

обеспечения содержит программные модули, обеспечивающие управление аналоговой машиной АК-3И и функциональными модулями системы КАМАК в соответствии со схемой рис. 2. Прикладное программное обеспечение содержит программы решения дифференциальных уравнений, основанных на численных методах, программы тестирования, программы тестирования аналоговых и цифровых решений, используемых при отладке работы комплекса, а также ряд программ для накопления данных, их анализа, преобразований и представления на внешних носителях информации.

#### Библиографический список

1. Фритч В. Применение микропроцессоров в системах управления. М.: Мир, 1984. 464 с.
2. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю. Движение заряженных частиц в электрических и магнитных полях. М.: Наука, 1978. 224 с.
3. Анисимов В.Б., Голубкин В.Н. Аналоговые вычислительные машины. М.: Высшая школа, 1986. 320 с.
4. Певчев Ю.Ф., Финогенов К.Г. Автоматизация физического эксперимента. М.: Энергоатомиздат, 1986. 367 с.
5. Валикова Л.И. и др. Операционная система СИ ЭВМ РАБОС. М.: Финансы и статистика, 1984. 207 с.

УДК 62:506.1

В.В.Матросов, В.П.Пономаренко

УЧЕБНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС  
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ ДИНАМИКИ СИСТЕМ  
АВТОМАТИЧЕСКОЙ синхронизации

(г. Горький)

В процессе подготовки высококвалифицированных специалистов в различных областях науки и техники все большее место занимает вычислительный эксперимент и математическое моделирование на ЭВМ. Для обеспечения процесса моделирования признано перспективным создание учебно-исследовательских программных комплексов, ориентированных на соответствующие дисциплины специализации. В данной работе рассма-

риваются принципы разработки программного комплекса моделирования нелинейной динамики автоматических систем управления колебаниями (комплекса "ДСС") и вопросы использования комплекса в учебном процессе при подготовке студентов в области прикладной математики и систем управления.

Объектом исследования комплекса "ДСС" являются математические модели взаимосвязанных двухпетлевых систем синхронизации (ДСС) широкополосных шумоподобных сигналов, имеющих широкую область применения в современных системах связи и слежения. Эти модели описываются нелинейными системами обыкновенных дифференциальных уравнений второго, третьего и четвертого порядка в соответствующих цилиндрических фазовых пространствах. К основным задачам динамики ДСС относятся:

исследование движений соответствующих моделей в фазовых пространствах и бифуркаций при изменении параметров;

установление разбиения пространства параметров моделей на области с различным характером движений (параметрического портрета);

определение динамических характеристик ДСС, показывающих качество решения или задач синхронизации и слежения.

В качестве математических методов решения этих задач используются качественные и численные методы исследования динамических систем. Результаты качественного исследования двумерных моделей ДСС показывают [1-3], что уже простейшие структуры этих систем обладают довольно сложной динамикой и богатым набором притягивающих движений, определяющих стационарные режимы ДСС. В этих моделях установлено существование следующих бифуркаций фазового портрета: сепаратрисные связки, влияющие на область притяжения режима слежения; петли сепаратрис и двойные предельные циклы, приводящие к возникновению автоколебательных режимов. Применение численных методов и компьютерного моделирования позволяет выполнить приближенное определение бифуркационных значений параметров. При исследовании моделей ДСС третьего и четвертого порядка в силу отсутствия общих методов и приемов качественного исследования их динамики компьютерное моделирование является основным методом исследования. В процессе этого моделирования детально исследуются движения систем, представляющие наибольший интерес для решения той или иной конкретной задачи динамики ДСС.

Задачи моделирования динамики ДСС определяются необходимостью

исследования стационарных и переходных режимов и определения соответствующих динамических характеристик. В исследуемых моделях ДСС возможны следующие типы стационарных режимов: режим слежения  $\Gamma_S$ , определяемый устойчивым состоянием равновесия, автоколебательные режимы, определяемые устойчивыми периодическими движениями вращательного типа, режимы хаотических колебаний в моделях третьего и четвертого порядка. Основными динамическими характеристиками ДСС являются точность слежения в режиме  $\Gamma_S$ , область существования этого режима в пространстве параметров, область захвата в режим  $\Gamma_S$ , время установления режима  $\Gamma_S$ .

Точность слежения характеризуется координатами устойчивого состояния равновесия исследуемых моделей. Область существования  $\Gamma_S$  определяется значениями параметров моделей, при которых обеспечиваются условия локальной устойчивости состояния равновесия, отвечающего режиму  $\Gamma_S$ . Область захвата  $\Pi_S$  определяется такими значениями параметров, при которых для начальных значений фазовых переменных из области  $G_0$ , задаваемой для каждой конкретной модели ДСС условиями предварительной грубой синхронизации, в системе устанавливается режим слежения, а установление колебательных режимов невозможно. Область захвата является важнейшей характеристикой ДСС, позволяющей оценить устойчивость исследуемой модели системы по отношению к вариациям параметров и начальных рассогласований.

Большое научное и прикладное значение в плане анализа устойчивости ДСС к возмущениям режима  $\Gamma_S$  имеет исследование перестройки движений в ДСС при выходе значений параметров из области  $\Pi_S$ . Время  $\tau_S$  установления режима  $\Gamma_S$  характеризует быстродействие ДСС в процессе переходного режима к состоянию слежения. Оно определяется временем движения изображающей точки в фазовом пространстве по траекториям, определяется исследуемой моделью из области характерных начальных условий  $G_0$  до достижения окрестности устойчивого состояния равновесия.

