnitsa branch of Pridnestrovian Shevchenko State University  
phone.: 00373-555-4-39-21  
E-mail: [Ludmilayaroslavovna@gmail.com](mailto:Ludmilayaroslavovna@gmail.com)

**Stashkova Olga**

senior lecturer  
Rybnitsa branch of Pridnestrovian Shevchenko State University  
phone.: 00373-555-23912  
E-mail: [stashkova.ola@mail.ru](mailto:stashkova.ola@mail.ru)

**Garbuznyak Elena**

senior lecturer  
Rybnitsa branch of Pridnestrovian Shevchenko State University  
phone.: 00373-555-23912  
E-mail: [goldfenix@mail.ru](mailto:goldfenix@mail.ru)



**Шестопап Оксана Викторовна**

Ст. преподаватель

Филиал Приднестровского государственного  
университета им. Т.Г. Шевченко в г. Рыбнице

тел.: 00373-555-23912

E-mail: [oksanashes@gmail.com](mailto:oksanashes@gmail.com)

**Shestopal Oksana**

senior lecturer

Rybnitsa branch of Pridnestrovian Shevchenko State  
University

phone.: 00373-555-23912

E-mail: [oksanashes@gmail.com](mailto:oksanashes@gmail.com)

УДК: 33.334.72

DOI: 10.30987/article\_5c387d6159b0a0.26296197

А.С. Сазонова

## **ПОДХОД К ИЗМЕРЕНИЮ И ПРАКТИКА ОЦЕНКИ ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕГИОНАЛЬНЫХ СИСТЕМ**

*В статье рассматривается сущность и структура инновационного потенциала организационных систем. Проанализированы основные подходы к определению понятия инновационного потенциала и определению содержания понятия. Предложен подход к формированию интегрированного показателя.*

**Ключевые слова:** инновационный потенциал, инновации, оценка инновационного потенциала.

A.S. Sazonova

## **APPROACH TO MEASUREMENT AND PRACTICE OF EVALUATING AN INNOVATIVE POTENTIAL OF REGIONAL SYSTEMS**

*The article discusses the nature and structure of the innovative potential of organizational systems. The main approaches to the definition of the concept of innovative potential and the definition of the content of the concept are analyzed. An approach to the formation of an integrated indicator is proposed.*

**Keywords:** innovation potential, innovation, assessment of innovation potential.

### **Введение**

В настоящее время в мировом хозяйстве активно формируется новый тип интенсивного экономического роста, который обуславливает повышение внимания к проблеме совершенствования механизмов научно-технического развития экономики, взаимодействия институтов государства, научно-технической сферы и рыночных сил [1]. Он имеет в своей основе систему наращивания знаний и воплощения их в инновации, а также механизмы расширенного воспроизводства и капитализации инноваций. Эффективность этих механизмов определяет инновационную способность экономики, т. е. способность создавать и осуществлять диффузию новшеств в хозяйственной среде [2,3].

Одним из главных механизмов реструктуризации экономики России, её модернизации и устойчивого подъёма должна стать национальная инновационная система, поскольку именно этот механизм создаёт необходимые условия и предпосылки для перехода экономики к её новому технологическому укладу, обеспечивающему инновационный тип экономического роста [4].

Особенностью инновационного развития России является высокая степень неравномерности регионального развития. Это связано с целым рядом факторов: специфика каждого региона, исторически сложившиеся ведущие отрасли, географическое положение, а также инновационный потенциал. В условиях современной экономики именно величина

инновационного потенциала предопределяет потенциальные возможности и темпы роста региональной инновационной системы. Все это обуславливает актуальность исследования данного понятия, раскрытия его сущности и содержания, а также необходимости поиска методов оценки данной величины.

За последние годы в литературе сложилось множество подходов к определению понятия «инновационный потенциал». Одни авторы рассматривают данную категорию как совокупность ресурсов и возможностей системы к созданию и внедрению новшеств. Другие определяют инновационный потенциал как меру готовности региона к созданию и продвижению инноваций. Третья группа авторов трактует инновационный потенциал как результат инновационной деятельности, отождествляя в некотором роде понятие «инновационный потенциал» и «инновационный процесс».

Методы современного анализа инновационного потенциала представляют собой системное комплексное исследование инновационной среды с целью обеспечения более качественного и эффективного выполнения функций инновационной деятельности.

Системный и комплексный подход вытекает из общей методологии комплексного экономического анализа, предполагающего рассмотрение объекта исследования как системы. Применительно к анализу инновационного потенциала это означает, что для ведения любой деятельности, в том числе и инновационной, хозяйствующему субъекту необходимо обеспечить сбалансированное наличие ресурсов. В данном случае имеется в виду материально-техническая база, трудовые ресурсы, финансовые возможности и т. д. В то же время без соответствующих условий внешней среды, деятельность, полностью обеспеченная ресурсами не будет успешной. Поэтому, говоря об инновационном потенциале необходимо учитывать, что успешность деятельности зависит от сбалансированности внутренних ресурсов и внешних факторов, которые способны или стимулировать, или препятствовать осуществлению инновационной деятельности. К тому же анализ инновационного потенциала должен учитывать как влияние различных факторов на изучаемый процесс, так и воздействие данного процесса на другие сферы деятельности в систем [5].

В процессе изучения результатов исследований других авторов, было выявлено, что единого подхода к оценке инновационного потенциала экономической системы не существует. Проблемой измерения инновационного потенциала заняты исследователи различных международных школ и научных организаций. Разрабатываемые этими организациями методы и подходы к оценке используются в различных целях для каждой из сторон, участвующей во внедрении инноваций.

В процессе данного исследования было проанализировано большое количество различных методов оценки инновационного потенциала. В зависимости от принятого определения и выбранного подхода к определению содержания инновационного потенциала сложились и подходы к оценке показателя.

Одними из наиболее популярных и часто встречающихся в научных работах методами расчета комплексного показателя инновационного потенциала являются методы балльной оценки.

В основе методов балльной оценки лежит определение коэффициентов значимости общих и частных показателей ИП региона на основе экспертных оценок. Выбор факторов-индикаторов определяется принятым в конкретном исследовании содержанием понятия.

Так, большинство авторов определяют инновационный потенциал региона как некую совокупность взаимосвязанных компонент: научной, технической, кадровой, финансовой, информационной, материальной и др. При данном рассмотрении инновационный потенциал региона представляется как совокупность региональных потенциалов:

1. Научно-технический потенциал отражает совокупность взаимосвязанных условий и ресурсов, обеспечивающих, с одной стороны, воспроизводство апробированных и

возможность получения новых научных знаний, а с другой, возможность разработки новшеств.

2. Трудовой потенциал характеризует обеспеченность региона квалифицированными трудовыми ресурсами, необходимыми для инновационного развития. В условиях инновационного развития первостепенное место занимают трудовые ресурсы, непосредственно генерирующие новые знания, являющиеся основой инновационного процесса.

3. Инвестиционный потенциал характеризует наличие и достаточность собственных финансовых ресурсов региона для осуществления инновационной деятельности.

4. Рыночный потенциал. Конечным этапом инновационной деятельности является реализация инноваций, соответственно наличие спроса на результаты инновационной деятельности на рынке повышает возможности инновационного развития региона.

5. Организационно-управленческий потенциал характеризуется нормативными документами по вопросам инновационной деятельности, а также наличием стратегии инновационного развития региона.

6. Внешнеэкономический потенциал отражает возможности внешнеэкономического сотрудничества.

В разных исследованиях эта совокупность показателей и групп показателей может быть различной.

В работах С.Г.Тишкова [6] можно встретить несколько иную совокупность факторов, являющихся частью инновационного потенциала:

- финансовый потенциал;
- экономический потенциал;
- образовательный потенциал;
- научный потенциал.

При расчетах уделяется внимание как совокупному потенциалу, так и потенциалу отдельных компонент. Ранжирование регионов происходит по группам в зависимости от полученных значений.

Теребова С.В. и Вячеславов А.М. [7] для оценивания инновационного потенциала берут три группы показателей: показатели на входе инновационной системы (финансирование, кадровый потенциал), показатели внутри инновационной системы (институциональные условия), показатели результативности инновационной системы на выходе (число научных изобретений и т.д., поступление патентных заявок и выдача свидетельств на полезные модели, удельный вес инновационной продукции в общем объеме отгруженной продукции, доля отгруженной инновационной продукции в ВРП). Жиц Г.И. [8] в своих исследованиях отмечает, что инновационный потенциал включает в себя пять основных элементов: человеческие ресурсы, институциональная среда, инвестиции и финансирование, организационный элемент и менеджмент, консолидированные показатели (развитие региона с точки зрения обмена технологиями, доля инновационных продуктов в объеме ВВП региона и т.д.).

В рамках каждой группы выделяется набор факторов-показателей, характеризующих каждую группу. Изучение совокупности выбранных факторов, их значений и взаимного влияния позволяет провести комплексный анализ как каждой отдельной группы, так и обобщающей величины инновационного показателя региона. Таким образом, становится возможным проанализировать текущую ситуацию в каждом конкретном регионе и дать некоторые рекомендации по наращиванию инновационного потенциала.

Исследователи Е.П. Маскайкин и Т.В. Арцер [9] дают следующее определение инновационному потенциалу: это возможность и способность региона формировать и использовать инновационные ресурсы, необходимые для инновационного развития, что позволяет региону создавать, распространять и использовать различного рода новшества.

Предлагаемая авторами методика предусматривает расчет интегрированного показателя, оценивающего инновационный потенциал в части его формирования и использования. Для оценки условий формирования инновационного потенциала (ресурсный компонент) предлагается рассчитать обобщающий показатель формирования инновационного потенциала региона, а для оценки использования (результатирующий компонент) – обобщающий показатель использования инновационного потенциала региона. Ресурсный компонент проявляется в наличии и накоплении промышленно-производственных площадей и оборудования, в совокупности финансовых источников и запасов, необходимых для осуществления инновационной деятельности, в совокупности человеческих ресурсов, объектов интеллектуальной собственности, нормативно-правовых актов, регулирующих инновационную деятельность и др. Результатирующий компонент проявляется в виде внедрения новых технологий, инновационных продуктов и др.

Другая группа методов оценки - матричные методы, которые позволяют оценить количественные пропорции между различными составляющими инновационного потенциала в разрезе видов экономической деятельности: промышленности, сельского хозяйства, инвестиции и др. Суть матричных методов заключается в построении матрицы стоимостных оценок компонент инновационного потенциала, используемых в рассматриваемых отраслях. В качестве компонент большинство исследователей выбирают научно-техническую составляющую, трудовую (кадровую) составляющую, материальную (ресурсную), финансовую и другие. Отрасли также выбираются экспертно на основе целей каждого конкретного исследования.

Разновидностью матричных методов является метод SWOT-анализа, оперативный диагностический анализ системы и ее среды. В процессе анализа выявляются сильные и слабые стороны системы, возможности, предоставляемые средой и угрозы для системы с внешней стороны. После составления списка сильных и слабых сторон потенциала системы, а также возможностей и угроз со стороны внешней среды между ними устанавливаются связи и проводят анализ совокупностей.

Матричные методы имеют бесспорное преимущество. Они позволяют оценить вклад каждой отрасли в совокупную величину инновационного потенциала, а также провести комплексный анализ рассматриваемых отраслей народного хозяйства в разрезе инновационного развития.

### **Выводы**

Разнообразие подходов к определению понятия инновационного потенциала организационной системы и методов его оценки говорит об актуальности исследований в этой области. В современных мировых экономических системах инновации играют ключевую роль, а оценка инновационного потенциала является важной составляющей механизма управления системой. Рассмотренные в данной статье методы оценки позволяют:

- определить уровень инновационного потенциала организационной системы;
- выполнить сравнительный анализ систем по обобщенному показателю инновационного потенциала и по его составляющим.
- разработать программы развития организационных систем с учетом эффективного использования инновационных возможностей системы.

