ЦЯНЬ СЮЭ-СЭНЬ

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

ЦЯНЬ-СЮЭ-СЭНЬ

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

Перевод с английского
М. З. ЛИТВИНА-СЕДОГО

Под редакцией
А. А. ФЕЛЬДБАУМА

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Москва, 1956

Цянь-Сюэ-Сэнь
ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

Редактор *А. В. ГЕРМОГЕНОВ*

Художник *М. В. Борисова-Мусатова*

Технический редактор *С. В. Клименко*

Сдано в производство 25/IV 1956 г.
Подписано к печати 4/VIII 1956 г.
Бумага $84\times108^1/_{32}$=7,2 бум. л.
24,5 печ. л. Уч.-изд. л. 21,5.
Изд. № 1/2971
Цена 17 р. 05 к. Зак. № 311

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва, Ново-Алексеевская, 52.

16-я типография Главполиграфпрома
Министерства культуры СССР.
Москва, Трехпрудный пер., д. 9.

И * Л

Издательство

иностранной

литературы

*

ENGINEERING CYBERNETICS

H. S. TSIEN

Daniel and Florence Guggenheim Jet Propulsion Center
California Institute of Technology
Pasadena, California

McGraw-Hill Book Company

New York Toronto London

1954

ЦЯНЬ-СЮЭ-СЭНЬ

ТЕХНИЧЕСКАЯ КИБЕРНЕТИКА

Перевод с английского
М. З. ЛИТВИНА-СЕДОГО

Под редакцией
А. А. ФЕЛЬДБАУМА

ИЗДАТЕЛЬСТВО
ИНОСТРАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
Москва, 1956

АННОТАЦИЯ

Книга Цяня «Техническая кибернетика» является первой выпускаемой на русском языке монографией по новому разделу науки — кибернетике. Кибернетика — наука о построении систем из механических и электрических компонентов для осуществления устойчивых целенаправленных действий. Книга рассчитана на широкие круги инженеров, интересующихся теорией этих вопросов, а также на научных работников и студентов старших курсов технических вузов.

Редакция литературы по математическим наукам

Заведующий редакцией профессор А. Г. КУРОШ

ПРЕДИСЛОВИЕ РЕДАКТОРА ПЕРЕВОДА

Последние годы характеризуются ярко выраженной тенденцией к созданию единой теоретической базы для огромного комплекса наук о передаче и преобразовании сигналов в целях связи и управления. Эту общую теоретическую базу называют по-разному: «теория систем управления», «общая теория информации», «общая теория связи», «техническая кибернетика», «общая техническая динамика» и т. д. Пути к этой новой, далеко еще не созревшей науке идут от теории связи, теории вычислительных устройств, теории автоматического регулирования и ряда других дисциплин. В книге Цяня «Техническая кибернетика» новая теория строится путем систематического обобщения задач автоматического регулирования. Поэтому она представляет наибольший интерес для специалистов по автоматическому регулированию.

Первые главы книги посвящены известным разделам теории регулирования и могут рассматриваться как введение в теорию. Однако уровень сложности и оригинальности изложения быстро возрастает вместе с последовательным обобщением задач. В последних главах кратко рассмотрены некоторые новые направления и поиски возможных новых общих путей развития автоматических систем.

В книге систематизирован большой материал, содержащий много интересных результатов, примеров и идей, причем использована обширная литература. Для удобства читателей в примечаниях к переводу добавлены ссылки на некоторые советские работы и учебники по автоматике.

А. А. Фельдбаум.

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА К РУССКОМУ ПЕРЕВОДУ

Выпуск русского издания моей книги «Техническая кибернетика», несомненно, сделает ее содержание более доступным большому и важному отряду ученых и инженеров современности—ученым и инженерам СССР. Я очень счастлив, что это случилось. Это произошло благодаря усилиям д-ра Фельдбаума и Издательства иностранной литературы. Д-р Фельдбаум добавил также библиографию работ советских ученых, а Издательство дало мне возможность внести некоторые исправления в русское издание. То и другое улучшает книгу. Поэтому я хочу воспользоваться этим случаем и выразить мою искреннюю благодарность д-ру Фельдбауму и Издательству.

