

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ

На правах рукописи

ЦЮЙ ШОУ-ДЭ

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМЫ
АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ
ТОЛЩИНЫ ПОЛОСЫ ПРИ ХОЛОДНОЙ ПРОКАТКЕ

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель —
доктор технических наук, профессор
А. Я. ЛЕРНЕР

МОСКВА — 1960

Экспериментальные работы выполнены в Институте автоматики и телемеханики АН СССР.



В настоящее время регулирование по отклонению регулируемой величины является основным принципом построения автоматических систем. Однако в большинстве производственных процессов регулируемые объекты и их исполнительные механизмы обладают некоторой инерционностью, иногда даже с определенным запаздыванием, что существенно ухудшает условия работы системы автоматического регулирования, построенной по принципу обратной связи. Из-за ограничений, обусловливаемых требованием устойчивости работы системы или из-за того, что некоторые координаты системы и производные от них не могут или не должны превышать определенных значений, нам не всегда удастся обеспечить требуемое качество регулирования. Регулирование по возмущению обладает определенными преимуществами перед регулированием по отклонению в отношении быстроты реакции системы на изменение возмущающего воздействия.

Однако реальный регулируемый объект в любом технологическом процессе, вообще говоря, имеет сложную нелинейную характеристику, зависящую от ряда факторов. Поэтому, на самом деле, невозможно осуществить постоянную полную компенсацию при некоторой фиксированной настройке компенсаторов, работающих на основании контроля только главных возмущений. Ввиду этого, в системе регулирования по возмущению цепь обратной связи остается в качестве корректирующего устройства, которое обеспечивает высокую точность поддержания заданного значения регулируемой величины. Такие системы получили название «комбинированные системы регулирования» и в настоящее время уже нашли широкое применение.

Существенное улучшение комбинированных систем регулирования может быть достигнуто путем непрерывной, автоматической подстройки компенсатора в процессе работы системы. В ряде случаев этот способ оказывается весьма эффективным. В настоящее время разработаны разные устройства для фор-

мирования подстраивающего воздействия, задаваемого на компенсатор с тем, чтобы соответствующим образом изменить его параметры.

Среди параметров компенсатора, которые должны подвергаться непрерывной, автоматической подстройке в данном классе комбинированных систем регулирования, прежде всего следует отнести коэффициент усиления. Практика показывает, что при воздействии возмущения, изменяющегося с невысокой частотой, необходимо подстраивать в основном лишь коэффициент усиления компенсатора. Незначительное влияние, обусловливаемое неравенством постоянных времени и времени запаздывания двух каналов регулируемой системы, в общем случае также может быть устранено или уменьшено путем непрерывной подстройки соответствующих параметров компенсатора в процессе его работы.

В настоящей работе мы ограничиваемся рассмотрением случая, когда на регулируемый объект воздействует только одно главное возмущение, по которому следует осуществлять компенсацию, и изменение характеристики объекта можно в основном рассматривать как изменение его коэффициента усиления, причем остальные параметры — постоянные времени и время запаздывания — в процессе работы могут считаться неизменными. Поэтому подстройка компенсатора осуществляется только по его коэффициенту усиления и может быть выполнена таким образом: пусть коэффициент усиления компенсатора пропорционален значению интеграла

$$\varphi(t) = k \int_{t_0}^t x(\xi) \operatorname{Sgn} f(\xi) d\xi + \varphi(t_0) \quad (1)$$

или интеграла

$$\varphi(t) = k \int_{t_0}^t \operatorname{Sgn} x(\xi) \operatorname{Sgn} f(\xi) d\xi + \varphi(t_0) \quad (2)$$

где

$$\operatorname{Sgn} b = \begin{cases} +1 & b > 0 \\ 0 & \text{при } b = 0 \\ -1 & b < 0 \end{cases}$$

$f(t)$ — главное возмущение, воздействующее на объект;

$x(t)$ — отклонение регулируемой величины;

при этом условимся, что в нашем случае положительное возмущение вызывает положительное отклонение регулируемой величины, а компенсирующее воздействие стремится устранить его. Будем называть систему, в которой коэффициент усиления компенсатора пропорционален значению интеграла (1), системой регулирования по возмущению со скоростью подстройки компенсатора, пропорциональной отклонению регулируемой величины, а систему, в которой коэффициент усиления компенсатора пропорционален значению интеграла (2), системой регулирования по возмущению с постоянной скоростью подстройки компенсатора.

