МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Воронежский государственный технический университет

Кафедра автоматики и информатики в технических системах

10-2004

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам по курсу
"Моделирование электропривода"
для студентов специальности 180400
“Электропривод и автоматика промышленных
установок и технологических комплексов”
очной формы обучения

Воронеж 2004

Составители: канд. техн. наук, проф. Фролов Ю.М., канд. техн. наук, ст. преп. Романов А.В.

УДК 62-83.681.513

Методические указания к лабораторным работам по курсу "Моделирование электропривода" для студентов специальности 180400 “Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов” очной формы обучения. / Воронеж. гос. техн. у-нт. Сост. Ю.М. Фролов, А.В. Романов. Воронеж, 2004. 25 с.

В методических указаниях изложены требования и рекомендации по выполнению лабораторных работ, их объем и содержание, программа и методика выполнения лабораторных работ.

Описание каждой лабораторной работы содержит общие теоретические положения и рекомендации, задание для самостоятельной работы студентов, требования к содержанию отчета, контрольные вопросы для самопроверки. Продолжительность лабораторной работы – 8 часов, домашняя подготовка – 4 часа.

Методические указания предназначены для студентов четвертого курса специальности 180400 “Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов” очной формы обучения.

Табл. 1 Ил. 3 Библиограф.: 11 назв.

Рецензент канд. техн. наук, доц. Ю.С. Слепокуров

Ответственный за выпуск зав. кафедрой
д-р техн. наук, проф. В.Л. Бурковский

Печатается по решению редакционно-издательского совета Воронежского государственного технического университета.

© Воронежский государственный
технический университет, 2004

В В Е Д Е Н И Е

Курс лабораторных работ по дисциплине "Моделирование электропривода" предназначен для закрепления теоретического материала, приобретения навыков разработки математических моделей технических систем, получения временных и частотных характеристик, проведения сравнительного анализа адекватности используемой математической модели реальному техническому объекту.

Курс лабораторных работ служит практической и теоретической основой для последующего изучения таких дисциплин как «Автоматизированное проектирование электроприводов», «Системы управления электроприводами».

Список основной и дополнительной литературы приведен в конце данных методических указаний.

Для выполнения лабораторных работ группа студентов должна быть разделена на подгруппы. В одной подгруппе не должно быть более 15 человек. В составе подгруппы студенты делятся на бригады (одна бригада – не более 2 человек). Студенты выполняют лабораторные работы побригадно по вариантам (табл. 1). Номер бригады является номером варианта. Работы должны выполнятся строго по графику выполнения лабораторных работ, который составляется для каждой подгруппы в начале семестра. Выполнению каждой лабораторной работы предшествует подготовительная работа, изложенная в задании для домашней подготовки. Бригада студентов получает допуск к лабораторной работе только при выполнении этого задания. После выполнения каждой лабораторной работы составляется один отчет на бригаду, на основании которого происходит защита выполненной работы.

В табл. 1 приведены варианты для выполнения лабораторных работ. Приняты обозначения:

- J_2, J_3 – моменты инерции второй и третей масс, кг·м^2;
- C_{12}, C_{23} – упругость между первой и второй и между второй и третьей массами соответственно, Н·м;
- λ_{12} , λ_{23} – логарифмический декремент демпфирования колебаний между соответствующими массами;
- M_c – статический момент нагрузки, Н;
- ε_{max} – максимально допустимое технологическое ускорение, с$^{-2}$;
- ω – выходная скорость механизма, с$^{-1}$.

Таблица 1.

Вариант №	Параметры								
	J_2	J_3	C_{12}	C_{23}	λ_{12}	λ_{23}	M_c	ε_{max}	ω
1.	0.1	0.6	100	125	0.1	0.1	20	50	105
2.	0.2	0.5	125	150	0.15	0.15	40	50	105
3.	0.3	0.4	150	100	0.2	0.2	80	50	105
4.	0.1	0.7	150	125	0.1	0.1	20	75	157
5.	0.2	0.5	175	150	0.2	0.2	30	75	157
6.	0.3	0.3	200	175	0.3	0.3	40	75	157
7.	0.15	0.8	175	200	0.1	0.15	50	100	230
8.	0.2	0.9	200	150	0.2	0.2	75	100	230
9.	0.25	1.0	150	125	0.3	0.25	100	100	230
10.	0.3	1.1	250	200	0.15	0.1	30	125	262
11.	0.4	1.3	275	225	0.2	0.15	60	125	262
12.	0.5	1.4	300	250	0.25	0.3	90	125	262
13.	0.35	0.9	250	300	0.15	0.25	15	150	314
14.	0.45	1.2	225	250	0.25	0.2	30	150	314
15.	0.55	1.5	275	225	0.3	0.15	45	150	314

Курс выполнения лабораторных работ предполагает в качестве прикладного программного обеспечения использование комплекта программных средств MATLAB (версия 6.5) + Simulink + пакеты расширения [1, 10, 11]. Необходимые для выполнения лабораторных работ расчеты также рекомендуется выполнять с использованием прикладной программы MathCAD.

