

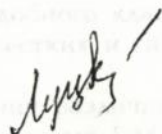
На правах рукописи

**Луцкова Татьяна Борисовна**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТИПОВЫХ ВНЕШНИХ  
ОБРАТНЫХ СВЯЗЕЙ НА УСТОЙЧИВОСТЬ  
ДВУХМАССОВЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ ВЯЗКИМ ТРЕНИЕМ**

05.09.03 - Электротехнические комплексы и системы, включая их  
управление и регулирование

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



ДВ 37.001

Диссертацией является рукопись

Работа выполнена на кафедре "Автоматизированные электромеханические системы" в Харьковском государственном политехническом университете.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
Клепиков Владимир Борисович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Жемеров Георгий Георгиевич  
кандидат технических наук  
Иванов Виктор Алексеевич

Ведущее предприятие: АО "Тяжпромэлектропроект"

Защита диссертации состоится " 2 " марта 1995 г.  
в 14<sup>30</sup> на заседании специализированного совета К.068.39.06 в  
Харьковском государственном политехническом университете.  
( 310002, Харьков-2, ГСП, ул. Фрунзе, 21 )

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ХГПУ.  
Автореферат разослан " 28 " января 1995 г.

ЛНБ України ім.В.Стефаника



00756172 (S)

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета

Гончаров Ю.П.

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Динамика электроприводов многих машин и механизмов определяет важнейшие технико-экономические показатели их работы: производительность, надежность, экономичность, качество технологического процесса.

Подавляющее большинство исследований динамических режимов электроприводов проводилось при допущениях, что момент сопротивления нагрузки не зависит от скорости, т.е.  $M_c = \text{const}$ . Между тем существует широкий класс механизмов, нагрузка которых представляет собой пару трения, при этом момент сопротивления является функцией скорости проскальзывания. Особенностью характеристики пары трения является наличие падающего участка, на котором увеличение скорости проскальзывания приводит к снижению момента сопротивления.

Механизмы с подобной нагрузкой можно рассматривать как системы с отрицательным вязким трением (ОВТ). При этом, если обычное вязкое трение обуславливает рассеивание колебательной энергии в системе, то отрицательное наоборот - ее накопление. Благодаря ОВТ в механической системе с упругой связью создаются условия возникновения расходящихся колебаний, которые из-за нелинейности характеристики трения завершаются установлением стационарной амплитуды, т.е. автоколебаниями, названными фрикционными.

Фрикционные автоколебания (АКФ) зафиксированы в нормальных или аномальных режимах работы ряда машин и механизмов: блюмингов, слябингов, непрерывных прокатных станов, рольгангов, механизмов передвижения кранов, поворота конверторов, рудничных и магистральных электровозов и многих других. Фрикционные автоколебания, как правило, сопровождаются целым рядом негативных явлений. Проведенные в Харьковском государственном политехническом университете на кафедре "Автоматизированные электромеханические системы" под руководством профессора Клепикова В.Б. исследования показали, что устранить АКФ можно, в определенных случаях, введением тех или иных типовых внешних обратных связей по основным координатам электропривода (ЭП), при условии обеспечения устойчивости системы на падающем участке характеристики трения. Однако, исследования в данном направлении давали частные решения при применении внешних связей по одной из координат. Представляется весьма актуальным разработать общую методику синтеза устойчивых электромеханических систем (ЭМС) с ОВТ, исходя из общих свойств систем подобного класса и используя возможности произвольных комбинаций жестких и гибких обратных связей по основным координатам ЭП.

**Цель работы:** теоретическое исследование влияния различных типовых обратных связей (ОС) на устойчивость двухмассовых ЭМС с ОВТ для выявления наиболее эффективных из них с точки зрения устранения автоколебательных режимов и разработка методики синтеза устойчивых систем данного класса.

Для достижения поставленной цели оказалось необходимым решить следующие основные задачи диссертационной работы:

- Сформулировать принципы и построить математическую модель, используемую при теоретических исследованиях и машинном эксперименте.

- Определить влияние каждого типа связи на вид характеристического полинома исследуемой ЭМС, описанного в обобщенных безразмерных параметрах.

- Установить общие свойства типовых ОС в 2-х массовой ЭМС с ОВТ.

- Разработать методики расчета границ устойчивости в пространстве обобщенных параметров и исследовать влияние обратных связей на области устойчивой работы.

- Разработать методики выбора типовых обратных связей и их комбинаций, а также разработать методики синтеза устойчивых ЭМС с ОВТ.

- Разработать математическую модель для расчета динамических режимов в исследуемых системах.

- Методом машинного эксперимента проверить правильность теоретических положений диссертации.

- Определить принципы построения систем устранения АКФ в электроприводах машин и механизмов.

**Методы исследования.** В диссертационной работе использовались топологический метод, методы общей теории дифференциальных уравнений, точные численные методы расчета на ЭВМ по линеаризованным математическим моделям и приближенные методы расчета Рунге-Кутты с применением ЭВМ, методы ТАУ и др.

**Научная новизна** полученных результатов состоит в следующем:

- сформулированы принципы построения математической модели и разработана универсальная математическая модель в обобщенных параметрах, с нормированными координатами, учитывающая действие любых комбинаций типовых обратных связей по основным координатам;

- установлены общие свойства типовых обратных связей с точки зрения их влияния на вид характеристического полинома, определяющего динамические свойства системы;

- разработана методика выбора наиболее эффективных комбинаций жестких и гибких обратных связей, обеспечивающих устойчивость двух-массовых ЭМС с ОВТ;

- подтверждена справедливость для систем с жесткими обратными связями теорем о секторах и расчетных диапазонах, ранее доказанных для разомкнутых систем;

- получены аналитические соотношения для расчета границ колебательной устойчивости методом D-разбиения, пределов расчетных диапазонов, границ секторов для систем, замкнутых жесткими обратными связями;

- получены аналитические соотношения для определения параметров статической механической характеристики замкнутой системы.