В рассматриваемых системах регулирования значения параметров компенсатора, подвергающихся непрерывной, автоматической подстройке, изменяются во времени, поэтому переходные процессы, происходящие в таких системах, описываются дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами, исследованию которых посвящено немало литературы по механике, но в теории автоматического регулирования данный вопрос еще почти не рассмотрен. В связи с построением нового класса системы регулирования, требуется разработать ряд теоретических вопросов, связанных с анализом и расчетом переходных процессов в рассматриваемых системах. Необходимо выяснить влияния инерционности и запаздывания регулируемого объекта и исполнительного механизма на устойчивость и качество работы системы, выбрать надлежащую структуру и оптимальные параметры системы и оценить динамическую погрешность системы, обусловливаемую разными, непрерывно изменяющимися возмущениями.

Настоящая работа посвящена теоретическому и экспериментальному исследованию данного класса комбинированных систем регулирования и применению таких систем к регулированию толщины полосы в процессе холодной прокатки.

Диссертация содержит пять глав.

В главе I изложены основные методы автоматического регулирования толщины полосы на станах холодной прокатки — метод перемещения нажимного устройства и метод изменения натяжения, приложенного к полосе — и приведено сравнение разработанных систем автоматического регулирования. Показано, что для первой клетки непрерывного стана и для реверсивного стана холодной прокатки, где полоса прокатывается с

автоматическим управлением нажимного устройства, системы регулирования, работающие по принципу отклонения регулируемой величины, не могут обеспечивать требуемую равномерность толщины холоднокатаной полосы из-за запаздывания измерения разнотолщинности прокатанной полосы на выходе из стана, обусловливаемого установкой измерителя толщины на некотором расстоянии от валков после клетки, и небольшого быстрого действия нажимного устройства стана, связанного с его значительной инерционностью. Считая колебания толщины подката главным возмущением, воздействующим на клетку прокатного стана, можно построить систему регулирования, работающую по принципу инвариантности регулируемой величины от возмущения. Колебания толщины подката измеряются на входе в клетку стана с необходимым предварением. Это позволяет формировать регулирующее воздействие на нажимное устройство заранее с учетом времени, требуемого для разгона его двигателей до нормальной скорости. Очевидно, такая система регулирования должна обеспечить более высокую равномерность толщины холоднокатаной полосы.

Во второй главе рассмотрены динамические свойства систем регулирования по возмущению со скоростью подстройки компенсатора, пропорциональной отклонению регулируемой величины. Допустим, что имеется регулируемый объект с передаточной функцией относительно возмущения $K_1 W_1(p)$ и передаточной функцией относительно компенсирующего воздействия $K_2 W_2(p)$, причем коэффициент усиления $K_1(t)$ представляет собой некоторую известную функцию времени. Из условий инвариантности определяется передаточная функция компенсатора.

$$KW_3(p) = \frac{K_1 W_1(p)}{K_2 W_2(p)}$$

т. е.

$$W_3(p) = \frac{W_1(p)}{W_2(p)} \quad (3)$$

$$K = \frac{K_1(t)}{K_2} = K_3 \varphi(t) \quad (4)$$

Отсюда следует, что компенсатор должен состоять из корректирующего элемента с передаточной функцией

$$K_3 W_3(p) = K_3 \frac{W_1(p)}{W_2(p)}$$

и усилителя с управляемым коэффициентом усиления, принимающим значение интеграла (1) или (2).

При этом переходный процесс в системе с пропорциональной отклонения скорости подстройки компенсатора описывается линейным дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами, порядок которого на единицу выше порядка уравнения объекта.

1) В случае безынерционного объекта переходный процесс получается в виде:

$$x(t) = [K_1(0) - K_2 K_3 \varphi(0)] f(t) e^{-\int_0^t K_2 K_3 |f(\xi)| d\xi} + f(t) e^{-\int_0^t K_2 K_3 |f(\xi)| d\xi} \int_0^t K_1(\xi) e^{\int_0^\xi K_2 K_3 |f(\eta)| d\eta} d\xi \quad (5)$$

Из первого члена правой части уравнения (5) очевидно, что данная система безусловно устойчива. Динамическая погрешность систем при непрерывном изменении коэффициента усиления объекта определяется вторым членом правой части уравнения.