При анализе динамики необходимо выявлять соответствие частотных и временных характеристик, физическую сущность влияния варьируемых параметров на динамику системы, принципиальные отличия аналогичных графиков для разномассовых систем с объяснением физических причин выявленных отличий.

В сети Internet по адресу http://www.aits-mep.narod.ru находится электронный сайт, являющейся информационной поддержкой дисциплины "Моделирование электропривода". На этом сайте студенты, изучающие данный учебный курс, могут найти учебно-методические материалы, в частности, электронные версии учебных пособий [1, 5, 11] и данных методических указаний по выполнению лабораторных работ.

Лабораторная работа № 1

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Цель работы: Исследование динамических свойств механической части электропривода на примере трехмассовых и эквивалентных им двухмассовых расчетных схем.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Механическая часть реального электропривода представляет собой многомассовую упругую механическую систему, в которой наличие упругих связей накладывает определенные особенности на протекание в ней динамических процессов, отличающихся от процессов в одномассовом звене.

Для описания динамических свойств механической системы наиболее универсальными являются уравнения движения в обобщенных координатах, то есть уравнения Лагранжа [2]

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial W_k}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial W_k}{\partial q_i} = Q_i \ , \qquad (1)$$

где $W_к$ – запас кинетической энергии системы, выраженный через обобщенные координаты q_i (угловые и линейные перемещения) и обобщенные скорости $\dot{q}_i$ (угловые или линейные скорости);

$Q_i = \delta A_i/\delta q_i$ – обобщенная сила (момент или усилие), определяемая суммой элементарных работ δA_i всех действующих сил на возможном перемещении δq_i.

Число обобщенных координат, как и число уравнений Лагранжа, описывающих динамические характеристики объекта моделирования, соответствует числу степеней свободы объекта, в данном случае – механической системы.

При наличии в кинематической схеме механический части электропривода передаточных устройств, обеспечивающих согласование форм или скоростей движения исполнительного органа с двигателем, целесообразно привести переменные и параметры механической системы к валу двигателя [2]. Это позволяет получить расчетную схему, дающую наглядное представление о реальном влиянии действующих масс, жесткостей на динамические свойства механический части электропривода (МЧ ЭП). Кроме того, в этом случае

значительно проще составить систему уравнений Лагранжа, представляющую математическую модель исследуемого объекта.

В лабораторной работе предлагается выполнить исследование динамики на примере расчетной схемы (рис. 1), в которой обобщенными координатами являются угловые перемещения масс φ_1, φ_2, φ_3, и соответствующие им обобщенные угловые скорости ω_1, ω_2, ω_3.

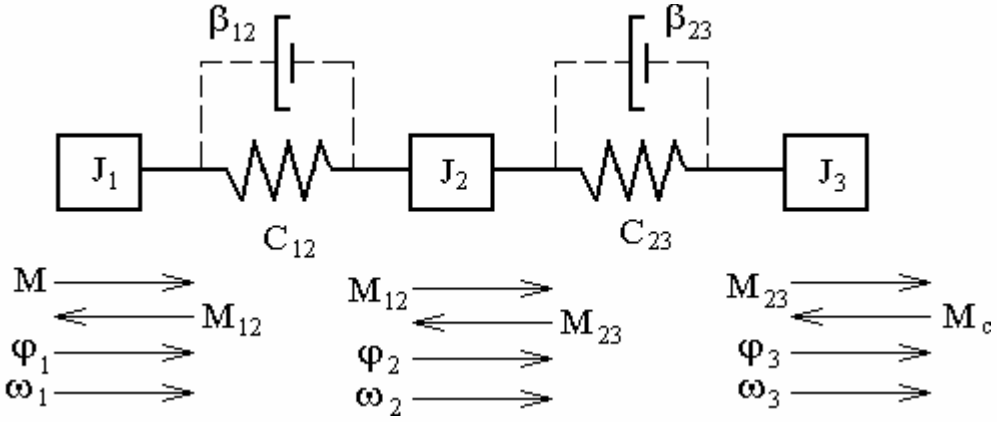

Рис. 1. Расчетная схема трехмассовой последовательной упругой системы

В расчетной схеме статические моменты, обусловленные силами трения в элементах кинематической цепи первой (J_1) и второй (J_2) масс, ввиду их малости приняты равными нулю. В расчетной схеме действуют: M – момент электродвигателя (ЭД), M_{12}, M_{23} – моменты упругой деформации, M_c – статический момент исполнительного органа рабочей машины. Кроме того, на схеме приведены: C_{12}, C_{23} – жесткости упругих связей между массами, β_{12}, β_{23} – коэффициенты внутреннего вязкого трения. Согласно расчетной схеме с помощью уравнений Лагранжа по методике, изложенной в [2, 3], составляется система дифференциальных уравнений, которая является основой для составления структурной схемы системы и исследования динамических характеристик с помощью прикладных программ.