Июль 1956 г. *Автор.*

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Знаменитый физик и математик А. М. Ампер ввел слово кибернетика (cibernétique) как термин, определяющий науку об управлении государством (часть II труда «Essai sur la philosophie des sciences», Paris, 1848). Грандиозная схема политических наук, построенная Ампером, не претворилась в жизнь и, возможно, не претворится никогда. Тем временем конфликты между правительствами, сопровождаемые применением силы, в значительной мере ускорили развитие другой ветви науки—науки о регулировании и управлении механическими и электрическими системами. И поэтому то обстоятельство, что Винер заимствовал это слово Ампера, окрестив им науку, столь важную для современной военной техники, носит, возможно, иронический оттенок. «Кибернетика» Винера (Cybernetics or control and communication in the animal and the mashine, New York, 1948) является наукой о построении систем из механических и электрических компонентов для осуществления устойчивых целенаправленных действий. Отличительной чертой этой новой науки является полное отсутствие соображений, связанных с рассмотрением энергии, тепла и коэффициента полезного действия, столь важных в других естественных науках. По существу, главное внимание в кибернетике направлено на качественные стороны взаимодействий между различными компонентами системы и на поведение всей системы, обусловленное этими взаимодействиями.

Цель книги «Техническая кибернетика» состоит в изучении тех областей обширной науки, именуемой кибернетикой, которые имеют непосредственное техническое применение для разработки регулируемых, или управляемых систем. Эта книга содержит, конечно, те материалы по данной теме, которые обычно рассматриваются в руководствах по следящим системам. Но больший охват материала является лишь одним из различий между технической кибернетикой и прикладной теорией следящих систем. Более глубокое—и поэтому более важное—различие заключается в том, что техническая кибернетика представляет собой техническую *науку*, тогда как прикладная теория следящих систем представляет собой техническую *практику*.

Техническая наука имеет своею целью систематизировать принципы расчетов, применяемых в технической практике, чтобы построить единую научную дисциплину и тем самым выявить сходные черты в различных областях технической практики и показать мощь основных понятий. Короче говоря, в технической науке преобладает теоретическое исследование и очень часто применяются сложные методы математического анализа. Это отчетливо выступает уже при беглом просмотре содержания настоящей книги. Зато здесь почти не рассматриваются подробности конструктивного осуществления и проектирования компонентов систем, которые служат реальным приложением теории, и не приводится данных о конкретных устройствах.

Что же оправдывает это разделение теории и практики? В свете самого существования различных инженерных наук и их современного бурного развития такое оправдание едва ли является необходимым. Больше того, можно привести конкретный пример: механика жидкостей существует как инженерная наука отдельно от практики инженеров, работающих в области аэродинамики, гидравлики, метеорологии и других отраслей техники и пользующихся результатами исследований в области механики жидкостей в своей повседневной работе. В самом деле, без механики жидкостей понимание закономерностей сверхзвуковых потоков и их применение, несомненно, были бы сильно задержаны, чтобы не сказать больше. Поэтому образование технической кибернетики как технической науки оправдывается тем обстоятельством, что более широкий взгляд на предмет при систематизации рассмотрения часто может привести к новым и плодотворным методам подхода к старым задачам и открыть новые неожиданные перспективы. В настоящее время, когда существуют разнообразные применения техники автоматического регулирования и управления, вполне целесообразна попытка охватить все возможности, заложенные в этой новой науке, путем осмысленного обозрения всей ее области.