2) В случае инерционного объекта общее решение дифференциального уравнения, описывающего переходный процесс в рассматриваемой системе, при произвольной функции времени $f(t)$ нельзя представить в виде элементарных функций. Поскольку численные методы решения таких дифференциальных уравнений весьма трудоемки, для исследования рассматриваемых систем целесообразно применять электронные моделирующие устройства.

Допустим, что система подвергается возмущению, имеющему произвольную форму, но ограниченному по модулю, т. е.

$$0 \leq |f(t)| \leq |f(t)|_{\max}$$

По методу Ляпунова найдены достаточные условия устойчивости

$$K < \frac{1}{K_2 K_3 T |f(t)|_{\max}} \quad (6)$$

для системы с инерционным объектом первого порядка, передаточная функция которого

$$W_1(p) = \frac{1}{T_p + 1}$$

и

$$K < \begin{cases} \frac{T_2(T_1^2 - \frac{1}{4}T_2^2)}{K_2 K_3 T_1^4 |f(t)|_{\max}} & \text{если } T_2 \leq \sqrt{2} T_1 \\ \frac{1}{K_2 K_3 T_2 |f(t)|_{\max}} & \text{если } T_2 \geq \sqrt{2} T_1 \end{cases} \quad (7)$$

для системы с инерционным объектом второго порядка, передаточная функция которого

$$W_1(p) = \frac{1}{T_1^2 p^2 + T_2 p + 1}$$

Область устойчивости системы, определяемая неравенствами (7) в пространстве параметров kT_1T_2 , заштрихована на рис. 1.

При воздействии возмущения, изменяющегося настолько медленно, что практически можно считать

$$f(t) = F - \text{const}$$

рассматриваемая система будет устойчива при любом значении k в случае инерционного объекта первого порядка и при значении

$$K < \frac{T_2}{K_2 K_3 T_1^2 |F|} \quad (8)$$

в случае инерционного объекта второго порядка.