На практике чаще используют эквивалентную расчетную схему двухмассовой упругой системы (рис. 2), к которой приводят трехмассовую механическую систему. Правила приведения изложены в [2, 3]. Однако при этом переходе теряются некоторые особенности исследуемого объекта, на что следует обратить внимание при моделировании трехмассовой и эквивалентной ей двухмассовой механических систем [3].

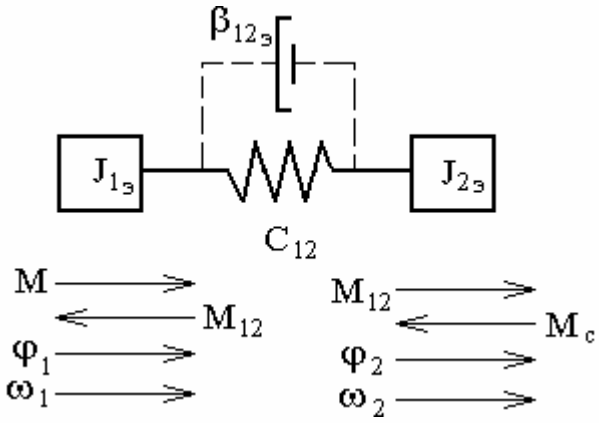

Рис. 2. Эквивалентная расчетная схема двухмассовой упругой механической системы

2. ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОМАШНЕЙ ПОДГОТОВКИ

1. Изучить возможности и правила работы с комплектом программных средств MATLAB (версия 6.5) + Simulink + пакеты расширения [1, 10, 11].
2. Выбрать двигатель постоянного тока независимого возбуждения для заданного механизма с учетом обеспечения допустимых технологических ускорений, руководствуясь данными табл. 1.
3. Составить математическое описание и структурную схему заданного механизма в абсолютных величинах.
4. Привести трехмассовую механическую систему к эквивалентной двухмассовой и составить для нее математическое описание и структурную схему в абсолютных единицах.
5. Ознакомиться с направленным нормированием структурных схем МЧ ЭП при наличии упругости [4, 5].
6. Осуществить направленное нормирование исходных структурных схем, составленных в п. 3 и п. 4, с целью получения нормированных моделей трех- и двухмассовой систем с упругостью первого рода.
7. Провести анализ устойчивости трех- и двухмассовых систем:

а) проанализировать с помощью метода Гурвица устойчивость двухмассовой системы с учетом (*нечетный* номер варианта бригады) и без учета (*четный* номер варианта бригады) сил внешнего диссипативного трения (при анализе устойчивости рекомендуется использовать понятие коэффициента соотношения масс $\gamma = (J_1 + J_2)/J_1$);

б) для бригад, имеющих *четный* номер варианта, необходимо проанализировать устойчивость трехмассовой системы, используя метод постороения корневых годографов при вариации параметров J_1, J_3, C_{12}, β_{23};

в) для бригад, имеющих *нечетный* номер варианта, необходимо проанализировать устойчивость трехмассовой системы, используя метод постороения корневых годографов при вариации параметров J_2, C_{23}, β_{12}.

3. ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Набрать структурную схему трехмассовой механической части с последовательной расчетной схемой.

2. Снять частотные и временные характеристики $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$, $\omega_3(t)$, $M_{12}(t)$, $M_{23}(t)$ при ступенчатом управляющем воздействии и зафиксировать передаточные функции по этим каналам.

3. Набрать структурную схему эквивалентной двухмассовой механической части и снять частотные и временные характеристики $\omega_1(t)$, $\omega_2(t)$, $M_{12}(t)$, при ступенчатом управляющем воздействии и зафиксировать передаточные функции по этим каналам.

4. Набрать нормированную модель трехмассовой системы с упругостью и выполнить работы, аналогичные п. 2.

5. Набрать нормированную модель двухмассовой системы с упругостью и выполнить работы, аналогичные п. 3.

6. Выполнить сравнительный анализ частотных и временных характеристик трех- и двухмассовой механических систем и выявить отличительные признаки между ними.