**Достоверность научных положений и результатов**, полученных в диссертационной работе, подтверждается обоснованностью допущений при разработке математической модели; соответствием математических моделей физическим представлениям о протекающих процессах и данным об АКФ в электроприводах машин и механизмов, известным из научной литературы; корректностью проведения расчетов, основанных на применении классических методов ТАУ и общепризнанных положений теории нелинейных электромеханических систем с отрицательным вязким трением.

**Практическая ценность.** Разработана инженерная методика для анализа динамических режимов в замкнутых электромеханических системах с отрицательным вязким трением. Разработана методика для выбора комбинаций обратных связей и расчетов их коэффициентов передач для устранения фрикционных автоколебаний. Разработан пакет программ для анализа и автоматизированного синтеза устойчивых двухмассовых электромеханических систем с отрицательным вязким трением, даны соответствующие рекомендации по его использованию.

**Реализация результатов работы.** Предложенные в работе принципы построения систем устранения АКФ используются при создании соответствующих устройств, разрабатываемых на кафедре АЭМС ХГПУ; инженерные методики синтеза устойчивых 2-х массовых ЭМС с ОВТ переданы в научно-исследовательские и проектные организации (АО "Тяжпромэлектропроект", НИИ НПО ХЭМЗ); теоретические положения работы используются чтении дисциплины "Теория электропривода" для студентов IV курса специальности 21.05 ХГПУ.

**Апробация работы.** Научные положения и результаты диссертационной работы доложены на 4 международных конференциях и 5 конференциях с международным участием.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ.

**Структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из наименований, включает 5 приложений, 5 рисунков, 2 таблицы.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность настоящего исследования и дана общая характеристика содержания работы по разделам.

**В первой главе** проведен анализ литературных источников по проблеме фрикционных автоколебаний в промышленных машинах и механизмах. Однако исследования проводились преимущественно учеными-механиками, а объектом рассмотрения являлись разомкнутые системы электроприводов, представленные двухмассовой моделью. Современные структуры электроприводов, работающих на фрикционную нагрузку и содержащие обратные связи изучены в недостаточной степени. В связи с чем отсутствуют инженерные методики анализа замкнутых двухмассовых систем электроприводов и рекомендации относительно применения обратных связей для устранения фрикционных автоколебаний.

По результатам анализа литературных источников в главе сделан вывод о целесообразности проведения научного исследования по использованию типовых внешних обратных связей для устранения АКФ. Под типовыми будем понимать жесткие и идеальные гибкие связи по основным координатам электропривода: моменту и скорости электродвигателя, упругому моменту и скорости рабочего органа.

С учетом ранее проведенных учеными-электромеханиками исследований двухмассовых ЭМС с ОБТ были определены цель и основные задачи диссертационной работы, приведенные в разделе "Общая характеристика работы" настоящего автореферата.

**Вторая глава** посвящена исследованию общих свойств типовых внешних обратных связей.

Объектом исследования является двухмассовая ЭМС с нелинейной фрикционной нагрузкой, механическая характеристика которой аппроксимирована прямолинейными участками.

Для того чтобы обеспечить достаточную наглядность, удобство в использовании получаемых соотношений и результатов исследования, свести к минимуму число параметров, определяющих характер динамического режима, проверить некоторые ранее полученные выводы, были сформулированы следующие принципы построения математической модели исследуемого класса электромеханических систем:

1. Математическая модель должна быть представлена в структурной форме.
2. Координаты системы должны быть безразмерными, нормированными.
3. Математическая модель должна отображать все возможные сочетания обратных связей, принятых в качестве типовых.
4. Передаточные функции звеньев должны быть выражены через безразмерные параметры, число которых должно быть минимально необходимым для однозначного определения динамических свойств системы.
5. В число обобщенных параметров должны входить использовавшиеся в более ранних исследованиях и общеупотребительные параметры:

$\gamma = (\mathfrak{J}_1 + \mathfrak{J}_2) / \mathfrak{J}_1$  - коэффициент инерции;

$T_{M1} = T_{M1} \Omega_{12}$  - относительная электромеханическая постоянная времени;

$\gamma = \Omega_{12}^2 / \Omega_{эм}$  - отношение квадратов частот недемпфированного механического и электромеханического резонансов;

$b = \beta_c / \beta$  - отношение жесткости статической механической характеристики нагрузки к модулю жесткости механической характеристики электропривода в точке статического равновесия.

В качестве базовых величин приняты:

$$M_\delta = M_n; \quad \omega_\delta = \omega_n; \quad U_\delta = \Phi \omega_n; \quad \beta_\delta = \frac{M_n}{\omega_n} \quad \begin{array}{l} M_n \text{ - номинальный момент} \\ \omega_n \text{ - номинальная скорость} \end{array}$$

Разработанная на основании вышесформулированных принципов математическая модель показана на рис.1.