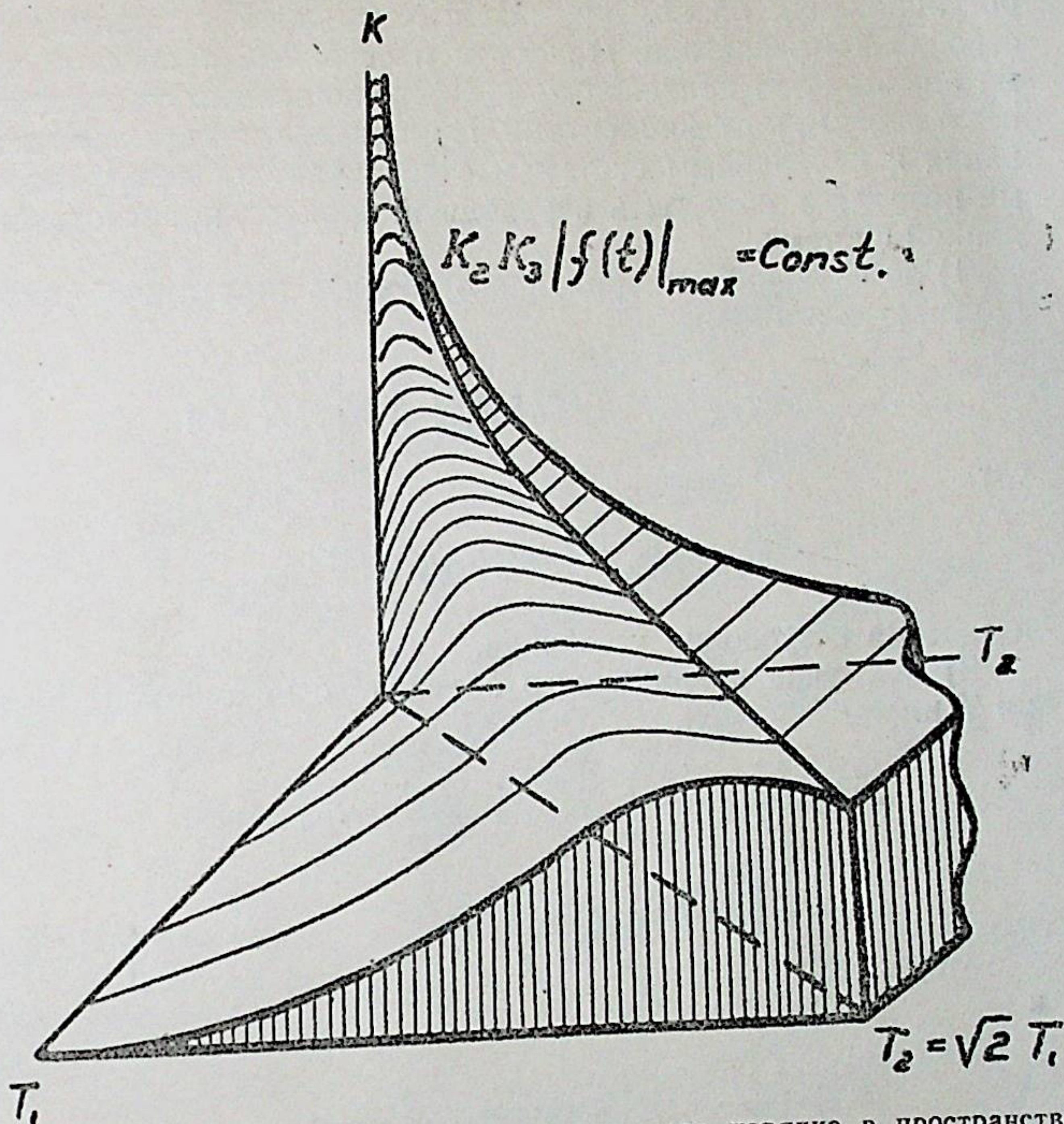


Рис. 1. Область устойчивости системы третьего порядка в пространстве параметров kT_1T_2 .

Можно показать, что все второстепенные возмущения, по которым отдельно не осуществляется компенсация, могут быть рассмотрены как изменения коэффициента усиления регулируемого объекта и приведены к эквивалентному суммарному изменению этого коэффициента усиления, с которым тесно связана динамическая погрешность системы. Чем больше скорость подстройки компенсатора, тем меньше динамическая погрешность системы. Для систем с инерционным регулируемым объектом следует при повышении скорости подстройки компенсатора учесть требование, предъявляемое к устойчивости всей системы.

В главе III рассматриваются динамические свойства систем регулирования по возмущению с постоянной скоростью подстройки компенсатора. При этом переходный процесс в системе описывается нелинейным дифференциальным уравнением с переменными коэффициентами. Применение метода припасовывания к нелинейным системам с переменными коэффициентами позволяет построить переходный процесс, происходящий в данной системе.

1) В случае безынерционного объекта переходный процесс получается в виде:

$$x(t) = f(t) [K_1(t) - \sigma K_2 K_3 t - K_2 K_3 \psi(0)] \quad (9)$$

где

$$\sigma = \text{Sgn } x(t) \cdot \text{Sgn } f(t)$$

и система безусловно устойчива.

2) В случае инерционного объекта с постоянной времени T имеем

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) + \left[\frac{1}{T} - \frac{\dot{f}(t)}{f(t)} \right] \dot{x}(t) - \frac{1}{T} \frac{f(t)}{f(t)} x(t) = \\ = \frac{1}{T} [K_1(t) - \sigma K_2 K_3] f(t) \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{при } \sigma = +1 \\ (10a) \end{array}$$

$$\begin{aligned} \ddot{x}(t) + \left[\frac{1}{T} - \frac{\dot{f}(t)}{f(t)} \right] \dot{x}(t) - \frac{1}{T} \frac{\dot{f}(t)}{f(t)} x(t) = \\ = \frac{1}{T} [K_1(t) + \sigma K_2 K_3] f(t) \end{aligned} \quad \begin{array}{l} \text{при } \sigma = -1 \\ (10b) \end{array}$$

Переходный процесс получается в виде:

$$\begin{aligned} x(t) = \int_0^t \frac{1}{T} [K_1(\xi) - \sigma K_2 K_3] d\xi e^{-\frac{t}{T}} \int_0^t f(\xi) e^{\frac{\xi}{T}} d\xi - \\ - e^{-\frac{t}{T}} \int_0^t \frac{1}{T} [K_1(\xi) + \sigma K_2 K_3] \int_0^{\xi} f(\eta) e^{\frac{\eta}{T}} d\eta d\xi \end{aligned} \quad (11)$$

Полученные результаты можно обобщить на системы высокого порядка.