7. Осуществить варьирование параметров двухмассовой механической системы и выявить их влияние на частотные и временные характеристики объекта моделирования, изменяя параметры МЧ ЭП J_2 и C_{12} изменить в пределах $(1..3)J_2$ и $(0.5...l.5)C_{12}$ при числе исследуемых значений не менее трех.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Цель работы.
2. Выбор мощности и параметры выбранного электродигателя постоянного тока независимого возбуждения.

3. Расчетную и структурную схемы (математическую модель) трехмассовой механической системы в абсолютных и нормированных единицах.

4. Частотные и временные характеристики трехмассовой модели механической системы. Анализ характеристик и выводы.

5. Приведение параметров трехмассовой расчетной схемы к эквивалентной двухмассовой. Математические модели двухмассовой механической системы в абсолютных и нормированных единицах.

6. Частотные и временные характеристики двухмассовой эквивалентной механической системы. Анализ характеристик и выводы.

7. Сравнительный анализ частотных и временных характеристик трех- и двухмассовых систем, отличительные признаки.

8. Исследование влияния параметров двухмассовой механической системы на её частотные и временные характеристики.

9. Анализ устойчивости системы согласно варианту.

10. Выводы по работе.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Назначение, основные возможности и область применения программных средств MATLAB, Simulink и пакетов расширения.

2. Исследования динамики систем автоматического управления, методы и принципы исследования.

3. Назначение, виды и отличительные признаки расчетных схем механической части электропривода.

4. Понятие о математической модели объекта; требования, предъявляемые к математической модели.

5. С какой целью осуществляется направленное нормирование структурных схем?

6. Как выбираются базовые величины при направленном нормировании структурных схем?

7. Какая связь существует между частотными и временными характеристиками моделируемого объекта?

8. Как влияют параметры двухмассовой упругой механической части электропривода на частотные и временные характеристики моделируемого объекта?

9. Принципиальные отличия частотных и временных характеристик трех- и двухмассовых механических систем. Анализ причины отличий.

Лабораторная работа № 2

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы: исследование динамических свойств двигателя постоянного тока независимого возбуждения, выявление влияния параметров двигателя и нагрузки на динамические характеристики двигателя, получение навыков построения динамических характеристик при ненулевых начальных условиях.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Электрические машины постоянного тока представляют собой электромеханические преобразователи (ЭМП) электрической энергии в механическую и наоборот и подчиняются общим законам электромеханического преобразования энергии [2].

Принципиальная электрическая схема двигателя изображена на рис. 3, где показаны: обмотка дополнительных полюсов (ДП) компенсационная обмотка (КО), являющиеся вспомогательными в машине, поэтому при математическом описании принимаются во внимание только их электрические параметры. Влияние вихревых токов в крупных машинах при изменении магнитного потока учитывается обмоткой ОВТ.

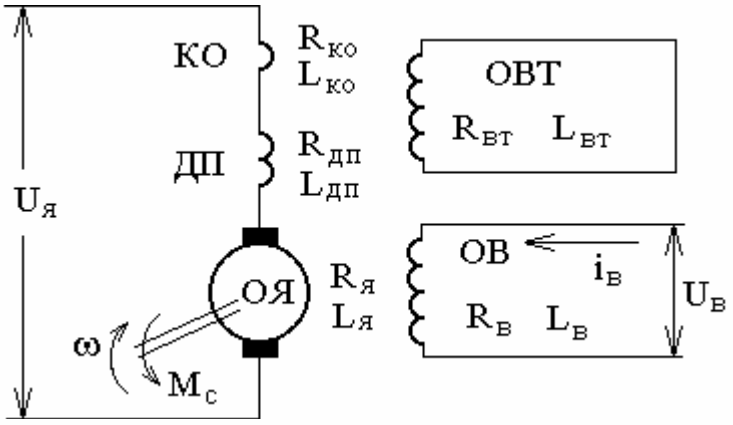

Рис 3. Принципиальная электрическая схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения

К числу основных обмоток, участвующих в электромеханическом преобразовании энергии, относятся обмотка якоря (ОЯ) и обмотка возбуждения (ОВ).

Физические процессы, протекающие в цепи якоря, описываются следующим уравнением

$$U_я = R_{яц\Sigma} \cdot I_я + k \cdot \Phi \cdot \omega \ , \qquad (2)$$

где $R_{яц\Sigma} = R_я + R_{дп} + R_{ko}$ – активное сопротивление цепи якоря, Ом;

$L_{яц\Sigma} = L_я + L_{дп} + L_{ко}$ – индуктивность цепи якоря, Гн;

Φ – магнитный поток обмотки возбуждения, Вб;

$k = p_п \cdot N/(2 \cdot \pi \cdot a)$ – конструктивный коэффициент;

$p_п$ – число пар полюсов;

N – число активных проводников;

a – число пар параллельных ветвей обмотки якоря;

ω – угловая скорость якоря, $с^{-1}$.