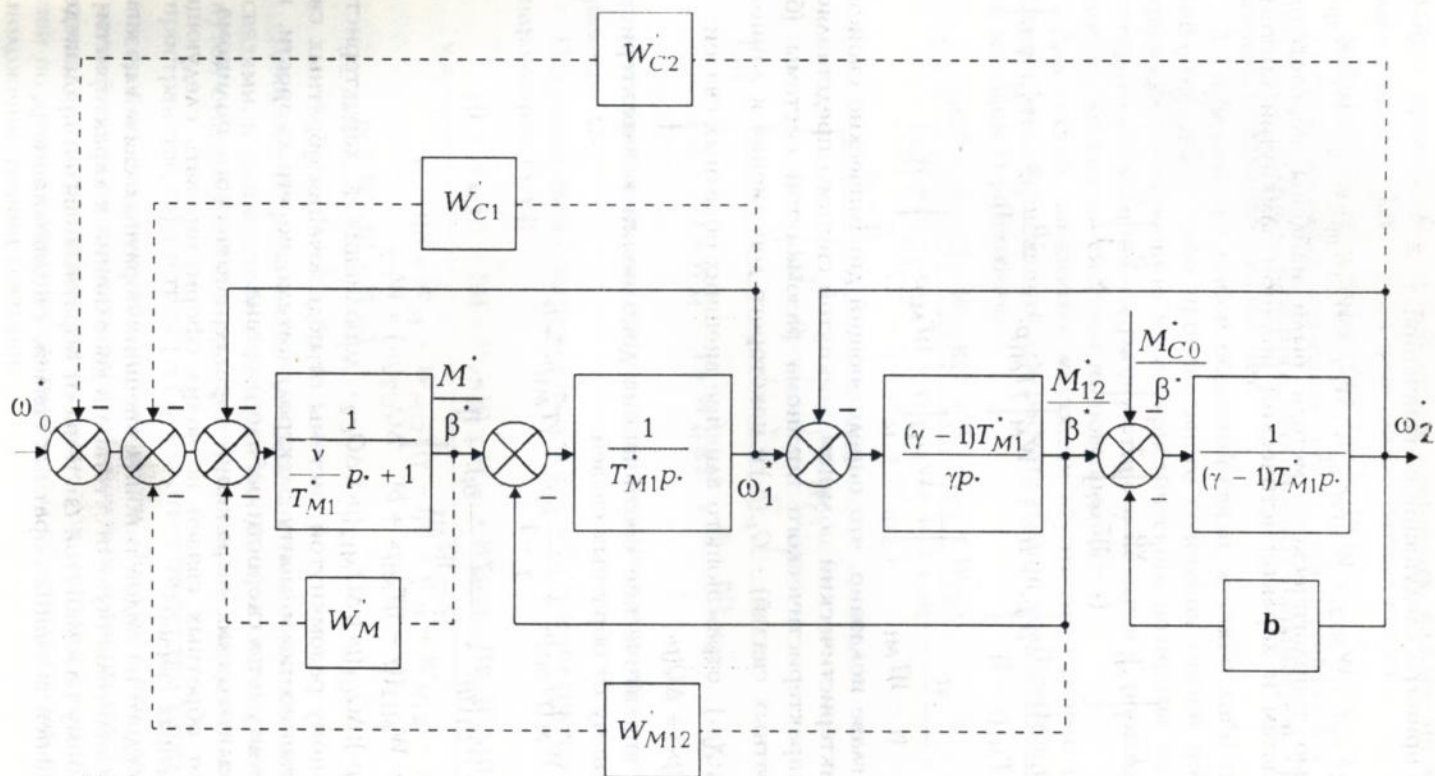


Рис. 1

В этой схеме приняты следующие обозначения:  $\chi_i = \frac{\chi_i}{\chi_{i8}}$ ;

$$W_M = W_M K_{np} \beta; W_{M12} = W_{M12} K_{np} \beta; W_{C1} = W_{C1} K_{np}; W_{C2} = W_{C2} K_{np};$$

С помощью топологического метода были найдены передаточная функция, а затем и характеристический полином замкнутой системы:

$$W(p) = \frac{1}{Q(p)}$$

$$Q(p) = \gamma v p^4 + \gamma \left[ T_{M1} + \frac{vb}{(\gamma - 1)T_{M1}} \right] p^3 + \gamma \left[ v + 1 + \frac{b}{v - 1} \right] p^2 +$$

$$+ \left[ \gamma T_{M1} + \frac{\gamma + v(\gamma - 1)}{T_{M1}(\gamma - 1)} b \right] p + b + 1 + W_M \left[ \gamma T_{M1} p^3 + \frac{\gamma b}{(\gamma - 1)} p^2 + \gamma T_{M1} + b \right] +$$

$$+ W_{C1} \left[ \gamma p^2 + \frac{\gamma b}{(\gamma - 1)T_{M1}} p + 1 \right] + W_{M12} \left[ (\gamma - 1)T_{M1} p + b \right] + W_{C2}$$

В данной главе показано, что определяющие динамические свойства системы характеристический полином замкнутой системы представляется суммой характеристического полинома разомкнутой системы (без внешних обратных связей) -  $Q_p(p)$  и некоторого дополнения к данному полиному -  $\Delta Q(p)$ , отражающего влияние внешних обратных связей:

$$Q(p) = Q_p(p) + \Delta Q(p)$$

Получены аналитические соотношения дополнений к характеристическому полиному от обратных связей:

$$\Delta Q_M(p) = W_M (\gamma T_{M1} p^3 + \frac{\gamma}{\gamma - 1} b p^2 + \gamma T_{M1} p + b)$$

$$\Delta Q_{C1}(p) = W_{C1} (\gamma p^2 + \frac{\gamma}{(\gamma - 1)T_{M1}} b p + 1)$$

$$\Delta Q_{M12}(p) = W_{M12} ((\gamma - 1)T_{M1} p + b), \quad \Delta Q_{C2}(p) = W_{C2}$$

где  $\Delta Q_M(p)$ ;  $\Delta Q_{C1}(p)$ ;  $\Delta Q_{M12}(p)$ ;  $\Delta Q_{C2}$  - дополнения к характеристическому полиному разомкнутой системы от подключения обратных связей соответственно по моменту электродвигателя, по его скорости, по упругому моменту и по скорости рабочего органа.

Анализ аналитических выражений характеристического полинома и дополнений от обратных связей позволил сформулировать следующие свойства обратных связей:

1. Влияние каждого из видов типовых внешних обратных связей независимое, о чем свидетельствует отсутствие в дополнении к характеристическому полиному разомкнутой системы от обратных связей произведений передач цепей внешних обратных связей, т.е. дополнение

$\Delta Q(p\cdot)$  представляет собой сумму слагаемых, каждое из которых отражает влияние одного вида внешних обратных связей:

$$\Delta Q(p\cdot) = \Delta Q_M(p\cdot) + \Delta Q_{M12}(p\cdot) + \Delta Q_{C2}(p\cdot)$$

2. Универсальной обратной связи, обеспечивающей устойчивость ЭМС при любых значениях обобщенных параметров среди типовых внешних обратных связей нет.

3. Подключение любой обратной связи, жесткой либо гибкой, по любой координате либо произвольного сочетания связей по координатам приводит к изменению характеристического полинома на величину некоторого дополнения, порядок которого не выше 4, поэтому порядок полинома замкнутой системы не повышается.