**Список литературы:**

1. Пухова Л. А. Проблемы перехода экономики России на инновационный тип развития // Молодой ученый. — 2014. — №7. — С. 395-398.
2. Зверев А. Проблемы перехода к инновационной экономике / А. Зверев // Финансовая аналитика: проблемы и решения. — 2008. — № 9.
3. Ивантер В.В. Перспективы и условия инновационно-технологического развития экономики России// В. В. Ивантер, Н. И. Комков / Проблемы прогнозирования. — 2007. — № 3.
4. Голиченко О.Г. Национальная инновационная система России: состояние и пути развития// О. Г.Голиченко / М.: Наука, 2006.
5. Егорова С.Е. Инновационный потенциал региона: сущность, содержание, методы оценки / С.Е.Егорова, Н.Г.Кулакова // Вестник ПсковГУ №4. – 2014.
6. Тишков С. В. Инновационный потенциал российских регионов / С. В. Тишков // Экономика российских регионов: материалы II молод. эконом. форума, 12–13 ноября 2009 г. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН,- 2010. -С. 70–73.
7. Теребова С.В. Инновационный климат в регионе: состав и факторы развития/ С.В.Теребова, А.М.Вячеславов// Экономика региона: проблемы и перспективы развития.-2011.-вып. 3(55).
8. Жиц, Г.И. Способности и возможности: рассуждения о некоторых аспектах методологии оценки влияния инновационного потенциала на развитие социально-экономических систем различного уровня сложности / Г. И. Жиц // Инновации. – 2008. – №11. – С. 102-107.
9. Маскайкин Е.П. Инновационный потенциал региона: сущность, структура, методика оценки и направления развития / Е.П. Маскайкин, Т.В. Арцер // Экономика и менеджмент.- 2009.- №10.

**Сведения об авторах:**

**Сазонова Анна Сергеевна**  
Кандидат технических наук, доцент,  
Доцент каф. «Компьютерные технологии и системы»  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный  
технический университет», тел. 8-903-869-28-18  
e-mail: [asazonova@list.ru](mailto:asazonova@list.ru)

**References:**

1. Pukhova L. A. Problems of the transition of the Russian economy to the innovative type of development // Young Scientist. - 2014. - №7. - p. 395-398.
2. Zverev A. Problems of transition to an innovative economy / A. Zverev // Financial analytics: problems and solutions. - 2008. - № 9.
3. Ivanter V.V. Prospects and conditions for innovative-technological development of the Russian economy // V. V. Ivanter, N. I. Komkov / Problems of Forecasting. - 2007. - № 3.
4. Golichenko O.G. National Innovation System of Russia: state and ways of development // O. G. Golichenko / M.: Nauka, 2006.
5. Yegorova S.E. Innovative potential of the region: the essence, content, assessment methods / S.E. Egorova, N.G. Kulakova // Bulletin of Pskov State University №4. - 2014.
6. Tishkov S. V. Innovation potential of Russian regions / S. V. Tishkov // Economy of Russian regions: materials II young. economy Forum, November 12–13, 2009 Petrozavodsk: Karel. scientific Center RAS, - 2010. -С. 70–73.
7. Terebova S.V. Innovative climate in the region: composition and development factors / S.V. Terebova, A.M.Vyacheslavov // Economy of the region: problems and development prospects.-2011.-vol. 3 (55).
8. Zhits, G.I. Abilities and opportunities: discourse on some aspects of the methodology for assessing the impact of the innovation potential on the development of socio-economic systems of various levels of complexity / G. I. Zhits // Innovations. - 2008. - №11. - pp. 102-107.
9. Maskaikin E.P. Innovative potential of the region: the nature, structure, assessment methodology and development directions / E.P. Maskaykin, T.V. Arzer // Economics and Management.- 2009.- №10.

*Статья поступила в редколлегию 31.09.18.*

*Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета  
Лозбинец Ф.Ю.*

*Статья принята к публикации 12.12.18.*

**Information about authors:**

**Sazonova Anna Sergeevna**  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
Associate Professor of the department «Computer  
technologies and systems»  
FSBEI HE «Bryansk State Technical University»,  
tel. 8-903-869-28-18  
e-mail: [asazonova@list.ru](mailto:asazonova@list.ru)



## *Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами, системы автоматизации проектирования*

УДК: 004.896

DOI: 10.30987/article\_5c387d61c4ead8.61787791

А.Н. Афанасьев, С.И. Бригаднов

### **АВТОМАТИЗАЦИЯ СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ПРОЕКТНЫХ РЕШЕНИЙ И ОБУЧЕНИЯ ПРОЕКТИРОВЩИКА ИЗДЕЛИЙ МАШИНОСТРОЕНИЯ СРЕДСТВАМИ САПР КОМПАС**

*Разработана комплексная система анализа проектных решений, выполненных в САПР КОМПАС-3D, и обучения проектировщика. Разработано математическое обеспечение комплексной системы анализа проектных решений и обучения проектировщика: метод структурно-параметрического анализа проектных решений, метода автоматизированной генерации правил для анализа проектных решений, ассоциативно-ориентированная модель компетенций проектировщика, алгоритм формирования траектории обучения автоматизированному проектированию. Разработана архитектура комплексной системы, описаны основные ее компоненты: блок анализа проектных решений, блок обучения проектировщика.*

**Ключевые слова:** САПР КОМПАС, анализ проектных решений, обучение проектировщика.

A.N. Afanasyev, S.I. Brigadnov

### **AUTOMATION OF STRUCTURAL AND PARAMETRIC ANALYSIS OF PROJECT DECISIONS AND TRAINING OF THE DESIGNER OF MACHINE-BUILDING PRODUCTS WITH CAD COMPASS**

*A comprehensive system for analyzing design solutions made in CAD KOMPAS-3D and design training was developed. The mathematical software for a complex system for analyzing design decisions and designing a designer is developed: a method of structural and parametric analysis of design decisions, a method of automated rule generation for analyzing design solutions, an associative-oriented model of designer competences, an algorithm for generating an automated design learning trajectory. The architecture of the integrated system has been developed, its main components are described: a block for analyzing design solutions, a block for training a designer.*

**Keywords:** CAD COMPASS, analysis of design solutions, training of the designer.

#### **Введение**

Обеспечение конкурентоспособности современных промышленных и проектных предприятий (организаций) определяется степенью информатизации производственного процесса, в первую очередь использованием САПР, позволяющих повысить качество проектных решений, сократить сроки проектирования и ресурсы. При этом важными задачами являются оценка и возможность повторного использования проектных решений, эффективность решения которых позволяет улучшить характеристики объектов проектирования, сократить время, затрачиваемое на разработку документации, преобразование данных и поиск информации об изделиях.

САПР «КОМПАС» представляет собой профессиональную систему трехмерного моделирования, ставшую стандартом для множества промышленных предприятий за счет удачного сочетания простоты освоения и легкости работы с мощными функциональными возможностями твердотельного и поверхностного моделирования, которые решают большинство основных задач проектировщиков. В систему заложены специальные средства

работы со сложными проектами, содержащими тысячи элементов. Специализированные приложения и библиотеки стандартных элементов, а также расчетные модули и средства визуализации и анимации повышают эффективность работы конструкторов и проектировщиков.

Задачи промышленного конструирования требуют наличия определенных компетенций у проектировщика, которые сложно приобрести с использованием классических подходов к обучению. Поэтому создание эффективных методов и средств обучения проектировщика автоматизированному проектированию является необходимым условием для решения и выполнения промышленных задач в области автоматизированного проектирования машиностроительных объектов.

Таким образом, актуальной задачей в области автоматизированного проектирования машиностроительных объектов является повышения уровня автоматизации структурно-параметрического анализа проектных решений за счет повторности их использования, сокращения количества проектных операций и обеспечения соответствующих компетенций проектировщиков.

## **1. Обзор методов и систем анализа и оптимизации проектных решений САПР**

В системах автоматизированного проектирования представлены различные подсистемы анализа, например: прочностной анализ, включающий статический расчёт, расчёт устойчивости, расчёт собственных частот и формы собственных колебаний, расчёт стационарной теплопроводности и термоупругости; анализ динамического поведения машин и механизмов; подсистема КОМПАС-Эксперт, включающие проверки на соответствие стандартам оформления (расстояние между размерными линиями, размещение текста, наличие пересечений у размерной линии, стили линий и засечек и т. п.), соответствие ограничительным перечням предприятия (разрешенное значение шероховатости, качества, резьб и т. п.), соответствие правилам работы в КОМПАС (ручной ввод размеров, привязка обозначения позиции к спецификации, использование объекта осевая, а не линии со стилем осевая и т. п.); расчёт размерных цепей и пружин; оптимизация зубчатого зацепления; подбор электродвигателей, редукторов и муфт. При этом в САПР отсутствует анализ действий проектировщиков.

Проведен обзор систем анализа проектных решений и широко применяемых на производстве САПР: NX, CATIA V5, Creo, Autodesk Inventor, SOLIDWORKS 3D CAD, CADfix, CADIQ, 3DTransVidia, Heidelberg CAx Quality Manager, SOLIDWORKS Design Checker, Design QA, GeometryQA, PrescientQA, iCHECK IT, Knowledge Advisor, Knowledge Expert, ModelCHECK, NX Check-Mate, Q-Checker. Рассмотренные инструменты включают в себя анализ трехмерных моделей, сборок и чертежей, связанных с конкретным программным обеспечением САПР. Основными недостатками данных систем анализа проектных решений является отсутствие функций по определению неоптимальных последовательностей проектных операций, отсутствие возможности автоматического перестроения трехмерной модели машиностроительного изделия на основе анализа дерева модели проектного решения.

## **2. Формирование списка компетенций проектировщика**

Для формирования списка компетенций проектировщика были проанализированы следующие профессиональные стандарты, рабочие программы, связанные с проектной деятельностью в САПР:

- профессиональный стандарт «Конструктор в автомобилестроении»;
- профессиональный стандарт «Специалист по компьютерному конструированию (автоматизированному производству)»;

- рабочая программа по направлению подготовки «Технологические машины и оборудование»;
- рабочая программа по направлению подготовки «Системы автоматизированного проектирования технологических процессов»;
- сертификационные тесты от компании АСКОН по направлению «КОМПАС - 3D. Машиностроительное направление».

Выделены следующие компетенции проектировщика [1]: знание общих сведений о САПР; знание предметной области автоматизированного проектирования; знание общих принципов моделирования; умение создавать рабочий чертеж; умение создавать сборочную единицу; умение создавать сборку изделия; умение создавать компонент в контексте сборки; умение создавать сборочный чертеж сборочной единицы; умение создавать сборочный чертеж изделия; умение создавать спецификации; навыки твердотельного моделирования в САПР; навыки добавления стандартных изделий; навыки использования тел вращения; использование методик проектирования в САПР; навыки коллективной работы над проектным решением; умеет использовать элементы по сечениям; умеет использовать пользовательские библиотеки трехмерных моделей; навыки построения листовых деталей; способен построить трехмерную модель по плоскому чертежу; навыки построения кинематических компонентов и пространственных кривых.

### **3. Анализ особенностей процесса обучения автоматизированному проектированию**

Адаптивные методы позволяют повысить эффективность и качество обучения, а также сократить время процесса обучения за счет отслеживания траектории обучения обучаемого, изменяя последовательность предоставления теоретического учебного материала и практических заданий. Используются следующие механизмы адаптации: на основе правил, адаптивная аннотация и сортировка ссылок, экспертная система на основе инструкций и шаблонов, адаптивная гипермедиа, рекомендательные системы, авторский алгоритм.

Проведен анализ адаптивных автоматизированных обучающих систем (АОС), позволяющих персонализировать процесс обучения, таких как: ELM-ART, Web F-SMILE, ADIS, авторская система Васильевой, Protus, авторская АОС Канева Д.С. [2] и др. В рассмотренных АОС отсутствуют механизмы интеграции с моделью компетенции инженера-проектировщика. Рекомендательная часть реализована лишь в системах Web F-SMILE, Protus, а также в авторской АОС Канева Д.С.

В результате анализа были выделены требования, предъявляемые к разработке автоматизированной системы обучения проектировщика проектной деятельности в САПР:

- интеграция с моделью компетенций проектировщика;
- формирование альтернативного сценария обучения проектировщика;
- оценка эффективности и качества обучения проектировщика;
- формирование рекомендаций проектировщику в процессе обучения.