Уравнение механического движения электродвигателя имеет вид

$$M - M_c = J \cdot d\omega/dt \ , \qquad (3)$$

где M, M_c – соответственно момент двигателя и статический момент, приведенный к валу двигателя, Н·м;

J – момент инерции двигателя, $кг \cdot м^2$.

По уравнениям (2) и (3) составляется упрощенная структурная схема двигателя постоянного тока независимого возбуждения, которая позволяет исследовать его динамические свойства при Φ = const [1, 2, 3].

В процессе исследования необходимо выявить влияние параметров двигателя и нагрузки на характер протекающих процессов. Этому способствует знание динамической механической характеристики двигателя [2, 3], которую целесообразно исследовать путем введения периодической составляющей в нагрузку, поскольку в этом случае динамическая механическая характеристика для каждого цикла установившихся колебаний одинакова, а форма ее всецело зависит от параметров двигателя. Важным показателем при исследовании динамических свойств двигателя является также динамическая жесткость его механической характеристики. Динамическая жесткость позволяет оценить отклонение динамической характеристики от статической при изменении нагрузки скачком или в установившихся колебательных режимах.

Динамические механические характеристики представляют собой параметрический график зависимостей $\omega = f(t)$ и $M = f(t)$, построенной в осях ω (ось Y) и M (ось X), соответственно, где время t является параметром.

2. ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОМАШНЕЙ ПОДГОТОВКИ

1. Для выбранного в лабораторной работе № 1 двигателя постоянного тока независимого возбуждения составить математические модели, описывающие динамику двигателя в режимах пуска, торможения, наброса нагрузки.

2. По математическим моделям выполнить структурные схемы ДПТ НВ, рассчитав соответствующие параметры.

3. Изучить теоретический материал по математическому моделированию двигателя постоянного тока независимого возбуждения, по динамической механической характеристике ДПТ НВ и динамической жесткости [2, 3].

4. Определить параметры системы и выполнить необходимые преобразования Лапласа для построения динамических механических характеристик (см. задание к лабораторной работе, пп. 2, 3).

5. Провести анализ упрощенной модели двигателя постоянного тока независимого возбуждения:

а) для бригад, имеющих нечетный номер варианта, провести анализ устойчивости ДПТ НВ с помощью критерия Найквиста, представленного в форме диаграмм Боде;

б) для бригад, имеющих четный номер варианта, определить условия возможности представления математической модели ДПТ НВ апериодическим звеном II порядка.

3. ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Набрать структурную схему двигателя постоянного тока независимого возбуждения и снять частотные и временные характеристики для ступенчатого управляющего и возмущающего воздействий.

2. Считая суммарный момент инерции $J_{\Sigma} = J_{1э} + J_{2э}$ (см. лабораторную работу № 1), т. е. используя одномассовую математическую модель механической части ЭП, построить следующие динамические механические характеристики:

2.1. Пуск двигателя при активном статическом моменте M_c = const:

а) для бригад, имеющих *четный* номер варианта, – плавный пуск ЭД с ускорением ε, равным половине от максимального технологического ускорения ε_{max};

б) для бригад, имеющих *нечетный* номер варианта, – ступенчатый пуск ЭД при числе активных резисторов, включаемых в цепь якоря, не менее двух.

2.2. Торможение и реверс ЭД при реактивном статическом моменте с технологическим ускорением механизма $\varepsilon = 0.9 \cdot \varepsilon_{max}$:

а) для бригад с *четным* номером варианта – реверс электродвигателя с помощью торможения противовключением;

б) для бригад с *нечетным* номером варианта – динамическое торможение ЭД.

2.3. Ступенчатое изменения нагрузки двигателя или напряжения питания (управления) электродвигателем:

а) для бригад, имеющих *четный* номер варианта, – ступенчатое уменьшение напряжения питания (управления) ЭД на $\Delta U = 0.5 \cdot U_н$;

б) для бригад, имеющих *нечетный* номер варианта, – ступенчатый наброс нагрузки на $\Delta M_c = 0.35 \cdot M_н$.