Для систем, замкнутых жесткими обратными связями получены аналитические соотношения для расчета границ колебательной устойчивости методом D-разбиения:

$$b = \frac{\gamma v \Omega^4 - \gamma(v+1+W_{C1}')\Omega^2 + (1+W_{C1}'+W_{C2}')}{\frac{\gamma(1+W_M')}{(\gamma-1)}\Omega^2 - (1+W_M'+W_{M12}')}$$

$$T_{M1}' = \sqrt{\frac{\left[ \Omega^2 - \left(1 - \frac{1}{\gamma} + \frac{1}{v} + \frac{W_{C1}'}{\gamma v}\right) \right] \gamma b}{(\gamma-1) \left[ 1 + W_M' - (1+W_M')\Omega^2 + \frac{(\gamma-1)W_{M12}'}{\gamma} \right]}}$$

и соотношения для пределов расчетных диапазонов переменного параметра  $\Omega$ .

Получены также выражения для расчета границ секторов в плоскости параметров  $[\gamma; v]$ :

$$v = \frac{\gamma(1+W_M') \left[ (\gamma-1)(1+W_{C1}')(1+W_M'+W_{M12}') - (1+W_M')(1+W_{C1}'+W_{C2}') \right]}{(\gamma-1)(1+W_M'+W_{M12}') \left[ (\gamma-1)(1+W_M'+W_{M12}') - \gamma(1+W_M') \right]}$$

$$v = \frac{(\gamma+W_{C1}')(1+W_M')}{W_{M12}'(\gamma-1) + (1+W_M')}$$

Доказана теорема о секторах для системы с жесткими обратными связями, в соответствии с которой для данных систем, как и для разомкнутой существует 4 сектора пространства  $\gamma; v$ , каждому из которых в

пространстве параметров  $[b, T_{M1}']$  соответствуют три характерные формы границ динамической устойчивости. Показано, что для жесткой обратной связи по моменту электродвигателя границы секторов полностью совпадают с границами для разомкнутой системы, а для обратных связей по другим координатам параметры обратных связей влияют на расположение границ секторов.

Анализ границ устойчивости показал, что жесткие ОС существенно влияют на ширину зоны устойчивости, не изменяя при этом формы границ устойчивости по сравнению с разомкнутой системой.

Что касается гибких ОС, то, как следует из выражений для дополнений от ОС, получить аналитические выражения для расчета границ по методу D-разбиения не представляется возможным. Поэтому было предложено исследовать расчетную область обобщенных параметров путем анализа корней характеристического полинома, рассчитываемых с помощью ЭВМ. Был разработан алгоритм и программа для решения данной задачи. Расчет основан на пошаговом исследовании расчетной области. В программе предусмотрено изменение шага счета и погрешности расчета, чем практически полностью исключается вероятность пропуска границ. Особенностью данного алгоритма является возможность расчета областей всех динамических режимов при подключении любой комбинации ОС.

**Третья глава** посвящена решению основной задачи - выработке правил и рекомендаций для выбора комбинаций ОС, обеспечивающих устойчивость ЭМС с ОБТ.

В характеристическом полиноме разомкнутой системы в каждом из коэффициентов, начиная с 3 степени имеется слагаемое, содержащее параметр  $\gamma$ . Именно эти слагаемые, поскольку они отрицательны, могут привести к отрицательности коэффициентов характеристического полинома, а, значит к потере системой устойчивости. Влияние обратных связей проявляется в изменении значений коэффициентов характеристического полинома замкнутой ЭМС при суммировании коэффициентов при одноименных степенях  $p$  характеристического уравнения разомкнутой системы и дополнений от обратных связей.

Результаты анализа влияния каждого из типов ОС на коэффициенты характеристического полинома представлены в таблицах 1 и 2. Таблица 1 отражает влияние гибких отрицательных связей на коэффициенты характеристического полинома, таблица 2 - жестких.

Коэффициент  $a_4 = \gamma v$  всегда положителен, поскольку положительны входящие в него параметры. Коэффициент  $a_0 = b + 1$  для реальных систем также всегда положителен, так как данное условие является условием статической устойчивости. Отрицательными в характеристическом полиноме разомкнутой системы могут быть коэффициенты  $a_3$ ,  $a_2$ ,  $a_1$  вследствие входящего в них параметра  $b$ . Таким образом, решая задачу синтеза устойчивой системы необходимо подбирать такой тип связи, который обеспечивал бы увеличение отрицательных коэффициентов, при этом значение коэффициента усиления звена обратной связи должно быть достаточным для обеспечения положительности соответствующего коэффициента характеристического полинома замкнутой системы.

Таблица 1.

коэффициент	a4	a3	a2	a1	a0
тип связи					
по скорости рабочего органа	-	-	-	↑	-
по упругому моменту	-	-	↑	↓	-
по скорости электродвигателя	-	↑	↓	↑	-
по току(моменту) электродвигателя	↑	↓	↑	↓	-

Таблица 2.

коэффициент	a4	a3	a2	a1	a0
тип связи					
по скорости рабочего органа	-	-	-	-	↑
по упругому моменту	-	-	-	↑	↓
по скорости электродвигателя	-	-	↑	↓	↑
по току(моменту) электродвигателя	-	↑	↓	↑	↓

Для обеспечения выполнения необходимого условия устойчивости предлагается следующая методика:

- по известным физическим параметрам электропривода рассчитываются обобщенные параметры, коэффициенты характеристического полинома разомкнутой системы и определяются какие из них отрицательные;

- используя таблицы 1,2 определяют, какие связи влияют на отрицательный коэффициент при максимальной степени оператора  $p$ ;

- с помощью выражений для дополнений к характеристическому полиному от данного типа связи рассчитывают коэффициент обратной связи  $\alpha_i$ , обеспечивающий положительность соответствующего отрицательного коэффициента характеристического полинома:

- рассчитываем коэффициенты характеристического полинома системы, замкнутой выбранной связью;

- действуя далее подобным образом выберем обратные связи и рассчитаем их коэффициенты передачи, обеспечив положительность всех коэффициентов  $a_i$ .