### **4. Разработка математического обеспечения комплексной системы анализа проектных решений и обучения проектировщика**

Разработан новый метод структурно-параметрического анализа проектных решений на основе последовательности проектных операций.

Сущность метода заключается в поиске неоптимально выполненных проектировщиком проектных операций на основе анализа дерева модели проектного решения и анализа операций объектов трехмерного моделирования, построенных в среде САПР КОМПАС-3D. Метод позволяет перестроить дерево модели проектного решения и классифицировать изделия машиностроительных объектов для повторного использования трехмерных моделей при конструировании твердотельных изделий в САПР КОМПАС-3D.

Анализ последовательности проектных операций объектов трехмерного моделирования, выполненных в среде САПР КОМПАС-3D, осуществляется на основе правил. Правило для анализа проектных операций состоит из следующих компонентов: тип операции, текстовое описание правила, условие срабатывания правила. Если для последовательности проектных операций найдено правило, формируется соответствующая рекомендация проектировщику. Более подробно метод структурно-параметрического анализа изложен в работе [3].

Разработан метод автоматизированной генерации правил для анализа проектных решений, который заключается в автоматическом заполнении шаблонов правил анализа проектных решений, выполненных в САПР КОМПАС-3D, на основе определения зависимостей между проектными операциями проектировщика. Метод позволяет автоматизировано формировать новые правила для анализа проектных решений на основе уже имеющихся фактов и правил. Полученные правила пополняют базу правил анализа проектных решений и используются в методе структурно-параметрического анализа. Корректность сгенерированных правил проверяет эксперт. Шаблоны правил заполняются в результате поэлементного анализа последовательности проектных операций при построении трехмерного объекта в САПР КОМПАС-3D.

Разработаем ряд моделей, составляющих научную основу метода автоматизированной генерации правил для анализа проектных решений.

Модель шаблона имеет следующую структуру:

$$TMP = (id, type, initial, derivatives, params, Fc, Fa), \quad (1)$$

где  $id$  – множество идентификаторов правил,  $type \in TypesOperation$  – множество типов операций,  $initial$  – множество исходных объектов для выполнения проектной операции,  $derivatives$  – множество производных объектов после выполнения проектной операции,  $params \in ParamsOp$  – множество параметров операции со значением,  $Fc = initial \times derivatives \rightarrow condition$  – функция формирования условия выполнения правила анализа проектного решения,  $Fa = condition \times type \rightarrow action$  – функция, определяющая действия при срабатывании правила.

Модель сформированного нового правила для анализа проектных решений имеет следующий вид:

$$NR = (id, type, txt_c, txt_a), \quad (2)$$

где  $id$  – множество идентификаторов правил,  $type \in TypesOperation$  – множество типов операций,  $txt_c$  – множество описаний условий срабатывания правил,  $txt_a$  – множество рекомендуемых действий при срабатывании правил, например: замена неоптимальных действий проектировщика на оптимальную последовательность проектных операций.

Алгоритм автоматизированной генерации правил состоит из 11 шагов и представлен ниже.

**Шаг 1.** Запуск проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС, на анализ.

**Шаг 2.** Анализ истории построения трехмерного машиностроительного объекта.

Формируется последовательность проектных операций построения трехмерной модели – XML-описание истории построения.

**Шаг 3.** Формирование шаблона правила для анализа, содержащего следующие компоненты:

- объект анализа;
- тип проектной операции ( $type$ );
- исходные объекты проектной операции ( $initial$ );
- производные объекты проектной операции ( $derivatives$ );

–параметры проектной операции (*params*).

**Шаг 4.** Автоматическое определение взаимосвязей между проектными операциями в результате использования метода структурно-параметрического анализа.

**Шаг 5.** Автоматическое извлечение параметров проектных операций.

**Шаг 6.** Автоматическое заполнение компонентов шаблона правила для анализа.

**Шаг 7.** Анализ исходных (*initial*) и производных (*derivatives*) объектов проектных операций. Формирование условия для срабатывания правила (*condition*).

**Шаг 8.** Анализ сформированного условия (*condition*) и типа проектных операций для формирования действий (*action*) при срабатывании правила.

**Шаг 9.** Формирование шаблона нового правила для анализа на основе шагов 7 и 8.

**Шаг 10.** Проверка сгенерированного нового правила на корректность экспертом.

**Шаг 11.** Занесение нового правила в базу правил анализа проектных решений, выполненных в САПР КОМПАС-3D.

Разработано математическое обеспечение комплексной системы обучения: модель компетенций (в качестве теоретической базы использовался аппарат параллельных сетевых схем алгоритмов[4]), алгоритм формирования персонифицированной траектории обучения, модель предметной области.

В предметной области выделены следующие классы:

–дидактическая единица (ДЕ);

–учебный материал (УМ) – набор сгруппированных по какому-либо признаку дидактических единиц;

–тестовые задания (ТЗ) – группирует теоретические вопросы для отдельно выбранной ДЕ;

–контрольное задание (КЗ) – группирует знания, умения и навыки по ряду ДЕ.

–тема изучения – группирует набор УМ, ТЗ и КЗ.

## **5. Разработка архитектуры и реализация комплексной системы анализа проектных решений и обучения проектировщика**

Обобщенная схема комплексной системы анализа проектных решений и обучения проектировщика представлена на рисунке 1. В основу математического обеспечения положены методы, модели и алгоритмы анализа и адаптивного обучения, изложенные выше.

Система состоит из двух основных компонентов: блок анализа проектных решений и блок обучения проектировщика.

Блок анализа проектных решений – предназначен для управления анализом проектного решения, выполненного в САПР КОМПАС-3D, с составлением рекомендаций и корректировки модели обучаемого проектировщика с учетом сформированных рекомендаций. Обеспечивает перестроение проектного решения на основе оптимальной последовательности проектных операций.

В блоке анализа проектных решений содержится механизм формирования оптимальной последовательности проектных операций с целью перестроения дерева модели проектного решения и формирования соответствующих рекомендаций обучаемому проектировщику.

Блок анализа проектных решений также позволяет классифицировать трехмерные модели машиностроительных изделий, используя различные модули анализа для определенных классов объектов, таких как: «Кольцо», «Фланец», «Заклёпка», «Гайка», «Шайба» и др.

Блок обучения проектировщика – предназначен для обучения проектировщика автоматизированному проектированию машиностроительных объектов, выполненных в среде САПР КОМПАС-3D (формирование учебного материала, контрольных заданий, траектории обучения).

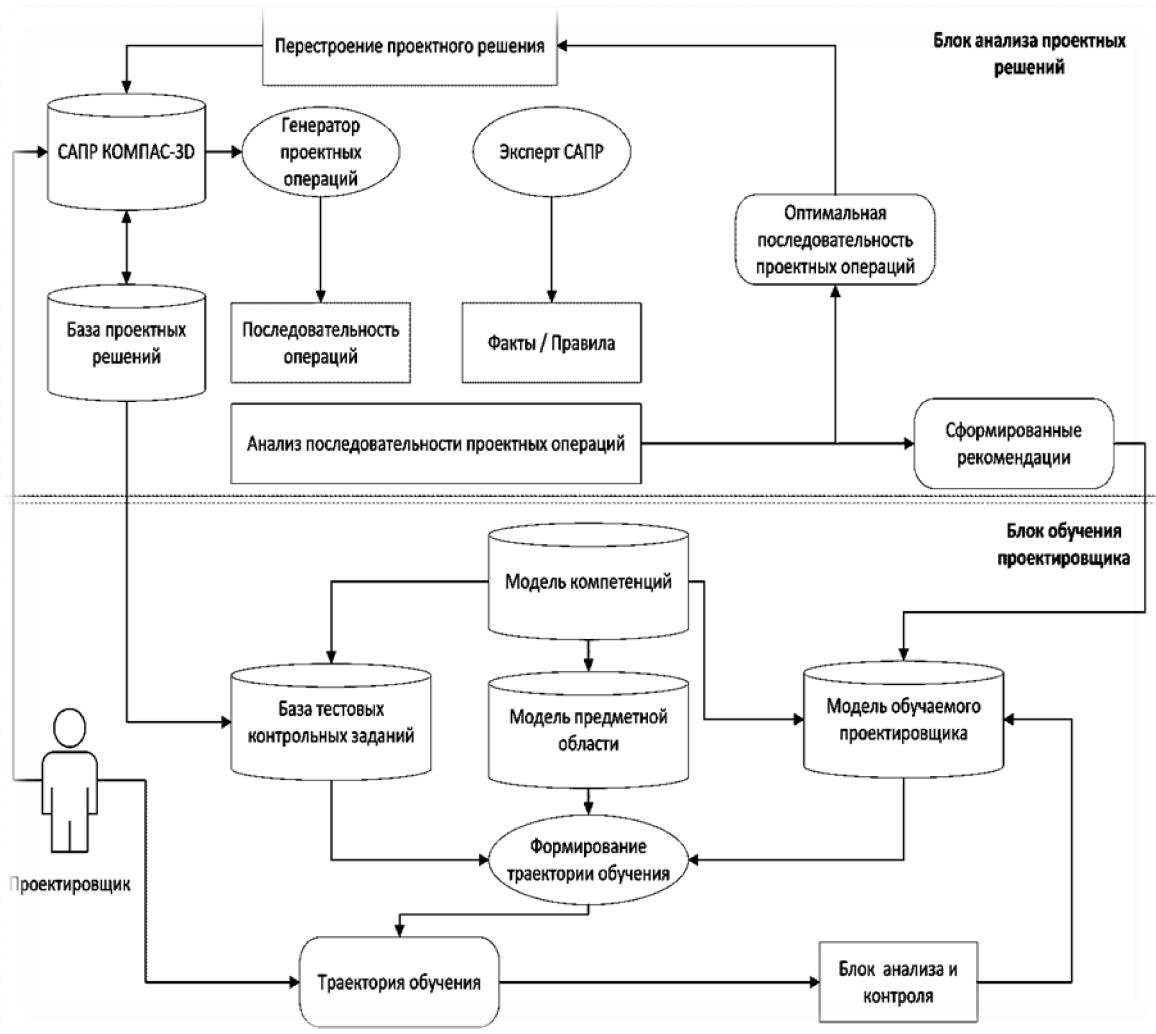


Рис. 1. Структурная схема разрабатываемой комплексной системы

Реализация программно-информационного обеспечения выполнена с помощью Web-сервера Apache HTTP Server, MySQL, NoSQL LiteDB и Java Platform, Microsoft.NET, Ruby. Разработана система, обеспечивающая управление анализом проектных решений, позволяет классифицировать изделия машиностроительных объектов, а также имеет возможность просмотра рекомендаций. Интерфейс программы поддерживает следующие режимы работы:

- 1) построение дерева модели – автоматизированное создание справочника к сборке/детали, который содержит дерево построения трехмерной модели и описание проектных операций;
- 2) анализ проектного решения – запуск анализа проектного решения с составлением рекомендаций по каждой детали, перестроение проектного решения на основе сформированных рекомендаций;
- 3) анализ изделий – состоит из различных модулей анализа определенных классов изделий;
- 4) поиск по базе данных машиностроительных изделий.

## 6. Результаты вычислительного эксперимента

Предложена теоретическая оценка эффективности деятельности проектировщика при использовании системы классификации машиностроительных объектов. В среднем сокращение времени проектной деятельности проектировщика в САПР КОМПАС-3D при использовании системы классификации изделий составляет 11% и зависит от точности



поиска в системе и степени покрытия электронного каталога машиностроительных изделий предприятия.

Предложена теоретическая оценка эффективности и качества обучения проектировщика при использовании разработанной модели компетенций и алгоритма формирования персонафицированной траектории обучения. Результат обучения составляет 87% от поставленной цели обучения, что значительно выше результатов обучения в системах Moodle (33%) и IDEA(44%).