3. Исследовать временные характеристики двигателя при его работе на естественной механической характеристике (ЕМХ) и введении в статическую нагрузку периодической составляющей различной частоты, т.е. $M_c(t) = M_c + \Delta M_c \cdot \sin(\Omega t)$, где $\Delta M_c = 0.25 \cdot M_н$, $M_c = M_н$. В качестве Ω целесообразно взять частоту собственных колебаний двигателя $\Omega_{св}$, а две другие должны отличаться наполовину от $\Omega_{св}$ в большую и меньшую сторону как на ЕМХ, так и при варьировании величин активного сопротивления резистора (бригады с *нечетным* номером варианта) или индуктивности (бригады с *четным* номером варианта) в цепи якоря двигателя. Число значений параметров активных резисторов, включаемых в цепь якоря, должно быть не менее двух и обеспечивать изменение жесткости статической характеристики в два и в три раза по отношению к естественной. Дополнительные индуктивности в цепи якоря следует выбирать стандартными, удовлетворяющими условиям нагрева. Значение суммарной индуктивности цепи якоря $L_{яц} = L_{яц\Sigma} + L_{доп}$ следует уве-

личить в два и в три раза, относительно индуктивности обмотки якоря $L_{яцΣ}$.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Математическое описание и структурную схему двигателя постоянного тока независимого возбуждения. Анализ модели согласно п. 5 задания для домашней подготовки.

2. Предварительные расчеты для построения структурной схемы и проведения лабораторных исследований.

3. Результаты исследований динамических характеристик ДПТ НВ и анализ влияния параметров на динамику двигателя.

4. Динамические механические характеристики двигателя для проведенных исследований и их анализ.

5. Выводы по работе.

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Физический смысл частотных и временных характеристик.
2. Что определяет собственная частота колебаний двигателя?
3. Как влияет соотношение постоянных времени $T_а/T_м$ на частотные и временные характеристики ДПТ НВ?
4. Охарактеризуйте каналы управления ДПТ НВ на основе полной структурной схемы двигателя и при Ф = const.
5. Понятие о динамической механической характеристике двигателя и ее назначении. Каким образом осуществляется ее построение?
6. Как влияют параметры цепи якоря на динамическую механическую характеристику?
7. Как влияет частота вынужденных колебаний нагрузки на динамическую механическую характеристику?
8. Понятие о динамической жесткости механической характеристики и ее назначении.
9. Как влияют параметры цепи якоря на динамическую жесткость механической характеристики ДПТ НВ?
10. Как влияет изменение статической жесткости на частотные характеристики двигателя?
11. Проанализируйте устойчивость ДПТ НВ.

Лабораторная работа № 3

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С ЛИНЕЙНОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ХАРАКТЕРИСТИКОЙ

Цель работы: исследование динамических свойств электропривода по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока независимого возбуждения, работающего по разомкнутому циклу.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Для реализации указанной цели лабораторной работы нужно прежде всего ознакомиться с математическим описанием и структурными схемами разомкнутых электромеханических систем (ЭМС), изложенными достаточно подробно в четвертой главе [2], обратив особое внимание на обобщенную ЭМС с линеаризованной механической характеристикой.

В структурную схему исследуемой электромеханической системы входит двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ДТП НВ), двухмассовая упругая механическая часть, рассмотренные ранее, и тиристорный преобразователь в качестве регулируемого источника напряжения.

Тиристорный преобразователь характеризуется своими регулировочными и внешними характеристиками в режимах непрерывного и прерывистых токов, коэффициентом усиления, динамическими характеристикам в переходных процессах. Входной координатой тиристорного преобразователя (ТП) является напряжение управления (U_y), выходной координатой – выпрямленная ЭДС, величина которой обозначается в установившемся режиме (E_d) , а в переходных процессах (e_d).

Управляющие свойства ТП определяются характеристиками управления $E_d = f(U_y)$. Внутренняя координата ТП – угол отпирания α определяется характеристикой системы импульсно-фазового управления (СИФУ) в виде математического описания $\alpha = f_y(U_y)$, а внешняя координата – математическим описанием характеристики вентильной группы $E_d = f_{вг}(\alpha)$. Результирующая характеристика управления ТП представляет собой функцию $E_d = f_{вг}[f_y(U_y)] = f(U_y)$. Поскольку для всех ТП характеристики управления вентильных

групп одинаковы, то вид результирующей характеристики ТП будет зависеть от характеристики СИФУ, которая определяется формой опорного напряжения: косинусоидальной или пилообразной [1, 6].

Динамические свойства тиристорного преобразователя определяются неполной управляемостью тиристоров и параметрами сети, ведущей преобразователь. В зависимости от исполнения СИФУ и его инерционности тиристорный преобразователь для линейного участка характеристики управления представляется передаточными функциями вида:

$$W(p) = \frac{E_d(p)}{U_y(p)} = \frac{k_п}{T_п p + 1}\ , \tag{4}$$

$$W(p) = \frac{k_п \cdot e^{-\tau p}}{T_п p + 1}\ , \tag{5}$$

$$W(p) = k_п \cdot e^{-\tau p}\ , \tag{6}$$

где $k_п$, $T_п$ – соответственно, коэффициент усиления и постоянная времени тиристорного преобразователя, $T_п = 0{,}01 \ldots 0{,}015$ с;

$\tau_п$ – чистое запаздывание, $\tau_п = 0{,}007 \ldots 0{,}015$ с.