Поэтому рассуждения в области технической кибернетики должны с разумной степенью общности охватить все стороны науки, от которых можно ожидать технических приложений; в частности, не следует избегать какой-либо темы только по причине трудностей математического характера. Это тем более справедливо, что математические трудности всякого исследования обычно носят совершенно искусственный характер. При небольших изменениях в толковании материала изложение в общем случае можно упростить до уровня сложности, приемлемого для инженера-исследователя. Математический уровень данной книги отвечает познаниям студента, изучившего обычный курс математического анализа. Для понимания изложения необходимо знание теории интегрирования функций комплексной переменной, вариационного исчисления и обыкновенных дифференциальных уравнений. С другой стороны, мы не проводим строгих и изящных математических доказательств там, где достаточны эвристические соображения. Для специалиста-практика в области электроники трактовка, данная в книге, должна показаться чрезмерно «академичной», но для математика, интересующегося этой областью, она может показаться любительской. И если вся критика по адресу настоящей книги сведется только к этим замечаниям, то при всем их значении автор будет считать, что он не потерпел неудачи в выполнении поставленной перед собой задачи.

Глава I

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрим систему с одной степенью свободы, т. е. систему, физическое состояние которой можно охарактеризовать с помощью одной переменной y. Поведение такой системы описывается функциональной зависимостью переменной y от времени t. Для определения поведения системы или функции $y(t)$ необходимо знать структуру этой системы и свойства отдельных ее элементов. Эти сведения о системе вместе с использованием основных физических законов, переведенные на язык математики, доставляют уравнение для вычисления функции $y(t)$, которое может быть интегральным или интегродифференциальным, но весьма часто является дифференциальным уравнением, притом обыкновенным, так как здесь имеется только одна независимая переменная — время t.

Дифференциальное уравнение называется линейным, а система, описываемая дифференциальным уравнением,— линейной системой, если каждый член этого уравнения содержит самое большее только первую степень зависимой переменной y или ее производной по времени. В состав этого уравнения не должны входить более высокие степени y или смешанные произведения y и ее производных. В противном случае дифференциальное уравнение называется нелинейным, а система, описываемая таким уравнением,—нелинейной системой. Линейные системы можно, далее, разделить на системы с постоянными коэффициентами и системы с переменными коэффициентами. В системах с постоянными коэффициентами в качестве коэффициентов в членах дифференциального уравнения, описывающего систему, служат постоянные, не зависящие от времени. В системах с переменными коэффициентами коэффициенты являются функциями от t.

Приведенная здесь классификация типов дифференциальных уравнений оправдывается тем, что характер решения уравнения и тем самым поведение системы тесно связаны с типом описывающего ее дифференциального уравнения. Больше того, тип дифференциального уравнения определяет само существо вопросов, которые логически можно задавать относительно данной системы. Другими словами, тип дифференциального уравнения предопределяет и надлежащий путь решения технических задач, связанных с системой. Мы увидим это далее.

1. 1. Линейные системы с постоянными коэффициентами. Рассмотрим простейшую линейную систему — систему первого порядка. Это означает, что система описывается линейным дифференциальным уравнением первого порядка с постоянными коэффициентами. Если система свободная и не находится под действием «вынуждающих функций» («forced functions»), то ее дифференциальное уравнение можно записать в виде

$$\frac{dy}{dt}+ky=0, \tag{1.1}$$

где действительную величину k можно назвать упругой постоянной. Если y не меняется с течением времени, dy/dt равно нулю, и из уравнения (1.1) следует, что $y=0$. Таким образом, установившемуся, или равновесному, состоянию системы отвечает значение $y=0$.

Решением уравнения (1.1) служит функция

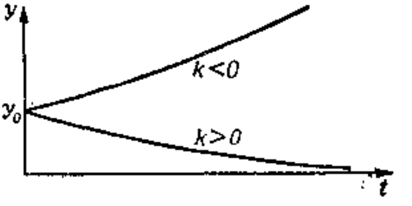
$$y=y_0e^{-kt}, \tag{1.2}$$

где y_0 — начальное значение y, т. е.

$$y(0)=y_0. \tag{1.3}$$

Следовательно, величина y_0 представляет собой начальное отклонение от равновесного состояния системы. График на фиг. 1 иллюстрирует поведение системы при $t>0$ как при положительном, так и при отрицательном k.