Исследование рассматриваемых систем на электронном моделирующем устройстве показывает, что под воздействием переменного возмущения с практически встречаемой частотой изменения система с инерционным объектом первого порядка работает устойчиво при любом значении k . Система с инерционным объектом второго порядка структурно неустойчива. Параметры автоколебаний, возникающих в такой системе, тесно связаны с обуславливающим их возмущением. При синусоидальном изменении возмущения

$$f(t) = F_m \text{Sin}(\omega t + \theta)$$

колебания в системе имеют гармонически изменяющуюся амплитуду, как показано на рис. 2. Максимальная амплитуда и

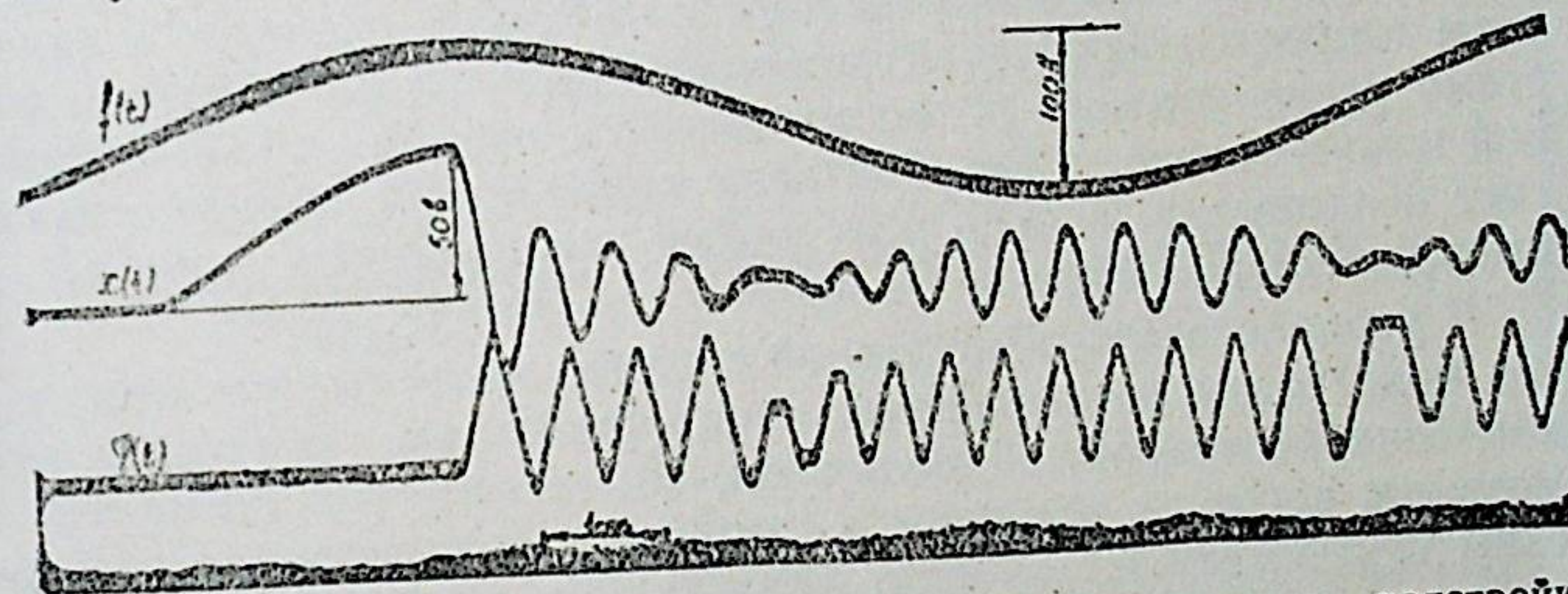


Рис. 2. Автоколебания в системе с постоянной скоростью подстройки компенсатора при воздействии синусоидального возмущения.

частота автоколебаний в основном определяется значениями амплитуды возмущения и параметрами системы, и мало зависит от частоты изменения возмущения. Частота модуляции колебаний равна частоте изменения возмущения, причем колебания не зависят от начальных условий системы.

Для стабилизации отмеченной выше системы необходимо добавить скоростную обратную связь.