### Заключение

Предложен новый метод структурно-параметрического анализа проектных решений на основе последовательности проектных операций, отличающийся анализом дерева модели проектного решения и анализом операций объектов трехмерного моделирования. Метод позволяет сократить время проектной деятельности проектировщика в САПР КОМПАС-3D в среднем на 11%.

Предложен новый метод автоматизированной генерации правил для анализа проектных решений на основе уже имеющихся фактов и правил, отличающийся анализом зависимости между операциями твердотельного моделирования в САПР КОМПАС-3D и позволяющий формировать новые правила для анализа проектных решений.

Предложена ассоциативно ориентированная модель компетенций проектировщика, отличающаяся установлением взаимосвязей между знаниями, умениями и навыками, связанных с предметной областью автоматизированного проектирования машиностроительных объектов, и позволяющая сформировать последовательность освоения компетенций и адаптировать процесс обучения автоматизированному проектированию в САПР КОМПАС-3D.

Разработана и реализована архитектура автоматизированной системы анализа проектных решений САПР и обучения проектировщика с поддержкой персонафицированного обучения практическим задачам и освоения компетенций проектировщиком, а также позволяющей оптимизировать проектные решения с целью сохранения и повторного использования.

*Исследования поддержаны грантом Министерства образования и науки Российской Федерации, проект № 2.1615.2017/4.6.*

*Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Ульяновской области в рамках научного проекта № 16-47-732152.*

#### Список литературы:

#### References:

1. Бригаднов С.И. Разработка комплексной автоматизированной интеллектуальной системы анализа проектных решений и обучения проектировщика // V Междунар. науч. конф. «Электронное обучение в непрерывном образовании 2018». Ульяновск, 2018. С. 136–142.
2. Афанасьев А.Н., Войт Н.Н., Канев Д.С. Разработка авторской интеллектуальной обучающей системы // Электронное обучение в непрерывном образовании. 2016. № 1 (3). С. 100-104.
3. Афанасьев А.Н., Бригаданов С.И., Канев Д.С. Разработка автоматизированной системы анализа проектных решений в САПР КОМПАС-3D // Автоматизация процессов управления. 2018. № 1 (51). С. 108-117.
4. Афанасьев А.Н. Гужавин А.А., Кокаев О.Г. Ассоциативное микропрограммирование. Саратов: СГУ, 1991. 116 с.
1. Brigadnov S.I. (2018). Development of a complex automated intellectual system for the analysis of design solutions and the training of a designer. V international scientific conference «E-learning in continuing education 2018», Ulyanovsk, pp. 136-142. [in Russian language]
2. Afanasyev A.N., Voit N.N., Kanev D.S. (2016). Development of the author's intellectual learning system. Electronic learning in continuous education, No. 3(1), pp. 100-104. [in Russian language]
3. Afanasyev A.N., Brigadanov S.I., Kanev D.S. (2018). Development of an automated system for analysis of design solutions in CAD KOMPAS-3D. Automation of management processes, No. 52(1), pp. 108-117. [in Russian language]
4. Afanasiev A.N. Guzhavin A.A., Kokaev O.G. (1991). Associative microprogramming. Saratov: SSU. [in Russian language]

*Статья поступила в редколлегию 31.09.18.*

*Рецензент: к.т.н., доцент Брянского  
государственного технического университета  
Рытов М.Ю.*

*Статья принята к публикации 12.12.18.*

**Сведения об авторах:**

**Афанасьев Александр Николаевич**

доктор технических наук, профессор, Первый проректор, проректор по дистанционному и дополнительному образованию Ульяновского государственного технического университета (УлГТУ)

E-mail: [a.afanasev@ulstu.ru](mailto:a.afanasev@ulstu.ru)

**Бригаднов Сергей Игоревич**

аспирант кафедры «Вычислительная техника» УлГТУ.

E-mail: [sergbrig@yandex.ru](mailto:sergbrig@yandex.ru)

**Information about authors:**

**Afanasyev Alexander Nikolaevich**

Doctor of Engineering, professor, Vice-president of Distance and Further Ulyanovsk State Technical University.

E-mail: [a.afanasev@ulstu.ru](mailto:a.afanasev@ulstu.ru)

**Brigadnov Sergey Igorevich**

graduate student of the Department of Computer Science of Ulyanovsk State Technical University. E-mail:

[sergbrig@yandex.ru](mailto:sergbrig@yandex.ru)

УДК: 66.011:681.51

DOI: 10.30987/article\_5c387d62698a75.92047422

А.Н. Лабутин, В.Ю. Невиницын, Г.В. Волкова, В.М. Сальков

## АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ЦЕЛЕВОГО ПРОДУКТА В ХИМИЧЕСКОМ РЕАКТОРЕ

*В работе методом аналитического конструирования агрегированных регуляторов решена задача синтеза нелинейного алгоритма управления концентрацией целевого компонента в химическом реакторе при реализации сложной последовательно-параллельной экзотермической реакции. Проведено компьютерное моделирование замкнутой системы управления с применением полученного нелинейного алгоритма и показана эффективность предлагаемого метода.*

**Ключевые слова:** аналитическое конструирование агрегированных регуляторов, синергетическая теория управления, химический реактор, система управления, компьютерное моделирование.

A.N. Labutin, V.Yu. Nevinitsyn, G.V. Volkova, V.M. Salkov

## THE CONTROL ALGORITHM FOR CONCENTRATION OF THE TARGET PRODUCT IN THE CHEMICAL REACTOR

*In this article, the method of analytical design of aggregated regulators solved the problem of synthesizing a nonlinear algorithm controlling the concentration of a target component in a chemical reactor during the implementation of a complex series-parallel exothermic reaction. A computer simulation of a closed-loop control system using the obtained nonlinear algorithm was carried out and the effectiveness of the proposed method was shown.*

**Keywords:** analytical design of aggregated regulators, synergetic control theory, chemical reactor, control system, computer simulation.

### Введение

На стадии проектирования химического производства, связанного с превращением исходных веществ в конечные продукты, решается задача оптимального синтеза реакторного узла и задача синтеза алгоритмов управления процессом, а на стадии эксплуатации подзадача организации оптимального функционирования объекта в условиях действия параметрических и сигнальных возмущений [1–3].

Несмотря на значительное количество работ, связанных с автоматизацией и управлением химическими реакторами, проблема синтеза систем управления, обеспечивающих поддержание оптимальных режимов их работы, остается до конца не решенной. Это объясняется основной особенностью химических реакторов как объектов управления: многомерностью, нелинейностью и многосвязностью.

Выходом из данной ситуации является развитие физической теории управления и, в частности, синергетической теории управления (метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов – АКАР), основные положения которой сформулированы в работе [4].

Использование идей синергетики в задачах управления предполагает разработку и реализацию способа направленной целевой самоорганизации диссипативных нелинейных систем «объект–регулятор». При этом цель движения системы формулируется в виде желаемого инвариантного многообразия в фазовом пространстве объекта, выполняющего роль целевого аттрактора [4].

В общем виде задача синергетического синтеза системы управления методом АКАР формулируется следующим образом: необходимо найти закон управления  $u = (u_1, \dots, u_m)^T$  как функцию переменных состояния объекта  $u_1(x_1, \dots, x_n), \dots, u_m(x_1, \dots, x_n)$ , который переводит изображающую точку (ИТ) системы в фазовом пространстве из произвольного начального состояния в окрестность задаваемых инвариантных многообразий  $\psi_S(x_1, \dots, x_n) = 0, S = 1, \dots, m$  и дальнейшее движение вдоль пересечения многообразий в некоторую стационарную точку или в некоторый динамический режим. В приведенных выражениях  $n$  – размерность вектора состояния,  $m$  – число внешних управлений. На траектории движения должен достигаться минимум критерия оптимальности системы ( $J$ ) и гарантироваться ее устойчивость:

$$J = \int_0^{\infty} \left[ \sum_{S=1}^m \left( T_S^2 \dot{\psi}_S^2 + \psi_S^2 \right) \right] d\tau. \quad (1)$$

Движение ИТ в фазовом пространстве подчиняется функциональному уравнению

$$T_S \dot{\psi}_S + \psi_S = 0, S = 1, \dots, m, \quad (2)$$

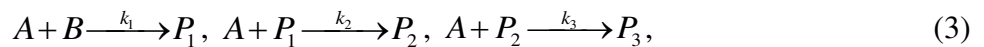
где  $T_S$  – постоянная времени. Это уравнение устойчивой экстремали, доставляющей минимум оптимизирующему функционалу (1). Условие асимптотической устойчивости системы в целом имеет вид  $T_S > 0$ .

Эффективность метода аналитического синтеза алгоритмов управления нелинейными объектами с использованием принципов синергетики (метод АКАР) показана в ряде работ [5-8].

В настоящей работе ставится задача аналитического синтеза эффективного алгоритма управления концентрацией целевого компонента в химическом реакторе при реализации сложной последовательно-параллельной реакции в условиях действия на объект возмущающих факторов.

### 1. Описание объекта и постановка задачи управления

Химический реактор представляет собой аппарат емкостного типа, снабженный механической мешалкой и теплообменной рубашкой (рис. 1). Аппарат функционирует в политропическом режиме. В реакторе реализуется многостадийная последовательно-параллельная экзотермическая реакция:



где  $A$  и  $B$  – исходные реагенты,  $P_1, P_2, P_3$  – продукты реакции,  $k_1, k_2, k_3$  – константы скоростей стадий. Целевым компонентом является вещество  $P_2$ . Исходные реагенты  $A$  и  $B$  подаются в аппарат отдельными потоками.

На рис. 1 введены следующие обозначения:  $x_1^{BX}, x_2^{BX}$  – концентрации исходных реагентов;  $v_1, v_2$  – расход исходных реагентов;  $x_6^{ex1}, x_6^{ex2}$  – температуры потоков исходных реагентов;  $x_7^{ex}, x_7$  – температуры хладагента на входе и выходе из аппарата;  $v_{xl}$  – расход хладагента на входе и выходе из аппарата;  $x_6$  – температура реакционной смеси в аппарате;  $v$  – расход реакционной смеси на выходе из аппарата;  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  – концентрации компонентов  $A, B, P_1, P_2, P_3$  в реакторе;  $V$  – объем реакционной смеси в аппарате;  $V_{xl}$  – объем хладагента в рубашке.

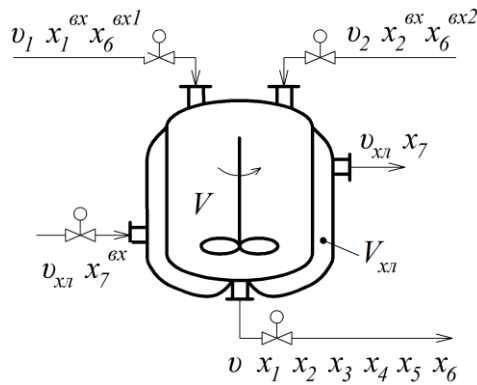


Рис. 1. Принципиальная схема химического реактора

Целью функционирования химического реактора является получение целевого компонента заданной концентрации. Отсюда следует, что задача системы управления реактором заключается в стабилизации концентрации целевого компонента на заданном значении в условиях действия возмущений, т.е.  $x_4 = \bar{x}_4$ , где  $\bar{x}_4$  – заданное значение концентрации. В качестве управляющего воздействия для регулирования концентрации предлагается использовать поток исходного реагента  $u_2$  на входе в аппарат.