Из вида кривых следует, что при $k>0$ величина y убывает с течением времени и при неограниченном возрастании времени $y\to 0$. Поэтому при $k>0$ отклонение системы от равновесного состояния в конце концов практически обратится в нуль и, следовательно, систему можно назвать *устойчивой*. В случае $k < 0$ отклонение системы от положения равновесия увеличивается с течением времени, и в конце концов оно станет значительным, каким бы малым ни было начальное отклонение: система, однажды отклонившаяся от этого положения, никогда уже к нему не вернется. Такие системы, следовательно, *неустойчивы*.



Фиг. 1

Системы более высокого порядка описываются дифференциальными уравнениями, содержащими более высокие производные. Система n-го порядка описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{d^n y}{dt^n} + a_{n-1}\frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \ldots + a_0 y = 0. \qquad (1.4)$$

В физических системах коэффициенты $a_{n-1}, \ldots, a_0$ действительны. Решение уравнения (1.4) имеет вид

$$y = \sum_{i=1}^{n} y_0^{(i)} e^{\alpha_i t} \sin(\beta_i t + \varphi_i), \qquad (1.5)$$

где величины α_i, β_i — вещественные и зависят от коэффициентов $a_{n-1}, \ldots, a_0$, а величины φ_i представляют собой начальные фазы. Движение системы устойчиво лишь в том случае, когда все α_i отрицательны. Если хоть одна из этих величин положительна, то отклонение системы от состояния равновесия в конце концов будет возрастать неограниченно и, следовательно, система будет неустойчивой.

Примеры, разобранные выше, показывают, что при рассмотрении линейной системы с постоянными коэффициентами главным вопросом является вопрос об устойчивости. Едва ли требуется отмечать, что в технических расчетах обычно ставится цель обеспечения устойчивости системы. На вопрос же о том, будет ли система устойчивой или нет, можно ответить, коль скоро известны коэффициенты дифференциального уравнения. В случае простой системы первого порядка, определяемой уравнением (1.1), существенен лишь знак коэффициента k.

1. 2. Линейные системы с переменными коэффициентами. Если рассматриваемая система содержит переменный параметр, то ее установившееся равновесное состояние можно изменять путем изменения этого параметра. Поэтому естественно ожидать, что коэффициенты линейного дифференциального уравнения, описывающего эту систему, также являются функциями от этого параметра. Например, аэродинамические силы, действующие на самолет, суть функции его скорости. Если скорость самолета меняется (в процессе ускорения или замедления его полета), происходит соответственное изменение аэродинамических сил, между тем как параметры самолета, характеризующие его инерцию, остаются практически неизменными. Вследствие этого основное дифференциальное уравнение, служащее для вычисления возмущенного полета самолета по отношению, например, к горизонтальному полету, будет уравнением с переменными коэффициентами.

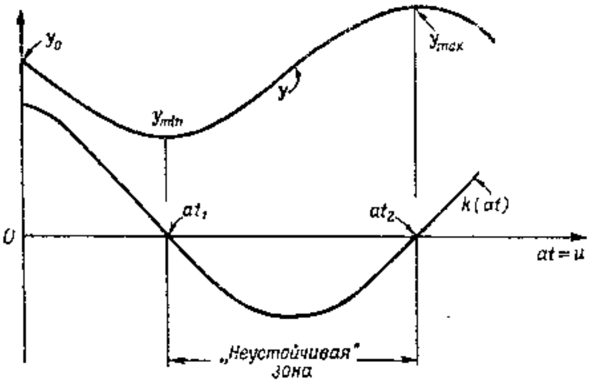
Вернемся к простому примеру системы первого порядка, описываемой уравнением (1.1). Пусть упругая постоянная k является функцией скорости самолета; если самолет движется с постоянным ускорением a, то k представляет собой функцию величины $u = at$. Таким образом, дифференциальное уравнение принимает вид