Допустим, что подключением тех или иных связей удалось добиться выполнения необходимого условия устойчивости ЭМС, то есть все коэффициенты характеристического полинома положительны. При этом, однако, условие достаточности может и не выполняться, то есть система остается неустойчивой.

Оценена степень влияния различных коэффициентов характеристического полинома на устойчивость системы. Достаточное условие устойчивости системы 4-го порядка по критерию Гурвица записывается, как известно следующим образом:  $a_1 a_2 a_3 - a_0 a_3^2 - a_4 a_1^2 > 0$

Из данного выражения видно, что коэффициенты  $a_1$  и  $a_3$  присутствуют в сомножителях как с положительными, так и с отрицательными знаками, т.е. изменение данных коэффициентов неоднозначно влияет на выполнение условия достаточности. Коэффициенты  $a_4$  и  $a_0$  в выражении присутствуют только с отрицательными знаками, и лишь коэффициент  $a_2$  только с положительным знаком. Это позволило сделать вывод о предпочтительности при выборе вида связей тех видов, которые увеличивают коэффициент  $a_2$  или уменьшают коэффициенты  $a_0$  и  $a_4$ .

Жесткого алгоритма синтеза устойчивых ЭМС с ОБТ путем выбора обратных связей получить не удастся, ввиду неоднозначности влияния связей на коэффициенты характеристического полинома. Однако, в каждом конкретном случае, используя разработанные рекомендации и программы задача обеспечения устойчивости может быть решена.

Основная идея синтеза заключается в том, чтобы применением той или иной связи либо их комбинации добиться такого смещения границы устойчивости в плоскости параметров  $[b; T_{M1}]$  по отношению к границе колебательной устойчивости разомкнутой системы, которое бы обеспечило местонахождение рабочей точки А в зоне устойчивости (рис.2).

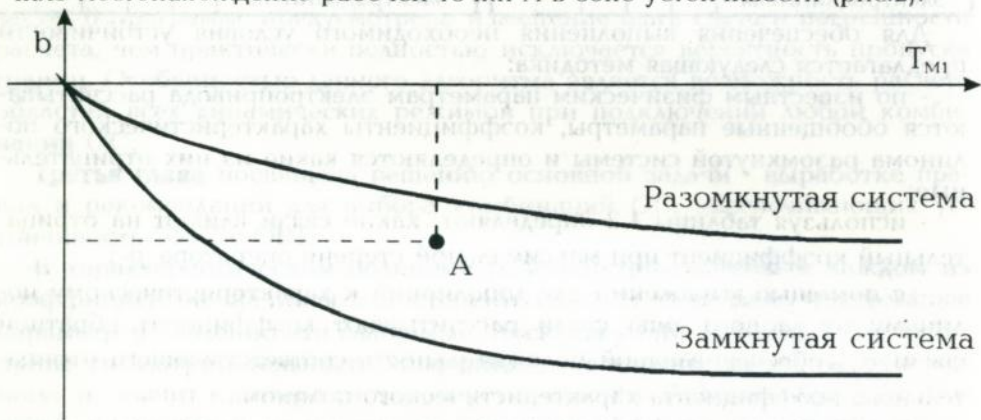


Рис. 2

Граница колебательной устойчивости может быть определена по критерию Гурвица:  $\bar{a}_1 \bar{a}_2 \bar{a}_3 - \bar{a}_0 \bar{a}_3^2 - \bar{a}_4 \bar{a}_1^2 > 0$

Обозначив  $\bar{a}_{04} = \bar{a}_0 / \bar{a}_4$ ;  $\bar{a}_{13} = \bar{a}_1 / \bar{a}_4$ ;  $\bar{a}_{24} = \bar{a}_2 / \bar{a}_4$  и выполнив несложные математически преобразования можно привести критерий Гурвица к следующему виду:  $\bar{a}_{04} = \bar{a}_{24} \bar{a}_{13} - \bar{a}_{13}^2$

Обобщенные параметры, связанные с физическими параметрами системы целесообразно подобрать так, чтобы при заданном  $T_{M1}^*$ , введение обратных связей обеспечило при требуемом значении  $b$  местоположение рабочей точки, гарантирующее динамическую устойчивость системы.

Для систем без жестких связей коэффициент  $\bar{a}_0$  напрямую связан с параметром  $b$ , а коэффициент  $\bar{a}_4$  постоянен при замыкании системы обратными связями (кроме гибкой связи по моменту электродвигателя).

Учитывая, что согласно необходимому условию устойчивости коэффициенты характеристического полинома должны быть положительными, можно утверждать, что максимально глубокая зона колебательной устойчивости по оси "b" имеет место при минимальном положительном значении коэффициента  $\bar{a}_{04}$ . Зависимость  $\bar{a}_{04} = f(\bar{a}_{13}, \bar{a}_{24})$  графически может быть интерпретирована поверхностью,