Математическое описание динамических процессов, протекающих в управляемом выпрямителе, является многовариантным, зависящим от требуемой степени адекватности, определяемой задачами конкретного исследуемого электропривода. Для выбора типа математической модели ТП вводится показатель $К_р$, равный отношению длительности переходного процесса в системе автоматического управления к длительности проводимости отдельного вентиля.

При $К_р < 10$ применяют импульсные модели, при $К_р < 30$ – непрерывные нелинейные модели и при $К_р > 30$ – упрощенные непрерывные модели. Чем большее значение имеет показатель $К_р$, тем менее точной моделью ТП можно воспользоваться при исследовании динамических процессов электропривода. Учитывая значения $К_р$ для промышленных электроприводов, чаще применяют непрерывные модели тиристорных преобразователей.

Полагая первоначально механические связи абсолютно жесткими ($C_{12} = \infty$), следует получить передаточные функции системы по управляющему и возмущающему воздействиям. Поскольку корни характеристического уравнения системы зависят от соотношения постоянных времени, то целесообразно при домашней подготовке

определить характер переходных процессов подлежащей исследованию ЭМС, сравнив позднее эти расчеты с результатами лабораторных исследований согласно п. 2.

В заключение следует установить рассчитанные при домашней подготовке параметры, обеспечивающие оптимальную жесткость механической характеристики, и провести исследования согласно п. 5 задания к лабораторной работе.

2. ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОМАШНЕЙ ПОДГОТОВКИ

1. Подготовить математическое описание и структурную схему тиристорного преобразователя.

2. Подготовить математическую модель и структурную схему регулируемого электропривода постоянного тока с одномассовой механической частью.

3. Подготовить математическую модель и структурную схему регулируемого электропривода постоянного тока с двухмассовой упругой механической частью.

4. Изучить теоретический материал по демпфированию упругих механических колебаний электроприводом с линейной механической характеристикой [2, 3] и рассчитать параметры, обеспечивающие оптимальное демпфирование механических колебаний.

5. Изучить теоретический материал по анализу устойчивости систем со звеньями чистого запаздывания [8].

3. ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Набрать структурную схему регулируемого электропривода, состоящую из тиристорного преобразователя, электродвигателя и одномассовой механической части (МЧ), и исследовать частотные и временные характеристики по управляющему и возмущающему воздействиям по каналам ω, $I_я$, $E_{тп}$.

2. Набрать структурную схему регулируемого электропривода с двухмассовой упругой механической частью и снять частотные и временные характеристики при ступенчатом управляющем и возмущающем воздействиях по каналам $E_{тп}$, $I_я$, M_{12}, ω_1, ω_2.

3. Построить временные характеристики для двух- и одномассовой МЧ по каналам, указанным в пп. 1 и 2, при наличии периодической составляющей в нагрузке (по аналогии с п. 3 лабораторной

работы № 2, только в качестве Ω целесообразно взять собственную частоту колебаний двухмассовой системы Ω_{12}).

4. Исследовать временные характеристики $I_я$, M_{12}, ω_1, ω_2 при линейном изменении во времени управляющего воздействия, обеспечивая допустимое технологическое ускорение в период пуска до заданной скорости привода при отсутствии и наличии периодической составляющей в статическом моменте на валу исполнительного органа (см. п. 3 задания к данной лабораторной работе).

5. Внести в набранную структурную схему рассчитанные при домашней подготовке параметры электропривода, обеспечивающие оптимальные условия демпфирования механических колебаний, и повторить исследования по п. 2, 3.

3. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Цель работы.
2. Математическое описание и структурную схему тиристорного преобразователя. Частотные и временные характеристики ТП при ступенчатом управляющем и возмущающем воздействиях. Анализ характеристик и выводы.
3. Математическое описание и структурную схему электропривода по системе ТП – ДПТ НВ с одномассовой механической частью. Частотные и временные характеристики системы ТП-ДТП НВ с одномассовой МЧ по каналам $I_я$, ω, $E_{тп}$ при ступенчатом управляющем и возмущающем воздействиях. Анализ характеристик и выводы.
4. Математическое описание и структурную схему системы ТП – ДТП НВ с двухмассовой упругой механической частью. Частотные и временные характеристики системы ТП – ДПТ НВ двухмассовой упругой механической частью при ступенчатом управляющем и возмущающем воздействиях по каналам $E_{тп}$, $I_я$, M_{12}, ω_1 , ω_2 . Анализ характеристик и выводы.
5. Временные характеристики координат при гармоническом возмущающем воздействии (п. 3 задания к данной лабораторной работе).
6. Временные характеристики $I_я$, M_{12}, ω_1, ω_2 при линейном изменении во времени управляющего воздействия при отсутствии и

наличии периодической составляющей в статическом моменте на валу исполнительного органа. Анализ характеристик и выводы.