Математическая модель химического реактора имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= R_1 + M_A - b_2 x_1 - b_3 x_1 u, \\ \frac{dx_2}{d\tau} &= R_2 - b_2 x_2 + (M_B - b_3 x_2) u, \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= R_3 - b_2 x_3 - b_3 x_3 u, \\ \frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 - b_2 x_4 - b_3 x_4 u, \\ \frac{dx_5}{d\tau} &= R_5 - b_2 x_5 - b_3 x_5 u, \\ \frac{dx_6}{d\tau} &= \alpha_1 k_1 x_1 x_2 + \alpha_2 k_2 x_1 x_3 + \alpha_3 k_3 x_1 x_4 + b_2 x_6^{ex1} + \beta_1 x_7 - (\beta_1 + b_2) x_6 + (x_6^{ex2} - x_6) b_3 u, \\ \frac{dx_7}{d\tau} &= \beta_2 (x_6 - x_7) + b_1 (x_7^{ex} - x_7), \end{aligned} \quad (4)$$

где  $R_1 = -k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3 - k_3 x_1 x_4$ ,  $R_2 = -k_1 x_1 x_2$ ,  $R_3 = k_1 x_1 x_2 - k_2 x_1 x_3$ ,  $R_4 = k_2 x_1 x_3 - k_3 x_1 x_4$ ,  $R_5 = k_3 x_1 x_4$  – скорость реакции по компонентам;  $M_A = v_1 x_1^{ex} / V$ ;  $M_B = x_2^{ex} / V$ ;  $b_1 = v_{xl} / V_{xl}$ ;  $b_2 = v_1 / V$ ;  $b_3 = 1 / V$ ;  $\alpha_i = \Delta H_i / (\rho C)$ ,  $i = 1, \dots, 3$ ;  $\beta_1 = K_T F_T / (\rho C V)$ ;  $\beta_2 = K_T F_T / (\rho_{xl} C_{xl} V_{xl})$ ;  $\Delta H_i$ ,  $i = 1, \dots, 3$  – тепловой эффект соответствующей стадии реакции;  $\rho$ ,  $C$  – плотность и теплоемкость реакционной смеси;  $\rho_{xl}$ ,  $C_{xl}$  – плотность и теплоемкость хладагента;  $K_T$  – коэффициент теплопередачи;  $F_T$  – поверхность теплообмена;  $k_i = k_{i0} \cdot \exp(-E_i / R(x_6 + 273))$ ,  $i = 1, \dots, 3$  – константы скоростей стадий;  $k_{i0}$ ,  $i = 1, \dots, 3$  – постоянный множитель (предэкспонента) констант скоростей стадий;  $E_i$ ,  $i = 1, \dots, 3$  – энергия активации соответствующей стадии реакции;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $u = u_2$  – регулирующее воздействие.

## 2. Синтез алгоритма управления методом АКАР

Согласно общепринятой методике синтеза алгоритмов управления многомерными объектами [9], на первом этапе осуществляется синтез закона управления в предположении, что измеряются (наблюдаются) все переменные состояния. На втором этапе, если это необходимо, синтезируется наблюдатель, позволяющий оценить вектор состояния по измеряемому выходу.

В работе [10] показано, что при выборе потока исходного реагента  $u_2$  в качестве управляющего воздействия для регулирования концентрации  $x_4$  объект является полностью управляемым в пространстве состояний. Для обеспечения полной наблюдаемости достаточно измерение только регулируемой переменной  $x_4$ , остальные компоненты вектора состояния могут быть восстановлены путем построения наблюдателя (при отсутствии практической возможности измерения всего вектора состояния).

Поскольку управляющее воздействие непосредственно входит в уравнение для переменной  $x_4$  системы (4), то процедура синергетического синтеза закона управления осуществляется за один этап.

Синергетическая постановка задачи: необходимо синтезировать закон управления  $u(x)$ , который переводит объект из произвольного начального состояния ( $x^0$ ) в фазовом пространстве в окрестность сконструированного многообразия  $\psi(x) = 0$ , а затем обеспечивает его движение вдоль  $\psi(x) = 0$  в заданное конечное состояние  $x_4^* = \bar{x}_4$ . Для поиска закона управления  $u(x)$  введем в рассмотрение макропеременную, отражающую технологическое требование к системе:

$$\psi_1 = x_4 - \bar{x}_4. \quad (5)$$

Макропеременная  $\psi_1$  удовлетворяет решению основного функционального уравнения метода АКАР  $T_1\dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0$ , которое в развернутом виде с учетом выражения (5) в силу системы (4) примет вид:

$$T_1(R_4 - b_2x_4 - b_3x_4u) + x_4 - \bar{x}_4 = 0. \quad (6)$$

Из (6) получаем выражение для закона управления:

$$u = \frac{(x_4 - \bar{x}_4)}{T_1b_3x_4} + \frac{R_4}{b_3x_4} - \frac{b_2}{b_3}. \quad (7)$$

Выражение (7) определяет закон управления концентрацией целевого компонента. Настраечным параметром закона управления является постоянная времени  $T_1$ . Условие асимптотической устойчивости системы в целом относительно введенного в фазовое пространство многообразия  $\psi_1 = 0$  имеет вид:  $T_1 > 0$ . Выбор настроечного параметра  $T_1$  осуществляется на основании требуемого времени перевода ИТ системы в окрестность инвариантного многообразия  $\psi_1 = 0$ , т.е. на основании заданного времени переходного процесса (регулирования)  $\tau_p$  в соответствии с оценкой [4]:

$$\tau_p \approx (4 \div 5)T_1, \quad (8)$$

где  $T_1$  – параметр основного функционального уравнения (2).



### 3. Компьютерное моделирование и результаты

Для проверки работоспособности синтезированного закона управления химическим реактором было проведено компьютерное моделирование замкнутой системы «объект–регулятор». Исследовано поведение замкнутой системы при возникновении отклонений координат состояния от статических значений, действию внешних и параметрических возмущений, изменении задающего воздействия по концентрации целевого компонента.

Моделирование проводилось при оптимальных технологических и конструктивных параметрах объекта, определенных ранее в работе [10]:  $V = 500$  л;  $V_{xl} = 290$  л;  $x_1^{6x} = 19.74$  моль/л;  $x_2^{6x} = 10.93$  моль/л;  $v_1 = 1.5$  л/мин,  $v_2 = 3.5$  л/мин,  $v = 5.0$  л/мин,  $v_{xl} = 3.84$  л/мин;  $x_6^{6x1} = 20$  °С;  $x_6^{6x2} = 30$  °С;  $x_7^{6x} = 20$  °С;  $K_T = 12$  кДж/(м<sup>2</sup> мин К);  $F_T = 2.9$  м<sup>2</sup>;  $\rho = 0.9$  кг/л;  $C = 2$  кДж/(кг К);  $\rho_{xl} = 1$  кг/л;  $C_{xl} = 4.18$  кДж/(кг К);  $\Delta H_1 = \Delta H_2 = \Delta H_3 = 80$  кДж/моль;  $E_1 = 48635$  Дж/моль;  $k_{10} = 109860$  л/(моль мин); соотношения констант скоростей последовательных стадий  $k_2/k_1 = 2.0$ ,  $k_3/k_1 = 2.5$ . Параметры закона управления (6): значение постоянной времени  $T_1 = 50$  мин; заданное значение концентрации целевого компонента  $\bar{x}_4 = 0.652$  моль/л.

На рис. 2, 3 приведены примеры переходных процессов управления в замкнутой системе «химический реактор – алгоритм управления концентрацией» при начальном отклонении переменных состояния объекта от статики ( $\Delta x_i = -0.2x_i^0$ ) и ступенчатом изменении задающего воздействия по концентрации целевого продукта ( $\Delta x_4 = -0.1\bar{x}_4$ ). Допустимая погрешность регулирования концентрации целевого компонента в статике (точность в установившемся режиме) составляет  $\pm 0.01$  моль/л. Для наглядности движение системы (переходные процессы) до момента приложения входного воздействия ( $\tau = 50$  мин) приводится в статическом режиме.

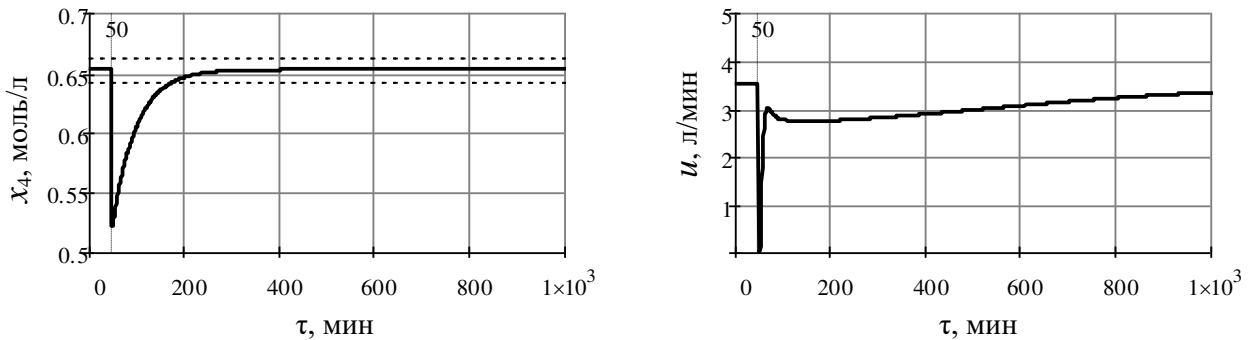


Рис. 2. Изменение регулируемой переменной и управляющего воздействия при начальном отклонении переменных состояния от статики

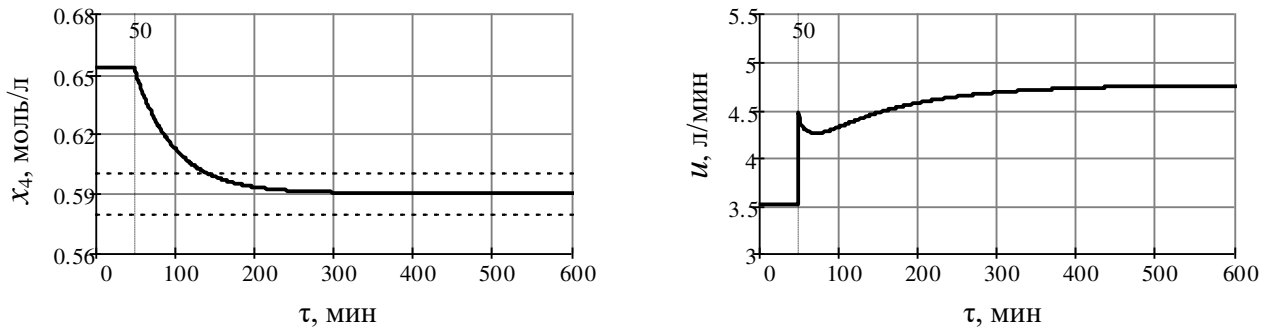


Рис. 3. Изменение регулируемой переменной и управляющего воздействия при ступенчатом изменении задающего воздействия по концентрации

## Заключение

Таким образом, методами синергетической теории управления решена задача аналитического синтеза нелинейного закона управления, обеспечивающего стабилизацию концентрации целевого компонента в химическом реакторе в условиях действия на объект возмущений. Компьютерное моделирование показало инвариантность замкнутой системы управления к возмущениям, ковариантность с задающими воздействиями и асимптотическую устойчивость. Данные обстоятельства делают синергетическую теорию управления весьма перспективной применительно к таким сложным, многосвязным и нелинейным объектам, как химические реакторы.

### Список литературы:

1. Кафаров В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии. 4-е изд. перераб. и доп. М.: Химия, 1985. 448 с.
2. Лабутин А.Н., Исаенков А.Е., Волкова Г.В. Оптимальный синтез гибкой реакторной системы // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2010. № 12. С. 125-127.
3. Дворецкий Д.С., Дворецкий С.И., Островский Г.М. Интегрированное проектирование энерго- и ресурсосберегающих химико-технологических процессов и систем управления: стратегия, методы и применение // Теорет. основы хим. технологии. 2008. №1. С. 29-39.
4. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. М.: Энергоатомиздат. 1994. 344 с.
5. Labutin A.N., Nevinit syn V.Y. Analytical Synthesis of Chemical Reactor Control System // Theor. Found. Chem. Eng. 2014. Vol. 48. no. 3. p. 296-300. DOI: 10.1134/S0040579514030105.
6. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Синтез нелинейного алгоритма управления химическим реактором с использованием синергетического подхода // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017. № 2. С. 38-44.
7. Labutin A.N., Nevinit syn V.Y. Analytical Synthesis of Chemical Reactor Control System // International Journal of Advanced Studies. 2016. vol. 6. no. 1. p. 27-37. DOI: 10.12731/2227-930X-2016-1-27-37.
8. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Деветьяров А.Н., Волкова Г.В. Синтез эффективного комплекса «реактор - управляющая система» с использованием синергетического подхода // Химическая промышленность. 2014. Т. XCI. № 2. С. 63-67.
9. Александров А.Г. Синтез регуляторов многомерных систем. М.: Машиностроение, 1986. 272 с.
10. Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В., Деветьяров А.Н. Системный анализ химического реактора как объекта управления // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017. Т. 60. № 9. С. 92-99.