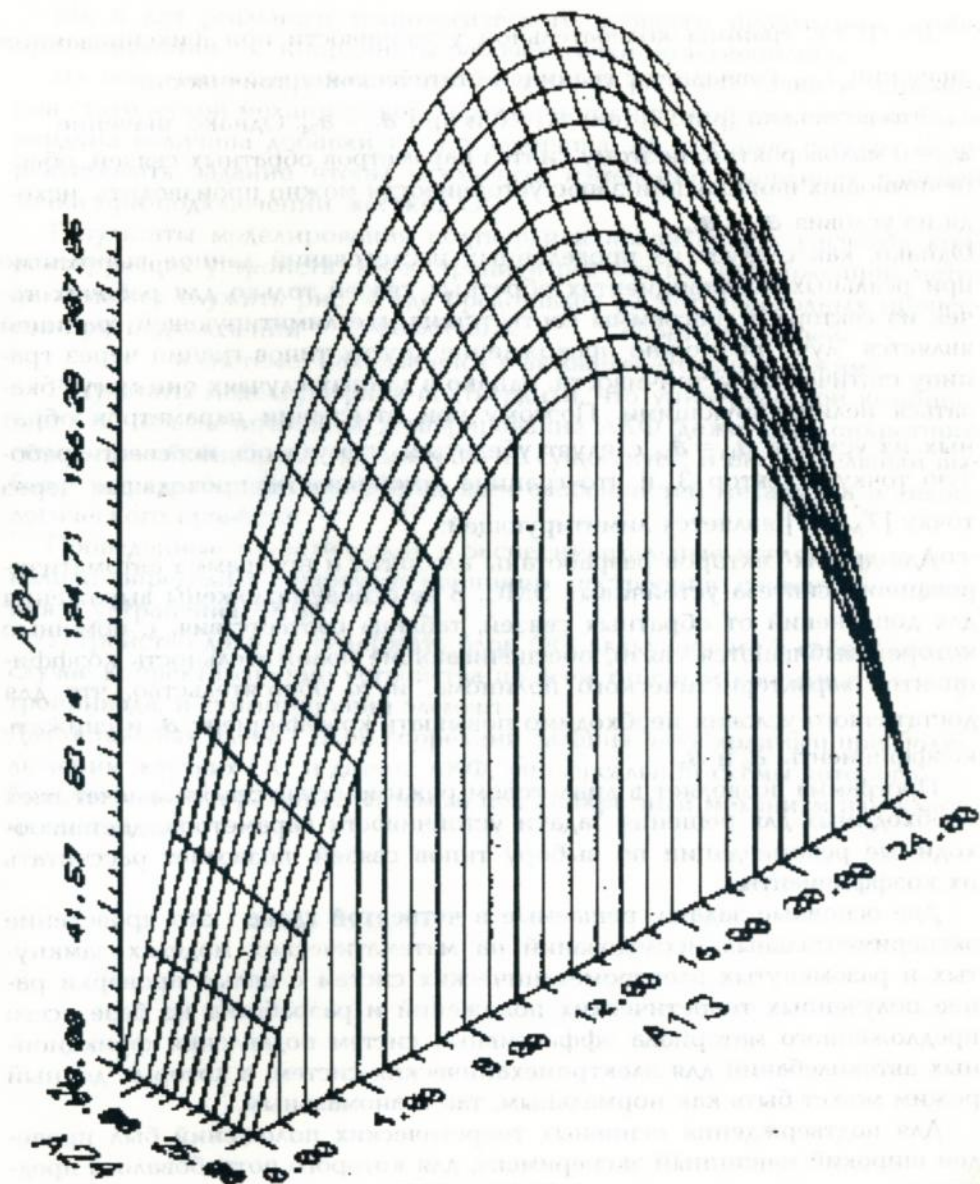


Рис. 3

тью, показанной на рис. 3. Исследование данной функции показало, что глобального экстремума у этой функции нет. Экстремум в сечении поверхности плоскостями, параллельными плоскости  $[a_{13}; a_{04}]$  соответствует не минимуму, а максимуму, поэтому очевидно, что наибольший запас устойчивости будет обеспечиваться при значениях  $a_{04}$  равных нулю. Данное условие аналогично равенству нулю свободного члена характеристического полинома, и для гибких связей равносильно выражению

$b = -1$ , т.е. граница колебательной устойчивости при фиксированном значении  $T_{M1}$  совпадает с границей статической устойчивости.

Это возможно (рис. 3) при  $a_{13} = 0$  и при  $a_{13} = a_{24}$ . Однако значение  $a_{13} = 0$  маловероятно, поэтому синтез параметров обратных связей, обеспечивающих наибольший запас устойчивости можно производить, исходя из условия  $a_{13} = a_{24}$ .

Однако, как следует из проведенных исследований данное выполнимо при реальных коэффициентах обратных связей только для рабочих точек из сектора 3 диаграммы соответствия, где лимитирующей границей является "луч". Возможно прохождение других типов границ через границу статической устойчивости, однако в данных случаях они могут оказаться нелимитирующими. Поэтому при отыскании параметров обратных из условия  $a_{13} = a_{24}$  следует убедиться, что удалось перевести рабочую точку в сектор 3, и что граница устойчивости, проходящая через точку  $[T_{M1}; -1]$  является лимитирующей.

Для других секторов разработаны алгоритм и программа автоматизированного синтеза устойчивых ЭМС. В ее основу положены выражения для дополнений от обратных связей, таблица соответствия, с помощью которой выбираются связи, обеспечивающие положительность коэффициентов характеристического полинома, и то обстоятельство, что для достаточного условия необходимо повышать коэффициент  $a_2$  и снижать коэффициенты  $a_0$  и  $a_4$ .

Программа позволяет в диалоговом режиме осуществлять расчет всех необходимых для решения задачи устойчивости параметров, дает необходимые рекомендации по выбору типов связей, позволяет рассчитать их коэффициенты.

Две основные задачи, решаемые в **четвертой главе** - это проведение экспериментальных исследований на математических моделях замкнутых и разомкнутых электромеханических систем с целью проверки ранее полученных теоретических положений и разработка на базе всего предложенного материала эффективных систем подавления фрикционных автоколебаний для электромеханических систем, в которых данный режим может быть как нормальным, так и аномальным.

Для подтверждения основных теоретических положений был проведен широкий машинный эксперимент, для которого потребовалось представить мат. модель замкнутой ЭМС с ОВТ в нормальной форме Коши. Характеристика нагрузки аппроксимирована прямолинейными участками.

Известно, что при подключении жестких ОС изменяются параметры статической механической характеристики ЭП, а именно: жесткость и скорость идеального холостого хода. Однако, как для моделирования,

так и для реального технологического процесса необходимо, чтобы при замыкании ОС координаты рабочей точки не изменились.

Из найденных выражений для координат рабочей точки и параметров статической механической характеристики замкнутой системы была найдена величина добавки к  $\delta$ , т.е. величина, на которую следует скорректировать задание чтобы исключить изменение координат рабочей точки при подключении жестких ОС.

