

# ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ПАКЕТА ПРОГРАММ MATHCAD В ОБУЧЕНИИ СТУДЕНТОВ – СИСТЕМОТЕХНИКОВ

Крушель Е. Г., Степанченко О. В.

(Россия, Волгоградская обл., г. Камышин)

*Приводятся результаты разработки компьютерной поддержки следующих учебных дисциплин, входящих в программу подготовки бакалавров по направлению «Информатика и вычислительная техника» и инженеров по специальности «Автоматизированные системы обработки информации и управления»: «Основы теории управления», «Методы оптимизации», «Теоретические основы автоматизированного управления». Форма и среда разработки – методические указания к исследовательским работам студентов в виде интерактивных электронных пособий, реализованных в среде пакета программ для математических расчетов MathCAD.*

## 1. Введение

Целесообразность разработки связана с тем, что в течение аудиторных часов, отведенных образовательным стандартом на изучение этих дисциплин, могут быть изложены только классические сведения. Многие современные наукоемкие идеи, необходимые для профессиональной деятельности инженера, вынужденно остаются вне рамок аудиторных занятий.

В образовательном стандарте предусматривается (дополнительно к аудиторному) время для факультативного изучения и самостоятельной работы студентов. Для организации факультатива имеются исчерпывающие учебники. Но самостоятельное изучение студентами учебников такого объема и уровня сложности в рядовых вузах, по-видимому, невозможно из-за временных ограничений. Освоение инструментария современных разделов системотехнических дисциплин может быть облегчено и сделано более увлекательным за счет использования элементов компьютерной технологии обучения, представляемых в данной

работе. Материалы могут также быть полезными в системах дистанционного и дополнительного образования.

Помимо основной учебной цели, состоящей в ознакомлении студентов – системотехников с некоторыми разделами современной теории управления, разработка преследует и ряд дополнительных целей:

- показать студентам, что среда MathCAD удобна и естественна для решения многих инженерных задач, убедить их в полезности MathCAD для будущей работы после вуза;
- проиллюстрировать преимущества и недостатки теоретических методов;
- привить навыки моделирования алгоритмов принятия решений в условиях, отличающихся от теоретических положений;
- предоставить студентам возможность творчества («маленьких открытий»), чтобы выявить потенциальных аспирантов и научных работников.

Форма и среда разработки — методические указания к исследовательским работам в виде интерактивных электронных пособий, реализованных в среде пакета программ для математических расчетов MathCAD. Выбор среды был сделан на основании сопоставления ряда математических пакетов (Matlab, MathCAD, Maple). Несмотря на то, что возможности Matlab значительно шире предоставляемых средой MathCAD, последний имеет гораздо большую наглядность (позволяет представить разъясняющие материалы и формальный аппарат в легко читаемом виде) и доступен для самостоятельного изучения, что особенно важно в системе дистанционного образования. Размерности задач, решаемых в процессе изучения материала, невелики (обычно 4–5), поэтому характеристики MathCAD оказались достаточными для того, чтобы сделать выбор в пользу наглядности и доступности. Поскольку решение об ориентации на использование MathCAD затронуло методики преподавания почти всех дисциплин общепрофессионального и специального циклов, мы приняли решение привить студентам первичные навыки работы с MathCAD сразу, на *первом* семестре обучения (практические и лабораторные работы по дисциплине «Информатика») и со-

вершенствовать эти навыки на протяжении всего периода учебы в институте.

Объем статьи не позволяет представить разработку полностью, поэтому ниже приводятся только краткие сведения об изучаемых темах и сценариях вычислительных экспериментов (раздел 2). Более полные сведения содержатся в опубликованных методических указаниях [5–12].

Результаты разработки прошли многолетнюю проверку при обучении студентов Камышинского технологического института (филиала Волгоградского государственного технического университета), внедрены в учебный процесс и свободно распространяются авторами по запросам через e-mail [helen@kti.ru](mailto:helen@kti.ru).