Глава IV посвящена исследованию рассматриваемых систем при наличии запаздывания. Запаздывание может находиться на входе объекта, т. е. перед точкой приложения компенсирующего воздействия, или на выходе объекта, т. е. за точкой приложения компенсирующего воздействия. В первом слу-

чае влияние запаздывания объекта может быть скомпенсировано путем введения в компенсирующий канал блока запаздывания с временем задержки, равным времени запаздывания объекта. Во втором случае запаздывание находится за точкой приложения компенсирующего воздействия и охвачено обратной связью системы. При этом его влияние не может быть устранено и существенно ухудшает условия работы системы.

При наличии запаздывания на выходе объекта переходные процессы в рассматриваемых системах описываются линейным и нелинейным дифференциальными уравнениями с переменными коэффициентами и с запаздывающим аргументом. Эти уравнения могут быть решены «методом шагов» (для линейных систем) и методом припасовывания с учетом запаздывания переключения (для нелинейных систем).

С целью повышения допустимой скорости компенсатора и уменьшения динамической погрешности системы, обусловливаемой непрерывным изменением параметров объекта и наличием второстепенных возмущающих факторов разработана система регулирования по возмущению с импульсной подстройкой компенсатора, в которой цепь компенсации системы работает непрерывно, а цепь подстройки компенсатора работает в импульсном режиме.

В разработанной импульсной системе длительность импульсов подстройки компенсатора пропорциональна значению отклонения регулируемой величины, измеренному в дискретные моменты времени, полярность импульсов определяется логическим произведением знаков возмущения и обусловливаемого им отклонения регулируемой величины и, наконец, пауза между импульсами равна некоторому интервалу времени, обусловливаемому временем запаздывания и постоянной времени объекта. Переходные процессы в таких системах могут быть построены методом, подобным предложенному Я. З. Цыпкиным для расчета процессов в нелинейных системах прерывистого регулирования, но с учетом переменности параметров системы.

Исследование системы с импульсной подстройкой компенсатора на электронном моделирующем устройстве показало, что при наличии запаздывания на выходе объекта импульсная работа цепи подстройки существенно улучшает динамические свойства регулируемой системы.

В последней главе рассматривается вопрос о применении результатов исследования, полученных в предыдущих главах,

к регулированию толщины полосы в процессе холодной прокатки, в которой регулирующее воздействие на нажимное устройство стана вырабатывается на основании показаний измерителя толщины, установленного перед клетью стана. Требуемое значение коэффициента пропорциональности между величинами отклонения толщины подката и необходимого для его