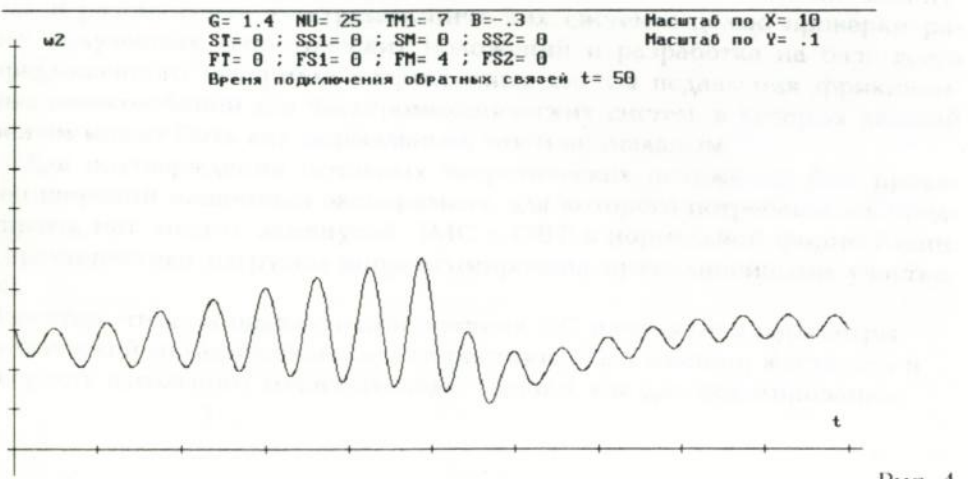
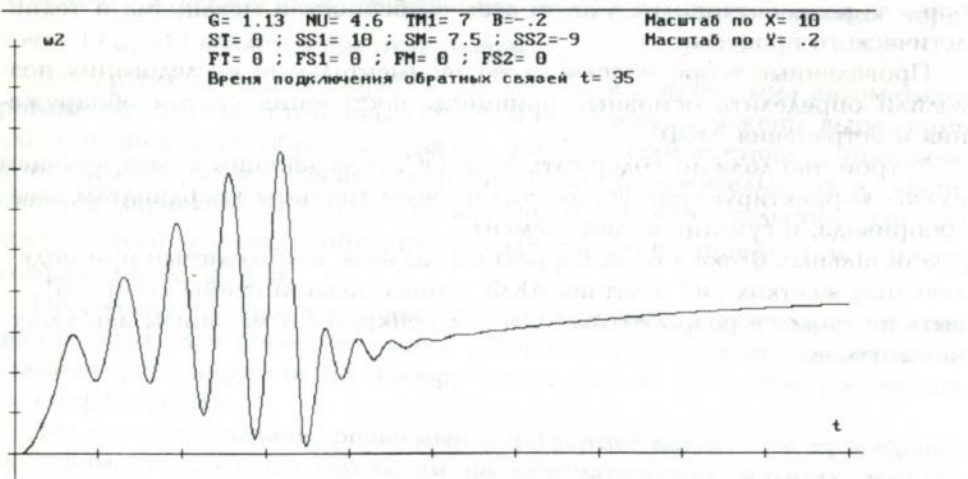
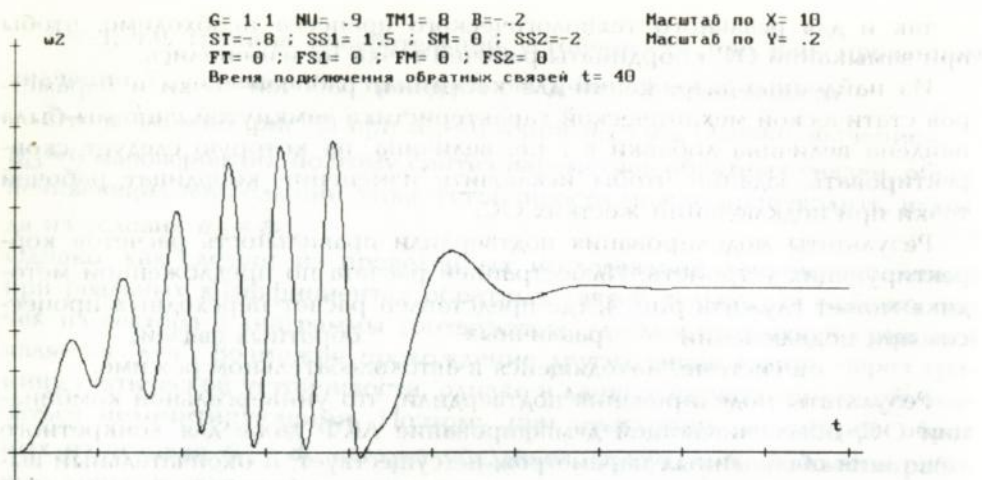
Результаты моделирования подтвердили правильность расчетов корректирующих устройств. Иллюстрацией расчета по предложенной методике может служить рис. 4, где представлен расчет переходных процессов при подключении различных обратных связей в системе, находящейся в автоколебательном режиме.

Результаты моделирования подтвердили, что универсальной комбинации ОС, обеспечивающей демпфирование АКФ даже для конкретного сочетания обобщенных параметров, не существует, и окончательный выбор - за разработчиком с учетом всех особенностей механизма и технологического процесса.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования позволили определить основные принципы построения систем обнаружения и устранения АКФ.

Устройство должно содержать блок ОС, включающий в себя в общем случае корректирующие устройства по всем типовым координатам электропривода, и суммирующий элемент.

Два остальных блока - блок коррекции задания, необходимый при подключении жестких ОС и датчик АКФ, универсальной схемы которого быть не может и разрабатываемый под конкретный механизм или класс механизмов.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные выводы и результаты заключаются в следующем.