### References:

1. Kafarov V.V. (1985). Methods of Cybernetics in Chemistry and Chemical Technology. Vol.4. Moscow: Chemistry. [in Russian language]
2. Labutin A.N., Isaenkov A.E., Volkova G.V. (2010). Optimal synthesis of a flexible reactor system. Izvestiya vuzov. Chemistry and Chemical technologies, (12), pp. 125-127. [in Russian language]
3. Dvoret sky D.S., Dvoret sky S.I., Ostrovsky G.M. (2008). Integrated design of energy- and resource-saving chemical-technological processes and control systems: strategy, methods and application. Theoretical bases of chemical technologies, (1), pp. 29-39. [in Russian language]
4. Kolesnikov A.A. (1994). Synergetic theory of management. Moscow: Energoatomizdat. [in Russian language]
5. Labutin A.N., Nevinit syn V.Y. (2014). Analytical Synthesis of the Chemical Reactor Control System. Theor. Found. Chem. Eng, Vol. 48, (3), pp. 296-300. DOI: 10.1134 / S0040579514030105. [in Russian language]
6. Labutin AN, Nevinit syn V.Yu. (2017). Synthesis of a nonlinear algorithm for controlling a chemical reactor using a synergetic approach. Izvestiya vuzov. Chemistry and Chemical technologies, (2), pp. 38-44. [in Russian language]
7. Labutin A.N., Nevinit syn V.Y. (2016). Analytical Synthesis of the Chemical Reactor Control System. International Journal of Advanced Studies, vol. 6,p, (1), pp. 27-37. DOI: 10.12731 / 2227-930X-2016-1-27-37. [in Russian language]
8. Labutin AN, Nevinit syn V.Yu., Devetyarov A.N., Volkova G.V. (2014). Synthesis of the effective «reactor-control system» complex using a synergetic approach. Chemical Industry, T. XCI, (2), pp. 63-67. [in Russian language]
9. Alexandrov A.G. (1986). Synthesis of regulators of multidimensional systems. Moscow: Mechanical Engineering. [in Russian language]
10. Nevinit syn V.Yu., Labutin A.N., Volkova G.V., Devetyarov A.N. (2017). A System Analysis of a Chemical Reactor as a Control Object. Izvestiya vuzov. Chemistry and Chemical technologies, Vol. 60, (9), pp. 92-99. [in Russian language]

*Статья поступила в редколлегию 10.09.18.  
Рецензент: д.т.н., доцент Брянского  
государственного технического университета  
Петрешин Д.И.  
Статья принята к публикации 12.12.18.*

**Сведения об авторах:**

**Лабутин Александр Николаевич**  
доктор технических наук, профессор кафедры  
«Техническая кибернетика и автоматика»  
Ивановского государственного химико-  
технологического университета.  
Служебный адрес: 153000, г. Иваново,  
Шереметевский проспект, 7.  
Тел. рабочий: 8-4932-32-72-26.  
Тел. моб.: 8-910-985-43-05.  
E-mail: [lan@isuct.ru](mailto:lan@isuct.ru)

**Невинцын Владимир Юрьевич**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Техническая кибернетика и автоматика»  
Ивановского государственного химико-  
технологического университета.  
Служебный адрес: 153000, г. Иваново,  
Шереметевский проспект, 7.  
Тел. рабочий: 8-4932-32-72-26.  
Тел. моб.: 8-915-837-94-53.  
E-mail: [nevinitsyn@gmail.com](mailto:nevinitsyn@gmail.com)

**Волкова Галина Витальевна**  
кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Техническая кибернетика и автоматика»  
Ивановского государственного химико-  
технологического университета.  
Служебный адрес: 153000, г. Иваново,  
Шереметевский проспект, 7.  
Тел. рабочий: 8-4932-32-72-26.  
E-mail: [konf\\_gv@mail.ru](mailto:konf_gv@mail.ru)

**Сальков Владислав Михайлович**  
магистрант кафедры «Техническая кибернетика и  
автоматика» Ивановского государственного химико-  
технологического университета.  
Служебный адрес: 153000, г. Иваново,  
Шереметевский проспект, 7.  
Тел. рабочий: 8-4932-32-72-26.  
E-mail: [vladik\\_salkov@icloud.com](mailto:vladik_salkov@icloud.com)

**Information about authors:**

**Labutin Alexander Nikolaevich**  
doctor of Engineering Sciences, Professor of the  
Department of «Technical Cybernetics and Automation»  
of the Ivanovo State University of Chemistry and  
Technology.  
Office address: 153000, Ivanovo, Sheremetevsky Avenue,  
7.  
Tel. working: 8-4932-32-72-26.  
Tel. mob.: 8-910-985-43-05.  
E-mail: [lan@isuct.ru](mailto:lan@isuct.ru)

**Nevinitsyn Vladimir Yurievich**  
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of  
the Department of «Technical Cybernetics and  
Automation» of the Ivanovo State University of  
Chemistry and Technology. Office address: 153000,  
Ivanovo, Sheremetevsky Avenue, 7.  
Tel. working: 8-4932-32-72-26.  
Tel. mob.: 8-915-837-94-53.  
E-mail: [nevinitsyn@gmail.com](mailto:nevinitsyn@gmail.com)

**Volkova Galina Vitalievna**  
Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of  
the Department of «Technical Cybernetics and  
Automation» of the Ivanovo State University of  
Chemistry and Technology.  
Office address: 153000, Ivanovo, Sheremetevsky Avenue,  
7.  
Tel. working: 8-4932-32-72-26.  
E-mail: [konf\\_gv@mail.ru](mailto:konf_gv@mail.ru)

**Salkov Vladislav Mikhailovich**  
master student of the department «Technical Cybernetics  
and Automation» of the Ivanovo State University of  
Chemistry and Technology.  
Office address: 153000, Ivanovo, Sheremetevsky Avenue,  
7.  
Tel. working: 8-4932-32-72-26.  
E-mail: [vladik\\_salkov@icloud.com](mailto:vladik_salkov@icloud.com)

УДК: 66.011:681.51

DOI: 10.30987/article\_5c387d62f2a733.72337613

В.Ю. Невиницын, А.Н. Лабутин, Г.В. Волкова

## УПРАВЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫМ РЕЖИМОМ ХИМИЧЕСКОГО РЕАКТОРА

*В работе решается задача синтеза нелинейного алгоритма стабилизации температурного режима в жидкофазном химическом реакторе, обеспечивающего инвариантность к возмущениям, ковариантность с задающими воздействиями и асимптотическую устойчивость замкнутой системы. Синтез законов управления осуществляется с использованием метода аналитического конструирования агрегированных регуляторов.*

**Ключевые слова:** аналитическое конструирование агрегированных регуляторов, синергетическая теория управления, химический реактор, система управления, компьютерное моделирование.

V.Yu. Nevinitsyn, A.N. Labutin, G.V. Volkova

## TEMPERATURE MODE MANAGEMENT OF CHEMICAL REACTOR

*This article solves the problem of synthesizing a nonlinear algorithm for stabilizing the temperature mode in a liquid-phase chemical reactor, ensuring invariance to perturbations, covariance with mastering effects and asymptotic stability of a closed system. The control laws are synthesized using the method of analytical design of aggregated regulators.*

**Keywords:** analytical design of aggregated regulators, synergetic control theory, chemical reactor, control system, computer simulation.

### Введение

Центральным звеном производственного процесса превращения исходных веществ в конечные продукты является реакторный узел, который должен быть кибернетически организованным. Это требование означает, что на стадии проектирования решается задача оптимального синтеза реакторного узла, а на стадии эксплуатации подзадача организации оптимального функционирования объекта в условиях действия параметрических и сигнальных возмущений [1]. Вторая подзадача может быть решена только путем разработки системы управления объектом.

Основной особенностью химических реакторов, как объектов управления, является их многомерность, нелинейность и многосвязность. Задача синтеза оптимальных систем управления такого рода динамическими объектами в полной мере не решена [2]. Вопросы разработки систем автоматической стабилизации и управления реакторами рассматривались в основном в линейной постановке [3] и лишь для ряда простых случаев – в нелинейной постановке [4].

Одним из перспективных способов решения рассматриваемой задачи, является метод аналитического конструирования агрегированных регуляторов (АКАР), базирующийся на синергетических принципах целевой самоорганизации нелинейных динамических систем [5].

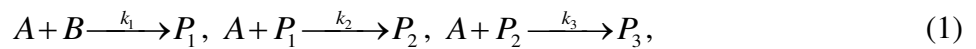
Использование идей синергетики в задачах управления требует перехода от непредсказуемого поведения системы по алгоритму диссипативной структуры к направленному движению к целевому аттрактору (желаемому инвариантному многообразию) и дальнейшему движению вдоль многообразия в конечное состояние. Данный способ самоорганизации называется направленным или целевым [5]. Эффективность алгоритмов, синтезированных с применением синергетической теории управления, показана в ряде работ [6 - 9].

В предлагаемой работе решается задача аналитического синтеза алгоритма управления температурой в химическом реакторе методом АКАР, обеспечивающего инвариантность к возмущениям, ковариантность с задающими воздействиями и асимптотическую устойчивость замкнутой системы управления.

### 1. Описание технологического процесса

В промышленности нередко ситуация, когда реакторный процесс ведут по температуре смеси в аппарате. При этом, как правило, стабилизируются расходы входных потоков, их соотношение и уровень смеси в реакторе. Вопросы топологического и структурного синтеза автоматических систем регулирования температуры рассмотрены в [3].

Рассмотрим широко применяемый в химической промышленности жидкофазный реактор емкостного типа непрерывного действия, снабженный механической мешалкой для перемешивания реакционной смеси и теплообменной рубашкой (рис. 1). В аппарате реализуется трехстадийная последовательно-параллельная экзотермическая реакция



где  $A$  и  $B$  – исходные реагенты;  $P_1, P_2, P_3$  – продукты реакции;  $k_1, k_2, k_3$  – константы скоростей стадий. Целевым компонентом является вещество  $P_2$ . В общем случае при изменении спроса на продукты реакции целевым может быть и другой компонент или смесь ряда веществ. Аппарат функционирует в политропическом режиме. Исходные реагенты  $A$  и  $B$  подаются в аппарат отдельными потоками. Смесь из реактора забирается насосом. Поскольку в аппарате протекает экзотермическая реакция, в рубашку реактора подается хладагент для охлаждения реакционной массы.

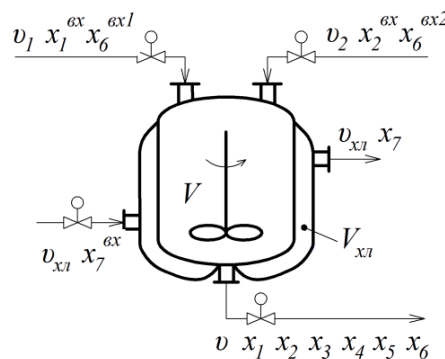


Рис. 1. Принципиальная схема химического реактора

На рис. 1 введены следующие обозначения:  $x_1^{BX}, x_2^{BX}$  – концентрации исходных реагентов;  $v_1, v_2$  – расход исходных реагентов;  $x_6^{ex1}, x_6^{ex2}$  – температуры потоков исходных реагентов;  $x_7^{ex}, x_7$  – температуры хладагента на входе и выходе из аппарата;  $v_{xl}$  – расход хладагента на входе и выходе из аппарата;  $x_6$  – температура реакционной смеси в аппарате;  $v$  – расход реакционной смеси на выходе из аппарата;  $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  – концентрации компонентов  $A, B, P_1, P_2, P_3$  в реакторе;  $V$  – объем реакционной смеси в аппарате;  $V_{xl}$  – объем хладагента в рубашке.