$$\frac{dy}{dt} + k(at)\,y = 0, \tag{1.6}$$

а его решение определяется интегралом

$$\ln\frac{y}{y_0} = -\frac{1}{a}\int_0^{at} k(\xi)\,d\xi, \tag{1.7}$$

где y_0 — начальное возмущение. Если k всегда остается положительным, то $\ln(y/y_0)$ всегда будет отрицательным и с течением времени этот логарифм будет возрастать по абсолютной величине, оставаясь отрицательным. Следовательно, y всегда будет меньше y_0 и в конце концов (практически) обратится в нуль. Таким образом, в этом случае система устойчива. Если k всегда отрицательно, то $\ln(y/y_0)$ остается положительным и с течением времени возрастает. Следовательно, y со временем сделается весьма большим, даже если начальное отклонение y_0 очень мало. В этом случае система неустойчива. Отметим, что указанные здесь характеристики линейной системы с переменными коэффициентами, остающиеся всегда положительными или отрицательными, весьма похожи на соответственные характеристики систем с постоянными коэффициентами.



Ф и г. 2

Представляет интерес тот случай, когда k принимает как положительные, так и отрицательные значения. Пусть $k(at)$ сначала положительна, затем отрицательна, а потом опять положительна. Обозначим первый нуль функции k через $u_1 = at_1$, а второй — через $u_2 = at_2$. Тогда, согласно предыдущему, система должна быть неустойчивой в зоне изменения скорости от u_1 до u_2 (фиг. 2). Пусть $y_{\min}$ — минимальное значение y, а $y_{\max}$ — его максимальное значение. Тогда равенство (1.7) дает

$$\ln \frac{y_{\min}}{y_0} = -\frac{1}{a} \int_0^{u_1} k(\xi)\, d\xi \tag{1.8}$$

и

$$\ln \frac{y_{\max}}{y_0} = -\frac{1}{a} \int_0^{u_2} k(\xi)\, d\xi. \tag{1.9}$$

В технической задаче первостепенное значение имеет вопрос: как велико $y_{\max}$? Не становится ли $y_{\max}$ настолько большим, что система уже не сможет отвечать заданным требованиям? Чтобы ответить на этот вопрос, необходимо знать, помимо функционального выражения зависимости k от u, еще два параметра: величину a ускорения и величину y_0 начального отклонения. При любом заданном a величина $y_{\max}$ пропорциональна y_0. Но еще более важное свойство заключается в том, что при всяком заданном начальном отклонении максимальную величину $y_{\max}$ отклонения системы от равновесного состояния можно в значительной мере снизить путем увеличения ускорения a, как это следует из равенства (1.9). Последнее свойство означает, что нежелательные явления в системе можно сделать менее заметными при возможно более быстром прохождении «неустойчивой» зоны.

Таким образом, в более общем случае линейной системы с *переменными коэффициентами простой вопрос об устойчивости* не имеет определенного смысла. Большее значение имеет вопрос о критерии, выполнение которого обусловливало бы удовлетворительную работу системы при заданных начальных возмущениях и других условиях. В рассмотренной системе первого порядка таким критерием качества работы системы служит величина $y_{\max}$; заданное возмущение равно y_0, а другие условия сводятся к заданию ускорения a. Таким образом, переход от систем с постоянными коэффициентами к системам с переменными коэффициентами приводит к значительному изменению самого характера задачи[1]).

1.3. Нелинейные системы. Если в простой системе первого порядка, описываемой дифференциальным уравнением (1.1), упругая постоянная k является функцией от самого отклонения y системы, то это уравнение имеет

---

[1]) С этим положением нельзя полностью согласиться, так как и в случае систем с постоянными коэффициентами большой интерес представляет не только асимптотическая устойчивость, но и максимум отклонения, время затухания переходного процесса и другие условия, обычно называемые условиями качества регулирования. — *Прим. ред.*