1. Создана математическая модель замкнутой двухмассовой ЭМС с ОВТ в обобщенных параметрах с нормированными координатами, удобная для теоретических исследований и машинного эксперимента.
2. С использованием топологических методов получены выражения для дополнений к характеристическому полиному от типовых ОС и определены основные их свойства.
3. Доказана возможность применения теорем о расчетных диапазонах и секторах для ЭМС с жесткими обратными связями.
4. Получены аналитические зависимости для расчета границ динамической устойчивости ЭМС, замкнутой жесткими ОС.
5. Разработаны алгоритм и программа расчета областей динамических режимов при замыкании системы гибкими ОС.
6. Доказано, что в отличие от гибких, для жестких обратных связей форма границ устойчивости не изменяется.
7. Определены общие свойства всех типовых обратных связей с точки зрения влияния на демпфирующие свойства ЭП.
8. Разработаны рекомендации, правила, найдены аналитические зависимости для обеспечения устойчивости ЭМС с ОВТ путем использования корректирующих устройств.
9. Разработаны инженерные методики и программа автоматизированного выбора комбинаций ОС, обеспечивающих устойчивость ЭМС с фиксированным набором обобщенных параметров.
10. Создана математическая модель исследуемой системы, для расчетов переходных процессов.
11. Получены соотношения для расчета добавки для коррекции задания при использовании комбинаций ОС, содержащих жесткие ОС.
12. Проведен машинный эксперимент, подтвердивший правильность основных теоретических положений.
13. Сделан вывод об отсутствии универсальной комбинации ОС, обеспечивающей решение проблемы АКФ.
14. Предложены основная структура и сформулированы принципы построения систем устранения автоколебательных режимов.

### **По теме диссертации опубликованы следующие работы.**

1. Клепиков В.Б., Луцкова Т.Б. К синтезу устойчивых двухмассовых систем с отрицательным вязким трением // Вестник ХПИ. Электромеханическое строение и автоматизация промышленных предприятий.- Вып.17, N5, Харьков, 1992.
2. Klepikov V.B., Lutskova T.B. Some Properties of the Type External Feed-backs of the Electromechanical System with Negative viscous friction, VI International Congress & Exhibition ENVIRO - 2000, November 20-21, 1992, New Delhi

3. Klepikov V.B., Osichev A.V., Pogorelov S.V., Cherenov A.N., Lutskova T.B. Reduction of the Roll-Grinding Machine Tool Vibration by Electric Drive Resources // Computing Technology Meeting "microCAD-SYSTEM'93", Miscolec, March, 1993

4. Клепиков В.Б., Луцкова Т.Б. К синтезу устойчивых электромеханических систем с отрицательным вязким трением //Тез. докладов международной научно-технической конференции "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье". 8-13 июня 1993 г. - Харьков, Мишкольц: ХПИ, МУ, Часть III, с.72-75.

5. Клепиков В.Б., Осичев А.В., Погорелов С.В., Черенов А.Н., Луцкова Т.Б. Снижение вибраций в вальцешлифовальном станке средствами электропривода //Тез. докладов международной научно-технической конференции "Компьютер: наука, техника, технология, здоровье". 8-13 июня 1993 г. - Харьков, Мишкольц: ХПИ, МУ, Часть II,

6. Клепиков В.Б., Луцкова Т.Б. Обеспечение динамической устойчивости электроприводов с нагрузкой типа пара трения //Печатные материалы научно-технической конференции с международным участием "Проблемы подъемно-транспортной техники". Секция 3. Алушта, 1993.

7. Klepikov V.B., Lutskova T.B. Dynamical Stability Providing of on Electric Drive with Negative Viscous Friction. VII International Congress & Exhibition Communication, Informatics & Economic Development, New Delhi, 1993

8. Klepikov V.B., Lutskova T.B. About Choice of Feed-back Type for Stability Providing of Electromechanical Systems with Negative Viscous Friction & International Conference. Results of Scientific cooperation between KhPU and University of Miscolec, March, 1994

9. Клепиков В.Б., Луцкова Т.Б. Свойства обратных связей в электромеханических системах с отрицательным вязким трением // I международная конференция по электромеханике и электротехнологии МКЭЭ-94, тезисы докладов, ч.II стр.17, Суздаль, 1994.

10. Клепиков В.Б., Осичев А.В., Луцкова Т.Б., Абдульмалик Джамаль Салах. Математическое моделирование двухмассовой электромеханической системы с фрикционной нагрузкой //Печатные материалы научно-технической конференции с международным участием "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика."-Харьков, 1994, с.22-24

Луцькова Т.Б. "Дослідження впливу типових зовнішніх зв'язків на стійкість двомасових електромеханічних систем з негативним в'язким тертям". Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.09.03 - електротехнічні комплекси і системи, включаючи їх управління і регулювання.

Розглядаються питання, зв'язані з рішенням проблеми фрикційних автоколивань в електроприводах машин та механізмів. Запропоновано вирішити цю проблему засобом введення в систему типових зовнішніх зворотних зв'язків. Створена математична модель системи, що досліджується. Розроблен математичний апарат для аналізу динамічних властивостей замкнутих систем електроприводів з фрикційним навантаженням. Розроблені алгоритми та програми, а також методики вибору комбінацій зворотних зв'язків та розрахунку їх коефіцієнтів передач, що забезпечують стійкість електромеханічної системи на падаючій частці механічної характеристики навантаження. Проведена експериментальна перевірка основних теоретичних положень. Запропоновані принципи побудування систем усунення автоколивальних режимів.

Ключові слова: фрикционные автоколебания; обратные связи; динамические режимы; характеристика трения; устойчивость.

Lutskova T.B. Investigation of Influence of Type External Feed-backs on Stability of Two-mass Electromechanical Systems with Negative Viscous Friction

Thesis deals with decision of friction self-sustained oscillations problem of machines and mechanisms electric drives. It's proposed to solve this problem by using type external feed-backs. Mathematic model of investigated systems was worked out. Mathematic apparatus for analysis of dynamical properties of closed electric drives systems with friction load was founded. Algorithms and programs, methods of external feed-backs combinations choice and calculation of transmissions coefficients for stability providing of electromechanical systems on dropping part of load mechanical characteristic were worked out. Experimental verification corroborated rightness of based theoretical thesis. Principles of building of self-sustained oscillations elimination systems were proposed.

*Lutskova*

456637