При проведении моделирования динамики исследуемых систем синхронизации с использованием комплекса программ ДСС предусматривается решение двух групп задач: расчетные задачи по вычислению и анализу динамических характеристик и исследовательские задачи, включающие исследование режима слежения, процесса захвата в режим слежения, отыскание и исследование периодических движений и бифуркации изучаемых моделей ДСС.

В процессе исследования режима слежения ставятся задачи определения области существования режима  $I_S$ , анализ поведения системы в зависимости от начальных условий и выяснения того, какие режимы устанавливаются в системе при различных способах задания начальных условий, определения точности слежения в случае установления режима  $I_S$  при различных значениях параметров исследуемых моделей.

При исследовании процесса захвата ДСС в режим слежения  $I_S$  ставятся задачи определения области захвата  $D_S$  и времени  $\tau_S$  установления режима  $I_S$  при различных значениях параметров исследуемых моделей. В результате сравнения характера зависимости  $D_S$  и  $\tau_S$  от параметров может быть поставлена задача поиска оптимальных значений параметров, при которых исследуемая система обладает требуемыми областями захвата и быстродействием.

При исследовании периодических движений и бифуркаций двумерных моделей ДСС основной целью является разбиение плоскости двух параметров, интересующих исследователя, бифуркационными кривыми, соответствующими слиянию состояний равновесия, петле сепаратрис седла и двойным предельным циклам вращательного типа, на области с различными фазовыми портретами движений систем. Численное исследование трехмерных и четырехмерных моделей ДСС проводится по следующей схеме: вначале определяются области  $C_S$  и  $D_S$ , затем исследуются перестройки движений системы при выходе значений параметров из области  $D_S$ . Решение этих задач проводится с помощью алгоритмов и программ, позволяющих находить в фазовом пространстве одномерные сепаратрисы седловых состояний равновесия, строить отображение Пуанкаре, порождаемое на секущей фазовыми траекториями исследуемой модели, находить периодические движения и вычислять их мультипликаторы, определять на решениях систем ляпуновские характеристические показатели.

Математические модели ДСС, способы и алгоритмы исследования динамики систем и определения динамических характеристик составляют методическое обеспечение комплекса программ "ДСС". В состав комплекса входят управляющая программа и функциональные подсистемы, объединяющие программные модули, реализующие алгоритмы решения задач динамики семи моделей двух базовых структур ДСС /4/. Каждой из исследуемых моделей поставлены в соответствие ключевое слово и

значения ключевых параметров. Задание на решение задач составляется пользователем по схеме, аналогичной той, которая разработана в АСНИ "Автомат" /5/.

Комплекс программ "ДСС" используется в НИИ прикладной математики и кибернетики при Горьковском госуниверситете в качестве инструмента компьютерного моделирования на ЕС ЭВМ при проведении научных исследований и в учебном процессе при постановке лабораторного практикума, цикла учебно-исследовательских работ по программе спецкурсов "Качественные методы в теории синхронизации динамических систем" и "Математическое моделирование нелинейных систем и процессов управления колебаниями", читаемых студентами 3-4 курсов факультета вычислительной математики и кибернетики Горьковского университета. Применение комплекса "ДСС" в учебном процессе способствует более глубокому познанию закономерностей движений в сложных нелинейных системах управления и развитию самостоятельности студентов при решении конкретных научно-исследовательских и расчетных задач. Методика применения комплекса в учебном процессе состоит в поэтапном усвоении материала по специализации путем решения расчетных научно-исследовательских задач от простых к более сложным и включает проработку и усвоение лекционного материала, специальной и методической литературы, затем выполнение заданий лабораторного практикума по моделированию систем, после этого выполнение заданий учебно-исследовательской, научно-исследовательской работы, курсового и дипломного проектирования, включающих проведение вычислительного эксперимента с моделями систем синхронизации.

Кроме учебно-исследовательских и научно-исследовательских задач по динамике ДСС возможна постановка задач по развитию и совершенствованию комплекса программ "ДСС". Необходимость постановки таких задач возникает в тех случаях, когда появляется необходимость в исследовании моделей или динамических характеристик, не включенных в класс моделей и динамических характеристик комплекса "ДСС". В этих случаях предусматривается привлечение студентов в разработке схем моделирования исследуемых объектов и требуемых для реализации этих схем алгоритмов, а также программ вычислений с последующим использованием созданного обеспечения для проведения исследований и расчетов.

## Библиографический список

1. Пономаренко В.П. Исследование динамики двухконтурной системы синхронизации псевдослучайного радиосигнала //Радиотехника и электроника. 1982. Т. 27. № 1. С. 117-125.

2. Пономаренко В.П. Динамические свойства системы синхронизации сложного сигнала с дополнительной связью по цепям управления //Радиотехника и электроника. 1985. Т. 30. № 3. С. 534-543.

3. Матросов В.В., Пономаренко В.П. Проблемы моделирования двухпетлевых систем синхронизации сложных сигналов //Радиотехника. 1988. № 9. С. 50-51. Деп. в ЦНТИ "Информсвязь" 4.03.88, № 1271-св.88.

4. Матросов В.В., Пономаренко В.П. Исследование нелинейной динамики двухпетлевой системы автоматической синхронизации: Методические указания к выполнению учебно-исследовательской и научно-исследовательской работы студентов: Горьк. гос.ун-т. Горький. 1989.

5. Пономаренко В.П., Заулин И.А., Матросов В.В. Моделирование нелинейной системы синхронизации: Методические указания к выполнению учебно-исследовательской работы с использованием АСНИ "Автоматика". Горьк. гос.ун-т. Горький, 1986.