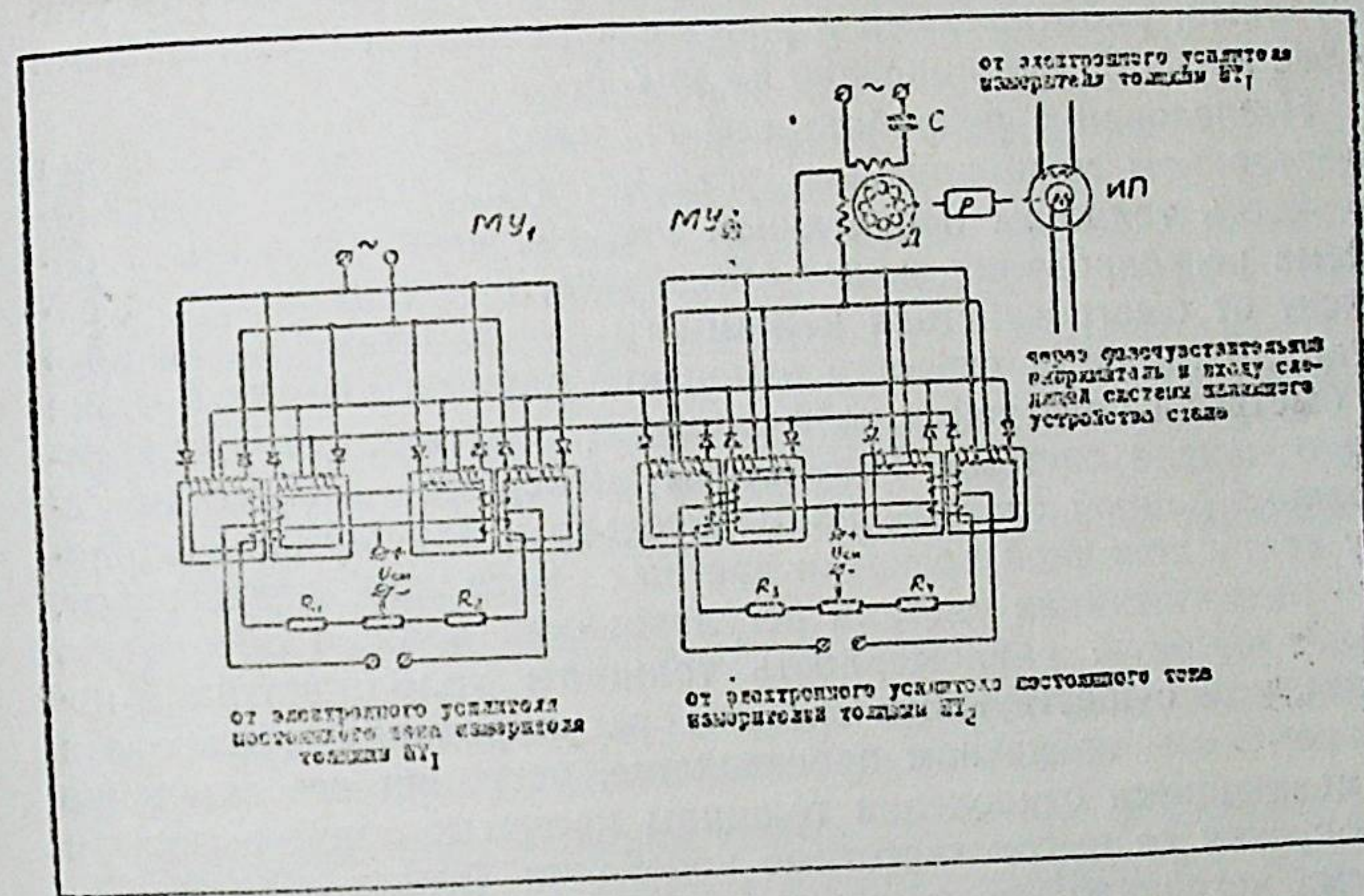


Рис. 3. Принципиальная схема устройства, автоматически подстраивающего коэффициент пропорциональности в системе автоматического регулирования толщины полосы по колебаниям толщины подката.

MU_1, MU_2 — двухтактные магнитные усилители.

D — двухфазовый асинхронный двигатель.

P — редуктор.

$ИП$ — линейный индукционный потенциометр.

$ИТ_1, ИТ_2$ — измерители толщины, установленные перед и за клетью стана.

компенсации перемещения валков клетки автоматически подстраивается по показаниям измерителя толщины, установленного за клетью стана. Ввиду запаздывания измерения разнотолщинности прокатанной полосы на выходе из стана вышеуказанная подстройка осуществляется при помощи импульсной системы.

В рассматриваемой системе регулирования важнейшее место занимает автоматически подстраивающее устройство, со-

стоящее из релейной схемы логического действия, интегратора и усилителя с управляемым коэффициентом усиления (умножительного звена). С целью повышения надежности действия эти устройства могут быть выполнены в виде бесконтактной электромеханической системы: двухфазовый асинхронный двигатель управляется двумя двухтактными магнитными усилителями, работающими в релейном режиме и соединенными в два каскада, как показано на рис. 3.

Исследование разработанной системы регулирования на электронном моделирующем устройстве показало, что равномерность толщины прокатанной полосы, которую данная система регулирования может обеспечить, в первую очередь зависит от быстродействия нажимного устройства прокатного стана, а также от скорости изменений параметров клетки стана и быстроты подстройки коэффициента усиления компенсирующего канала системы. Результаты экспериментального исследования данной системы применительно к одному реверсивному стану холодной прокатки цветных металлов показывают, что разработанная система регулирования должна обеспечить более высокую равномерность толщины холоднокатаной полосы, чем существующие системы регулирования толщины в современном прокатном производстве, устраняя все медленно изменяющиеся отклонения толщины прокатываемой полосы и пропуская ее высокочастотные колебания (выше 0,2 гц). Система устойчиво работает при воздействии помех и обеспечивает хорошее качество регулирования в случае, когда коэффициент усиления клетки стана изменяется по синусоидальному закону с амплитудой, составляющей 20% среднего значения, и частотой 0,05 гц. Положительный результат испытания доказывает удовлетворительную работоспособность разработанной системы регулирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основным содержанием диссертации являлись разработка и исследование комбинированной системы автоматического регулирования толщины полосы при холодной прокатке.