## **2. Состав и краткое содержание компьютерного сопровождения цикла системотехнических дисциплин**

Мы стремились к тому, чтобы интерактивные электронные пособия, предлагаемые студентам для различных учебных дисциплин системотехнического цикла, обладали методическим и смысловым единством, имели общую направленность и постепенно закрепляли в студентах навыки моделирования и анализа, необходимые для грамотного и творческого инженерного труда. Для этого сценарии компьютерного сопровождения разработаны таким образом, чтобы модели и алгоритмы, освоенные на ранних стадиях обучения, были неоднократно использованы и переосмыслены в последующих работах. Так, модели теплового объекта и электродвигателя постоянного тока используются в постановках задач исследования систем управления и оптимизации; алгоритмы оптимального управления сопоставляются друг с другом и с простыми эвристическими алгоритмами; способы оценки состояния объекта используются при моделировании систем управления с неполной информацией.

Кроме того, мы преследовали цель научить студентов «перепрыгивать мост» от общетеоретических результатов к практическим задачам, формулируемым в содержательных терминах. Для этого абстракции описания задач управления в пространстве состояний или на языке математического программирования сопровождаются подробными примерами прикладного характера, расчет которых позволяет выявить не только преимущества,

но и ограниченность изучаемых методов и научить студентов основам критического и сознательного отношения к наукоемким алгоритмам, необходимого для грамотного проектирования алгоритмического обеспечения автоматизированных систем.

Приведем краткую характеристику разработанных материалов, относящихся к следующим разделам цикла системотехнических наук:

- Автоматическое управление технологическими объектами (подраздел 2.1);
- Оптимизация и оценка состояния дискретных динамических систем (подраздел 2.2);
- Прикладные задачи, формулируемые в терминах математического программирования (подраздел 2.3)

*2.1. Компьютерные средства для моделирования объектов непрерывного действия и изучения методов теории автоматического управления*

*2.1.1. Исследование динамической системы в пространстве состояний (на примере модели электродвигателя постоянного тока двойного питания)*

Главная учебная цель — освоить технологию построения математических моделей реальных объектов в форме, ориентированной на решение задач анализа и синтеза систем автоматического управления (САУ). Способ достижения цели — изучение последовательности действий, выполняемых инженером на стадии разработки математического описания объекта управления (этап эскизного проектирования САУ):

- описание объекта на основе физических закономерностей;
- переход к приближенному описанию объекта в форме нелинейных моделей в пространстве состояний в непрерывном времени;
- получение линеаризованной (в окрестности номинального режима) модели в непрерывном времени, оценка погрешностей линеаризации и определение диапазона отклонений режима работы объекта от номинальных условий, при котором линеаризация допустима;
- получение дискретной линейной модели непрерывного процесса с использованием понятий матричных весовых функ-

ций и полинома Лагранжа–Сильвестра для обеспечения совпадений значений непрерывной и дискретной модели в точках отсчета дискретного времени.

Дополнительные учебные цели:

- помочь студентам осознать различия между моделями, ориентированными на описание физических основ работы объекта, и моделями, необходимыми для разработки системы управления;
- показать, что потеря точности описания физического процесса при переходе к универсальным моделям в пространстве состояний вполне допустима: САУ, синтезированная и настроенная на приближенной модели, может обеспечить приемлемое качество управления реальным процессом;
- углубить и развить навыки студентов в использовании среды MathCAD для решения задач, возникающих в работе инженера – системотехника: освоить методы решения систем нелинейных дифференциальных уравнений (функции `rkfixed( )` и `Bulstoer( )` MathCAD); изучить функции матричной алгебры MathCAD, необходимые для анализа динамических систем (вычисление собственных значений и собственных векторов с помощью функций `eigenvals( )` и `eigenvecs( )`, операции со столбцами матриц).