Задача управления химическим реактором заключается в стабилизации температуры смеси в аппарате на заданном уровне  $\bar{x}_6$  в условиях действия возмущений. Управляющим воздействием является расход хладагента, подаваемый в рубашку.

Система дифференциальных уравнений, характеризующая модель динамики объекта, имеет вид:

$$\begin{aligned}
 \frac{dx_1}{d\tau} &= R_1 + M_A - b_2x_1 - b_3x_1, \\
 \frac{dx_2}{d\tau} &= R_2 + M_B - b_2x_2 - b_3x_2, \\
 \frac{dx_3}{d\tau} &= R_3 - b_2x_3 - b_3x_3, \\
 \frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 - b_2x_4 - b_3x_4, \\
 \frac{dx_5}{d\tau} &= R_5 - b_2x_5 - b_3x_5, \\
 \frac{dx_6}{d\tau} &= \alpha_1k_1x_1x_2 + \alpha_2k_2x_1x_3 + \alpha_3k_3x_1x_4 + b_2x_6^{exl} + \beta_1x_7 - (\beta_1 + b_2)x_6 + (x_6^{ex2} - x_6)b_3, \\
 \frac{dx_7}{d\tau} &= \beta_2(x_6 - x_7) + b_1(x_7^{ex} - x_7)u,
 \end{aligned} \tag{2}$$

где  $R_1 = -k_1x_1x_2 - k_2x_1x_3 - k_3x_1x_4$ ,  $R_2 = -k_1x_1x_2$ ,  $R_3 = k_1x_1x_2 - k_2x_1x_3$ ,  $R_4 = k_2x_1x_3 - k_3x_1x_4$ ,  $R_5 = k_3x_1x_4$  – скорость реакции по компонентам;  $M_A = \nu_1x_1^{ex} / V$ ;  $M_B = \nu_2x_2^{ex} / V$ ;  $b_1 = 1/V_{xl}$ ;  $b_2 = \nu_1 / V$ ;  $b_3 = \nu_2 / V$ ;  $\alpha_i = \Delta H_i / (\rho C)$ ,  $i = 1, \dots, 3$ ;  $\beta_1 = K_T F_T / (\rho C V)$ ;  $\beta_2 = K_T F_T / (\rho_{xl} C_{xl} V_{xl})$ ;  $\Delta H_i$ ,  $i = 1, \dots, 3$  – тепловой эффект соответствующей стадии реакции;  $\rho$ ,  $C$  – плотность и теплоемкость реакционной смеси;  $\rho_{xl}$ ,  $C_{xl}$  – плотность и теплоемкость хладагента;  $K_T$  – коэффициент теплопередачи;  $F_T$  – поверхность теплообмена;  $k_i = k_{i0} \cdot \exp(-E_i / R(x_6 + 273))$ ,  $i = 1, \dots, 3$  – константы скоростей стадий;  $k_{i0}$ ,  $i = 1, \dots, 3$  – постоянный множитель (предэкспонента) констант скоростей стадий;  $E_i$ ,  $i = 1, \dots, 3$  – энергия активации соответствующей стадии реакции;  $R$  – универсальная газовая постоянная;  $u = \nu_{xl}$  – регулирующее воздействие.

## 2. Аналитическое конструирование регулятора температуры

Поскольку математическая модель объекта (2) содержит одно внешнее управляющее воздействие  $u = \nu_{xl}$  необходимо использовать метод АКАР на основе последовательной совокупности инвариантных многообразий [5]. Анализ уравнений (2) показывает, что управляющее воздействие  $u = \nu_{xl}$  воздействует на переменную  $x_6$  через переменную  $x_7$ . Таким образом, канал управления температурой смеси в аппарате в развернутом виде запишется:  $u \rightarrow x_7 \rightarrow x_6$ .

Согласно методу АКАР [5], в фазовом пространстве динамических систем можно построить ряд многообразий, к которым притягиваются фазовые траектории. Отсюда следует возможность конструирования такой совокупности притягивающих инвариантных многообразий  $\psi_s(\bar{x}) = 0$ ,  $s = \overline{1, m}$ , когда изображающая точка системы, начав двигаться из произвольного начального положения в фазовом пространстве, последовательно перемещается от одного многообразия к другому, пока не попадет на последнее  $\psi_m(\bar{x}) = 0$ , приводящее в заданное конечное состояние. Таким образом, изображающая точка сначала сближается с многообразием  $\psi_1(\bar{x}) = 0$ , затем с  $\psi_2(\bar{x}) = 0$  и т.д. При использовании  $m$  притягивающих многообразий размерность каждого  $i$ -го многообразия будет на единицу меньше предыдущего, вследствие чего происходит сжатие фазового объема и динамическая декомпозиция задачи.

Качественный анализ структуры правых частей уравнений системы (2) показывает, что переменные состояния взаимосвязаны в статике (например, в правой части уравнения для  $x_6$  присутствуют другие фазовые координаты). Исходя из данного факта и основываясь на принципе эквивалентности управлений, введем в рассмотрение инвариантное многообразие

$$\psi_1 = x_7 + v_1(x_6) = 0, \quad (3)$$

где  $v_1(x_6)$  – неизвестная функция от  $x_6$ . Закон управления синтезируется таким образом, чтобы осуществлялся перевод изображающей точки системы в фазовом пространстве из произвольного начального положения в окрестность многообразия  $\psi_1 = 0$ . Изменение агрегированной макропеременной, играющей роль параметра порядка, должно подчиняться функциональному уравнению

$$T_1 \dot{\psi}_1 + \psi_1 = 0. \quad (4)$$

Уравнение (4) с учетом (3) примет вид

$$T_1 \left[ \frac{dx_7}{d\tau} + \frac{\partial v_1}{\partial x_6} \cdot \frac{dx_6}{d\tau} \right] = -\psi_1.$$

В силу уравнений объекта (2) это выражение запишется:

$$T_1 \left[ \beta_2(x_6 - x_7) + b_1(x_7^{ex} - x_7)u + \frac{\partial v_1}{\partial x_6} \cdot (f_6 + \beta_1 x_7) \right] + x_7 + v_1 = 0, \quad (5)$$

где  $f_6 = \alpha_1 k_1 x_1 x_2 + \alpha_2 k_2 x_1 x_3 + \alpha_3 k_3 x_1 x_4 + b_2 x_6^{ex1} - (\beta_1 + b_2)x_6 + (x_6^{ex2} - x_6)b_3$ .

Из (5) получаем выражение для закона управления

$$u = -\frac{(x_7 + v_1)}{T_1 b_1 (x_7^{ex} - x_7)} - \frac{\beta_2 (x_6 - x_7)}{b_1 (x_7^{ex} - x_7)} - \frac{\partial v_1}{\partial x_6} \cdot \frac{(f_6 + \beta_1 x_7)}{b_1 (x_7^{ex} - x_7)}. \quad (6)$$

Управление  $u$  переводит изображающую точку системы в окрестность многообразия  $\psi_1 = 0$ , на котором реализуется связь  $x_7 = -v_1$  и наблюдается эффект «сжатия фазового пространства», т.е. снижение размерности системы уравнений (2). Уравнения декомпозированной системы с учетом соотношения  $x_7 = -v_1$  примут вид:

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{d\tau} &= R_1 + M_A - b_2 x_1 - b_3 x_1, \\ \frac{dx_2}{d\tau} &= R_2 + M_B - b_2 x_2 - b_3 x_2, \\ \frac{dx_3}{d\tau} &= R_3 - b_2 x_3 - b_3 x_3, \\ \frac{dx_4}{d\tau} &= R_4 - b_2 x_4 - b_3 x_4, \\ \frac{dx_5}{d\tau} &= R_5 - b_2 x_5 - b_3 x_5, \\ \frac{dx_6}{d\tau} &= f_6 - \beta_1 v_1. \end{aligned} \quad (7)$$



Функцию  $v_1(x_6)$  в декомпозированной системе (7) можно рассматривать как «внутреннее» управление, под воздействием которого происходит движение объекта (7) вдоль многообразия  $\psi_1 = 0$ . На втором шаге процедуры синтеза закона управления осуществляется поиск выражения для  $v_1(x_6)$ . Для этого вводится в рассмотрение цель движения системы (7) в форме инвариантного многообразия, отражающего технологическое требование к системе

$$\psi_2 = x_6 - \bar{x}_6 = 0. \quad (8)$$

Макропеременная  $\psi_2$  удовлетворяет решению функционального уравнения  $T_2\dot{\psi}_2 + \psi_2 = 0$ , которое в развернутом виде с учетом выражения (8) в силу модели декомпозированной системы (7) примет вид:

$$T_2(f_6 - \beta_1 v_1) + x_6 - \bar{x}_6 = 0. \quad (9)$$

«Внутреннее» управление в соответствии с выражением (9) запишется

$$v_1 = \frac{(x_6 - \bar{x}_6)}{T_2\beta_1} + \frac{f_6}{\beta_1}. \quad (10)$$

Закон (10) обеспечивает асимптотическое приближение изображающей точки ко второму притягивающему многообразию  $\psi_2 = x_6 - \bar{x}_6 = 0$ .

Окончательное выражение для закона внешнего управления  $u(x)$  можно получить путем подстановки в (6) функции  $v_1$  и ее частной производной  $\partial v_1 / \partial x_6$ . Частную производную  $\partial v_1 / \partial x_6$  можно получить как аналитическим способом, так и с помощью численных методов. Параметрами настройки закона управления, влияющими на качество динамики процессов в замкнутой системе «реактор – управляющее устройство», являются постоянные времени  $T_1, T_2$ .

Из структуры закона управления температурой (6), (10) видно, что параметр  $T_1$  оказывает непосредственное влияние на регулирующее воздействие  $u = v_{xl}$ , а параметр  $T_2$  оказывает влияние на «внутреннее» управление  $v_1$ , которое, в свою очередь, влияет на регулирующее воздействие  $u = v_{xl}$ . В работе [5] показано, что время попадания изображающей точки системы из произвольного начального положения в окрестность заданного инвариантного многообразия приближенно определяется следующим выражением:

$$\tau_\psi \approx (4 \div 5)T, \quad (11)$$

где  $T$  – параметр основного функционального уравнения (4).

Таким образом, выбор настроечных параметров  $T_1, T_2$  осуществляется на основании требуемого времени перевода изображающей точки системы в окрестность инвариантных многообразий  $\psi_1 = 0$  и  $\psi_2 = 0$ , т.е. на основании заданного времени переходного процесса в соответствии с оценкой (11). В исследуемом варианте системы управления время переходного процесса (время регулирования) будет определяться в соответствии с выражением:

$$\tau_p \approx (4 \div 5)[T_1 + T_2]. \quad (12)$$

### 3. Компьютерное моделирование и результаты

Методами компьютерного моделирования проведено исследование системы управления температурным режимом в химическом реакторе с использованием синтезированного нелинейного закона. Исследованы свойства инвариантности к возмущениям, ковариантности с задающими воздействиями и асимптотической устойчивости замкнутой системы.

Моделирование проводилось при технологических и конструктивных параметрах, обеспечивающих оптимальный режим работы химического реактора [10]:  $V = 500$  л;  $V_{xl} = 290$  л;  $x_1^{ex} = 19.74$  моль/л;  $x_2^{ex} = 10.93$  моль/л;  $v_1 = 1.5$  л/мин,  $v_2 = 3.5$  л/мин,  $v = 5.0$  л/мин,  $v_{xl} = 3.84$  л/мин;  $x_6^{ex1} = 20$  °С;  $x_6^{ex2} = 30$  °С;  $x_7^{ex} = 20$  °С;  $K_T = 12$  кДж/(м<sup>2</sup> мин К);  $F_T = 2.9$  м<sup>2</sup>;  $\rho = 0.9$  кг/л;  $C = 2$  кДж/(кг К);  $\rho_{xl} = 1$  кг/л;  $C_{xl} = 4.18$  кДж/(кг К);  $\Delta H_1 = \Delta H_2 = \Delta H_3 = 80$  кДж/моль;  $E_1 = 48635$  Дж/моль;  $k_{10} = 109860$  л/(моль мин); соотношения констант скоростей последовательных стадий  $k_2/k_1 = 2.0$ ,  $k_3/k_1 = 2.5$ . Параметры закона управления (6), (10): значение постоянных времени  $T_1 = T_2 = 15$  мин; заданное значение температуры смеси в аппарате  $\bar{x}_6 = 140$  °С.