В основу настоящей работы положен метод построения одного класса комбинированных систем регулирования — систем регулирования по возмущению с автоматической подстройкой компенсатора в процессе работы, причем автоматическая подстройка компенсатора в таких случаях осуществляется по его

коэффициенту усиления при помощи простых элементов автоматики и вычислительной техники на основании сопоставления результатов контроля отклонения регулируемой величины с обуславливающим его возмущением, воздействующим на регулируемый объект.

Ввиду возможности широкого применения данного класса комбинированных систем автоматического регулирования для управления разными технологическими процессами в работе проведено исследование разработанных систем, регулируемые объекты которых имеют разные динамические характеристики. На основании исследования предложены три возможных варианта построения данного класса комбинированных систем регулирования — системы регулирования по возмущению с пропорциональной отклонению скоростью подстройки компенсатора, с постоянной скоростью подстройки компенсатора и с импульсной подстройкой компенсатора. Каждый из них может быть применен для автоматического регулирования определенных классов объектов.

В итоге получены следующие результаты:

1. Разработан принцип построения нового класса комбинированных систем автоматического регулирования.

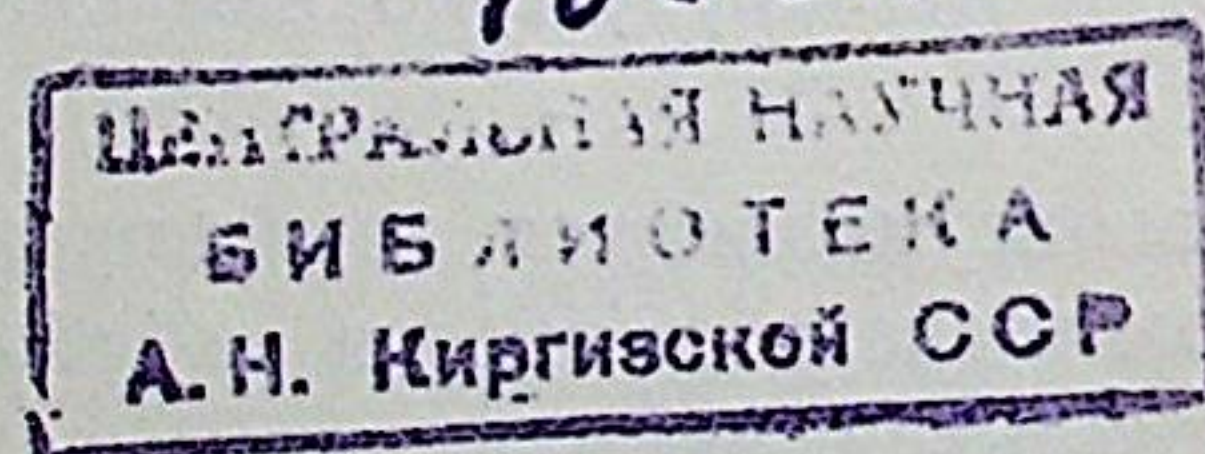
2. В связи с построением нового класса систем регулирования разработан метод анализа и расчета переходных процессов в подобных системах. Выявлены явления инерционности и запаздывания регулируемого объекта и исполнительного механизма на устойчивость и качество работы системы. Дан метод выбора надлежащей структуры и оптимальных параметров системы и метод оценки динамической погрешности системы, обуславливаемой разными, непрерывно изменяющимися возмущениями.

3. На основании вышеуказанного исследования и изучения особенностей технологического процесса холодной прокатки разработана принципиальная схема системы автоматического регулирования толщины полосы по колебаниям толщины подката для станов холодной прокатки.

4. Экспериментальное исследование разработанной системы, произведенное на электронном моделирующем устройстве, показало, что применение данной системы позволяет существенно уменьшить разнотолщинность холоднокатаной полосы.

5. Системы предложенной структуры могут быть использованы также для управления объектами, характеризующимися наличием главного контролируемого возмущения в условиях, когда свойства и характеристики объекта существенно изменяются.

169210



T-12345 От 7.10-60 г. Объем 1 п. л. Тир. 200 Зак. 5613

Типография «Красная звезда», В. Масловка, 73.