#### *2.1.2. Оценка параметров моделей непрерывных технологических объектов по экспериментальным данным, выбор типа регулятора и расчет его настроек*

Главная учебная цель — освоить технологию разработки локальных систем управления объектом. Способ достижения цели — изучение последовательности действий, выполняемых инженером в процессе создания САУ:

- проведение начальной фазы инженерных работ, выполняемых при разработке систем управления реальными инерционными процессами с запаздыванием (снятие кривых разгона и частотных характеристик);
- структурная и параметрическая идентификация объекта по экспериментальным данным;
- выбор закона управления (из класса линейных);
- определение настроечных параметров регулятора;

- моделирование САУ, исследование чувствительности системы к параметрам объекта и настройкам регулятора;
- перенос разработанной САУ на реальный объект, уточнение настроек регулятора.

Для освоения перечисленных вопросов студентам предлагается среда с виртуальным объектом, имитирующим работу нагревательной установки. Структура и параметры модели студентам не сообщаются, они должны идентифицировать их самостоятельно, по результатам обработки экспериментальных данных, разработать и смоделировать САУ на основе идентификации, исследовать чувствительность системы к исходным данным и параметрам и проверить результаты разработки при ее переносе в среду с виртуальным объектом.

Дополнительные учебные цели:

- помочь студентам осознать трудности экспериментальных исследований на реальном инерционном объекте (для этого виртуальный объект также разработан как инерционный, результаты экспериментов с ним намеренно искажаются помехами и трендом);
- показать, что этап моделирования при разработке системы управления обязателен в связи с трудностями подбора типа и настроек регуляторов на реальном объекте; убедить студентов в пользе вычислительных экспериментов в дополнение к натурным;
- научить студентов приемам моделирования типовых процессов с запаздыванием и систем управления ими в среде MathCAD.

### *2.1.3. Метод двойной временной шкалы и его использование при моделировании дискретных динамических систем*

Главная учебная цель — дать студентам представление о современных методах упрощения исследования и описания сложных многомерных процессов. Способ достижения цели — освоение одного из подходов, позволяющих снизить размерность описания объектов управления в пространстве состояний в том случае, часто имеющем место на практике, когда физические процессы в объекте имеют существенные различия в инерционности:

- освоить технологию преобразования разнотемповых взаимосвязанных физических переменных состояния в форму, в которой быстрая и медленная составляющие автономны; научиться тестировать модель объекта на наличие разнотемповых процессов;
- освоить метод построения моделей пониженного порядка;
- изучить основы метода малого параметра для введения различных шкал времени для быстрой и медленной составляющих;
- освоить методику моделирования процессов с двойной шкалой времени, оценить преимущества понижения порядка описания объекта, возможность раздельного управления быстрой и медленной фазами и погрешности, возникающие из-за такого упрощения;
- заметить влияние динамики быстрой фазы на динамику всей системы в окрестности изменений режима работы объекта, освоить понятие пограничного слоя;
- оценить возможности экономичного использования ресурсов цифровых систем управления разнотемповыми процессами за счет преимущественной работы САУ в шкале «медленного» времени (с большим интервалом дискретизации непрерывного времени).

Дополнительные учебные цели:

- Изучить понятия «агрегирование переменных состояния»;
- Проиллюстрировать работоспособность метода двойной шкалы времени для решения задачи управления реальным объектом (на примере управления скоростью вращения электродвигателя, см. 2.1.1);
- Освоить ряд приемов матричной алгебры, предусмотренных в MathCAD (операции с блочными матрицами, функции  $\text{stack}()$ ,  $\text{augment}()$  и др.).

*2.2. Компьютерные средства изучения методов оптимизации дискретных динамических процессов*

*2.2.1. Исследование задачи оптимизации линейной дискретной системы с квадратическим критерием (задача АКОР)*

Главная учебная цель — освоить метод Аналитического Конструирования Оптимальных Регуляторов (АКОР) в объеме, позволяющем использовать результаты оптимизации при проек-

тировании и разработке систем управления. Способ достижения цели — последовательное изучение формального аппарата АКОР с анализом его преимуществ и недостатков:

- освоение технологии вывода соотношений, определяющих закон управления и параметры его настройки (на примере переноса известных результатов [2, с. 549-557] в задачу с отличиями в способе учета задающих воздействий и возмущений, подробнее см. в разделе 3);

- моделирование задачи АКОР в среде MathCAD с учетом традиционных для теории управления критериев качества (быстродействия, перегулирования, среднего квадратического отклонения переменных состояния от заданных значений);

- оценка чувствительности САУ с регулятором, синтезированным методом АКОР, к параметрам объекта и свойствам возмущений (в том числе стохастических);

- изучение способов восстановления неизмеряемых компонент вектора состояния по результатам измерения доступных компонент с помощью фильтров Льюенбергера и Калмана-Бьюси;

- оценка работоспособности алгоритма АКОР в системах с неполным измерением вектора состояния (с восстановлением недостающих компонент фильтрами);

- оценка преимуществ оптимального управления по сравнению со стандартными решениями на базе линейных регуляторов (на примере решения задачи оптимального управления скоростью вращения электродвигателя, см. 2.1.1, и тепловым объектом, см. 2.1.2).

Дополнительные учебные цели:

- ознакомление с влиянием организации вычислительного процесса на вычислительную сложность оптимизационных алгоритмов;

- осознание необходимости учета задержек времени, вносимых в систему информационными и вычислительными процессами, подготовка к восприятию идей управления в реальном времени;

- освоение программирования в среде MathCAD (на примере расчета параметров алгоритма АКОР с использованием рекурсивных функций, подробнее см. в разделе 3).



### *2.2.2. Применение аппарата квадратичного программирования в задачах оптимизации дискретных динамических систем*

Главная учебная цель — освоить технологию и оценить преимущества и недостатки использования аппарата квадратичного программирования для целей оптимизации динамических процессов. Способ достижения цели — последовательное изучение «привязки» аппарата квадратичного программирования к задаче оптимального управления дискретным динамическим процессом с квадратическим критерием качества:

- осознание недостатков явной формы учета естественных ограничений на значения переменных состояния и управляющих воздействий при использовании метода АКОР, см. 2.2.1 (неполное использование допустимого диапазона изменений управляющих воздействий, трудности выбора настроечных параметров в квадратическом критерии АКОР);
- изучение способа описания задачи с квадратическим критерием качества в терминах квадратичного программирования;
- моделирование системы управления скоростью вращения электродвигателя с использованием алгоритма АКОР и процедуры квадратичного программирования, сравнение результатов по качеству управления и по затратам времени на вычисления.

Дополнительные учебные цели:

- осознание необходимости компромисса между своевременностью управляющих воздействий и точностью учета особенностей модели объекта и системы ограничений при управлении процессом в реальном времени;

### *2.2.3. Методы математического программирования и их использование при решении прикладных задач*

Главная учебная цель — привить студентам навыки формулирования задач построения систем принятия решений в различных сферах управления технологическими процессами, производством и экономическими объектами. Способ достижения цели — освоение предмета «Методы оптимизации», предусмотренного образовательным стандартом подготовки инженеров — системотехников, совместно с постановкой исследовательских работ, в которых исходная задача принятия решений формулируется в только в содержательных терминах. Студенту предсто-

ит перейти от содержательной постановки задачи к формализованной, самостоятельно выбрать адекватный критерий оптимальности, разработать модель объекта, описать систему ограничений, выбрать подходящий метод математического программирования и провести анализ полученного результата:

- освоение алгоритмов поиска экстремума функции многих переменных применительно к задаче выбора настроечных параметров регулятора. Состав изучаемых алгоритмов: градиентные (различные модификации метода наискорейшего спуска), алгоритмы с параллельными вычислениями (синхронное детектирование), адаптивные поисковые алгоритмы (процедура Хука-Дживса);
- изучение способа формализации практической задачи на языке линейного программирования (содержательно задача формулируется в терминах определения расходов фирмы на рекламу, обеспечивающих максимальную прибыль);
- применение моделей целочисленного программирования (содержательно задача формулируется в терминах календарного планирования режима работы насосной станции);
- формализация оптимизационных задач с нелинейной системой ограничений и нелинейным критерием (содержательно задачи формулируются в терминах динамического планирования развития предприятия при нелинейном характере спроса на его продукцию).