На рис. 2, 3 приведены примеры переходных процессов в замкнутой системе «химический реактор – регулятор температуры» при начальном отклонении переменных состояния объекта от статики ( $\Delta x_i = -0.2x_i^0$ ) и ступенчатом возмущении по расходу  $v_1$  равном  $\Delta v_1 = -0.1v_1$ . Допустимая погрешность регулирования температуры в статике (точность в установившемся режиме) составляет  $\pm 2$  °С. Для наглядности движение системы (переходные процессы) до момента приложения входного воздействия ( $\tau = 50$  мин) приводится в статическом режиме.

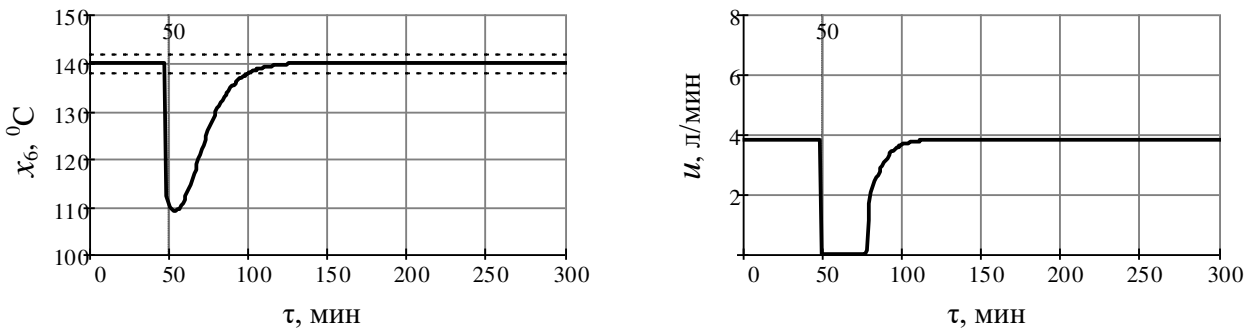


Рис. 2. Изменение регулируемой переменной и управляющего воздействия при начальном отклонении переменных состояния от статики

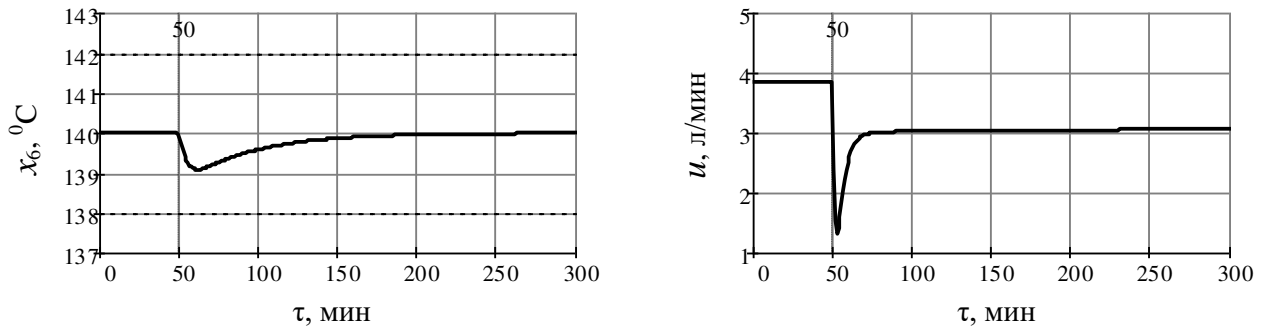


Рис. 3. Изменение регулируемой переменной и управляющего воздействия при ступенчатом возмущении по расходу  $v_1$

## Заключение

В работе предложен оригинальный нелинейный алгоритм стабилизации температурного режима в химическом реакторе, полученный на основе нелинейной математической модели объекта без применения процедуры линеаризации. Результаты компьютерного моделирования позволяют сделать выводы, что синтезированная синергетическая система управления инвариантна к внутренним и внешним возмущениям, ковариантна с задающими воздействиями и асимптотически устойчива при условии полной наблюдаемости объекта управления. Вышеприведенное говорит об эффективности синергетического подхода к решению задач синтеза законов управления нелинейными, многомерными и многосвязными объектами химической технологии.

### Список литературы:

1. Лабутин А.Н. Оптимизация гибких многопродуктовых реакторных систем непрерывного типа // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 1999. Т. 42. № 1. С. 117-122.
2. Красовский А.А. Развитие и становление современной теории управления // Синергетика и проблемы теории управления / Под ред. А.А. Колесникова. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. С. 13-34.
3. Рей У. Методы управления технологическими процессами: Пер. с англ. М.: Мир, 1983. 368 с.
4. Кван Н.В., Семичевская Н.П. Нелинейное робастное управление двухэтапным химическим реактором // Информатика и системы управления. 2011. № 4(30). С. 133-141.
5. Колесников А.А. Синергетическая теория управления. – М.: Энергоатомиздат, 1994. 344 с.
6. Labutin A.N., Nevinitsyn V.Y. Analytical Synthesis of Chemical Reactor Control System // Theor. Found. Chem. Eng. – 2014. Vol. 48. N. 3. P. 296-300. DOI: 10.1134/S0040579514030105.
7. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю. Синтез нелинейного алгоритма управления химическим реактором с использованием синергетического подхода // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017. Т. 60. № 2. С. 38-44.
8. Labutin A.N., Nevinitsyn V.Y. Analytical Synthesis of Chemical Reactor Control System // International Journal of Advanced Studies. 2016. Vol. 6. N. 1. P. 27-37. DOI: 10.12731/2227-930X-2016-1-27-37.
9. Лабутин А.Н., Невиницын В.Ю., Деветьяров А.Н., Волкова Г.В. Синтез эффективного комплекса "реактор - управляющая система" с использованием синергетического подхода // Химическая промышленность. 2014. Т. XCI. № 2. С. 63-67.
10. Невиницын В.Ю., Лабутин А.Н., Волкова Г.В., Деветьяров А.Н. Системный анализ химического реактора как объекта управления // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2017. Т. 60. № 9. С. 92-99.

### References:

1. Labutin A.N. (1999). Optimization of flexible multi-product reactor systems of continuous type, *Izvestiya vuzov. Chemistry and Chemical technologies*, Vol. 42. (1), pp. 117-122. [in Russian language]
2. Kolesnikova A.A. (Ed.), Krasovsky A.A. (2004). Development and formation of modern management theory. *Synergetics and problems of control theory*. Moscow: FIZMATLIT, pp. 13-34. [in Russian language]
3. Rey U. (1983). *Advanced process control*. Moscow: Mir. [in Russian language]
4. Kwan N.V., Semichevskaya N.P. (2011). Nonlinear robust control of a two-stage chemical reactor. *Informatics and control systems*. 30 (4), pp. 133-141. [in Russian language]
5. Kolesnikov A.A. (1994). *Synergetic theory of management*. Moscow: Energoatomizdat. [in Russian language]
6. Labutin A.N., Nevinitsyn V.Y. (2014). Analytical Synthesis of the Chemical Reactor Control System. *Theor. Found. Chem. Eng.*, Vol. 48, (3), pp. 296-300. DOI: 10.1134 / S0040579514030105. [in Russian language]
7. Labutin AN, Nevinitsyn V.Yu. (2017). Synthesis of a nonlinear algorithm for controlling a chemical reactor using a synergetic approach. *Izvestiya vuzov. Chemistry and Chemical technologies*, (2), pp. 38-44. [in Russian language]
8. Labutin A.N., Nevinitsyn V.Y. (2016). Analytical Synthesis of the Chemical Reactor Control System. *International Journal of Advanced Studies*, vol. 6,p, (1), pp. 27-37. DOI: 10.12731 / 2227-930X-2016-1-27-37. [in Russian language]
9. Labutin AN, Nevinitsyn V.Yu., Devetyarov A.N., Volkova G.V. (2014). Synthesis of the effective «reactor-control system» complex using a synergetic approach. *Chemical Industry*, T. XCI, (2), pp. 63-67. [in Russian language]
10. Nevinitsyn V.Yu., Labutin A.N., Volkova G.V., Devetyarov A.N. (2017). A System Analysis of a Chemical Reactor as a Control Object. *Izvestiya vuzov. Chemistry and Chemical technologies*, Vol. 60, (9), pp. 92-99. [in Russian language]

Статья поступила в редколлегию 10.09.18.  
Рецензент: д.т.н., доцент Брянского  
государственного технического университета  
Петрешин Д.И.  
Статья принята к публикации 12.12.18.

**Сведения об авторах:**

**Невиницын Владимир Юрьевич**

кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Техническая кибернетика и автоматика»  
Ивановского государственного химико-  
технологического университета.  
Служебный адрес: 153000, г. Иваново,  
Шереметевский проспект, 7.  
Тел. рабочий: 8-4932-32-72-26.  
Тел. сот: 8-915-837-94-53.  
E-mail: [nevinitsyn@gmail.com](mailto:nevinitsyn@gmail.com)

**Лабутин Александр Николаевич**

доктор технических наук, профессор кафедры  
«Техническая кибернетика и автоматика»  
Ивановского государственного химико-  
технологического университета.  
Служебный адрес: 153000, г. Иваново,  
Шереметевский проспект, 7.  
Тел. рабочий: 8-4932-32-72-26.  
Тел. сот: 8-910-985-43-05.  
E-mail: [lan@isuct.ru](mailto:lan@isuct.ru).

**Волкова Галина Витальевна**

кандидат технических наук, доцент кафедры  
«Техническая кибернетика и автоматика»  
Ивановского государственного химико-  
технологического университета.  
Служебный адрес: 153000, г. Иваново,  
Шереметевский проспект, 7.  
Тел. рабочий: 8-4932-32-72-26.  
E-mail: [konf\\_gv@mail.ru](mailto:konf_gv@mail.ru)

**Information about authors:**

**Nevinitsyn Vladimir Yurievich**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of  
the Department of «Technical Cybernetics and  
Automation» of the Ivanovo State University of  
Chemistry and Technology. Office address: 153000,  
Ivanovo, Sheremetevsky Avenue, 7.  
Tel. working: 8-4932-32-72-26.  
Tel. mob.: 8-915-837-94-53.  
E-mail: [nevinitsyn@gmail.com](mailto:nevinitsyn@gmail.com)

**Labutin Alexander Nikolaevich**

doctor of Engineering Sciences, Professor of the  
Department of «Technical Cybernetics and Automation»  
of the Ivanovo State University of Chemistry and  
Technology.  
Office address: 153000, Ivanovo, Sheremetevsky Avenue,  
7.  
Tel. working: 8-4932-32-72-26.  
Tel. mob.: 8-910-985-43-05.  
E-mail: [lan@isuct.ru](mailto:lan@isuct.ru)

**Volkova Galina Vitalievna**

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor of  
the Department of «Technical Cybernetics and  
Automation» of the Ivanovo State University of  
Chemistry and Technology.  
Office address: 153000, Ivanovo, Sheremetevsky Avenue,  
7.  
Tel. working: 8-4932-32-72-26.  
E-mail: [konf\\_gv@mail.ru](mailto:konf_gv@mail.ru)

---

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования "Брянский государственный технический университет"  
Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»  
Телефон редакции журнала: (4832) 56-49-90. E-mail: [aim-ru@mail.ru](mailto:aim-ru@mail.ru)  
Вёрстка А.А. Алисов. Корректор А.Ю. Малюкина.  
Сдано в набор 10.12.2018. Выход в свет 27.12.2018.  
Объём 50 Мб. ОЗУ 512 Мб. Internet Explorer, Adobe Reader 5.0 и выше.