Дополнительные учебные цели:

- изучение популярных алгоритмов математического программирования до уровня, позволяющего студентам самостоятельно программировать их при учебном и производственном проектировании алгоритмического обеспечения (симплекс-алгоритм линейного программирования, метод ветвей и границ для решения целочисленных оптимизационных задач, проективные методы решения задач оптимизации с выпуклой системой ограничений и вогнутым критерием и др.);
- освоение параллельных вычислений в среде MathCAD (на примере решения задачи поиска экстремума методом синхронного детектирования).

**Список литературы:**

1. Барабашова (Степанченко) О.В., Крушель Е.Г. Исследование задачи оптимизации линейной дискретной системы с квадратическим критерием (задача Аналитического Конструирования Оптимальных Регуляторов, АКОР): методические указания. — Волгоград: ВолгГТУ, 2001. 36 с.
2. Крушель Е.Г. Исследование задачи оценивания неизмеряемых компонент вектора состояния дискретной системы («Наблюдатель Люенбергера» и алгоритм «Расчет»): методические указания. — Волгоград: ВолгГТУ, 2000. 40 с.
3. Барабашова (Степанченко) О.В., Крушель Е.Г. Исследование динамической системы в пространстве состояний (на примере модели электродвигателя постоянного тока двойного питания): методические указания. — Волгоград: ВолгГТУ, 2000. 18 с.
4. Крушель Е.Г., Рапенко А.В. Метод двойной временной шкалы и его использование при моделировании дискретных динамических систем: методические указания. — Волгоград: ВолгГТУ, 2000. 49 с.
5. Барабашова (Степанченко) О.В., Крушель Е.Г. Симплекс-алгоритм решения задачи линейного программирования: методические указания. — Волгоград: ВолгГТУ, 2000. 22 с.
6. Барабашова (Степанченко) О.В., Крушель Е.Г. Алгоритмы поиска экстремума функции многих переменных: методические указания. — Волгоград: ВолгГТУ, 2000. 30 с.
7. Барабашова (Степанченко) О.В., Крушель Е.Г. Метод прямого поиска экстремума функции многих переменных (алгоритм Хука-Дживса): методические указания. — Волгоград: ВолгГТУ, 2000. 16 с.
8. Барабашова (Степанченко) О.В., Крушель Е.Г. Решение задач линейного программирования (ЛП) с помощью табличного процессора Microsoft Excel. Исследование модели ЛП. : методические указания. — Волгоград: ВолгГТУ, 2001. 16 с.
9. Крушель Е.Г. Компьютерная поддержка учебной дисциплины «Методы оптимизации»: опыт обучения постановкам и методам решения реальных оптимизационных задач// Математика. Компьютер. Образование. Вып. 8. Часть 1 / Под ре-

дакцией Г.Ю. Ризниченко. — М.: Прогресс–традиция, 2001. С. 132–139.

10. Крушель Е.Г., Степанченко О.В. Синтез и моделирование систем управления с двойной шкалой времени // Математика. Компьютер. Образование. Вып. 8. Часть 2 / Под редакцией Г.Ю. Ризниченко. — М.: Прогресс–традиция, 2001. С. 517-522.

## **THE EXPERIENCE OF THE MATHCAD APPLICATION TO THE STUDENTS STUDY ON THE SYSTEMS ENGINEERING SPECIALTIES**

**Krushel E. G., Stepanchenko O. V.**

(Russia, Volgograd region, Kamyshin city)

*The issue presents the results of the computer support development for the follows disciplines to be studied by the students of the computer sciences bachelors program and systems engineering specialty: “Control theory foundation”, “Optimization methods”, “Computer control theoretical concepts”. The support was worked out as the e-guidance in the MathCAD environment for the students’ research laboratory works to be carried out during the corresponding discipline study.*