7. Расчет параметров электропривода, обеспечивающих оптимальное демпфирование упругих колебаний.

8. Частотные и временные характеристики электропривода при соблюдении оптимального демпфирования упругих механических колебаний, согласно п. 5 задания к лабораторной работе. Анализ характеристик и выводы.

9. Общие выводы по лабораторной работе.

4. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие математические модели существуют для описания тиристорного преобразователя постоянного тока? Охарактеризуйте критерии выбора той или иной модели.

2. Как выглядят частотные и временные характеристики ТП при ступенчатом управляющем и возмущающем воздействиях?

3. Как влияют электромагнитная и электромеханическая постоянные времени на динамические характеристики электропривода с одномассовой механической частью?

4. Физический процесс демпфирования механических колебаний электроприводом с линейной механической характеристикой в двухмассовой механической части.

5. Как получить оптимальные условия демпфирования механических колебаний электроприводом?

6. Как отражаются на частотных и временных характеристиках условия оптимального демпфирования механических колебаний?

7. Как влияет периодическая составляющая в статическом моменте на динамику электропривода с двухмассовой механической частью?

8. Способы снижения амплитуды механических колебаний в электроприводе с двухмассовой механической частью.

9. Что понимается под прямой оценкой колебательности системы и как она вычисляется?

10. Косвенная оценка демпфирующей способности электропривода при упругих колебаниях и ее определение.

11. Учет звеньев чистого запаздывания при анализе устойчивости технических систем.

Лабораторная работа № 4

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы: исследование динамических свойств электропривода по системе тиристорный преобразователь – двигатель постоянного тока независимого возбуждения (ТП – ДПТ НВ) при наличии обратных связей.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ И РЕКОМЕНДАЦИИ

В автоматизированных электроприводах (АЭП) для обеспечения большого диапазона регулирования при формировании статических и динамических характеристик электропривода применяются различные обратные связи. В данной лабораторной работе будут рассмотрены наиболее часто применяемые из них в системах стабилизации скорости электропривода постоянного тока, основным назначением которых является минимизация отклонений скорости от заданного значения, вызванных воздействием на систему различного рода возмущений в виде колебаний напряжения сети, дрейфа параметров, изменения нагрузки на валу двигателя и т.п.

Объектом исследований остается электромеханическая система (ЭМС), рассмотренная ранее в третьей лабораторной работе, при введении положительной обратной связи по току и отрицательной обратной связи по скорости.

Исследованию на первом этапе подлежит одномассовая ЭМС, в которой упругие колебания между элементами системы отсутствуют. Это упрощение при расчетах реальной системы характерно, как правило, для малоответственных электроприводов.

Системы, замкнутые отрицательной обратной связью по скорости, являются простыми в техническом исполнении, хорошо стабилизируют скорость двигателя и, как это следует из механической характеристики замкнутой системы, обеспечивают в пределе нулевой статизм [2].

Положительная обратная связь по току, как показано в [2, 3], позволяет достичь не только полной стабилизации скорости, но и получить характеристику, статизм которой отрицателен. Однако в динамике такие системы неустойчивы [2, 3], поэтому чаще всего

применяют комбинированные обратные связи, например, положительную по току и отрицательную по скорости.

Для введения в систему управления автоматизированного электропривода сигналов обратных связей о состоянии параметров объекта применяют различные измерительные датчики. В исследуемой АЭП применяются датчики угловой скорости и тока.

К числу распространенных датчиков угловой скорости относится тахогенератор постоянного тока (ТГ) с независимым возбуждением или с возбуждением от постоянных магнитов.

Входной координатой ТГ является угловая скорость ω, выходной – напряжение $U_{вых}$, выделяемое на сопротивлении нагрузки $R_н$. Напряжение $U_{вых}$ рассчитывается по формуле

$$U_{вых} = k \cdot \Phi \cdot \omega \cdot R_н / (R_{тг} + R_н) = k_{тг} \cdot \omega, \qquad (7)$$

где k, Ф, $R_{тг}$ – соответственно, конструктивная постоянная, магнитный поток, сопротивление якорной обмотки и щеточного контакта тахогенератора;

$k_{тг}$ – передаточный коэффициент тахогенератора, В·с/рад.

При работе ТГ возникают низкочастотные и полюсные пульсации, составляющие до 1 % выходного напряжения. В ряде случаев для снижения пульсаций к выходу ТГ подключают конденсатор емкости С.

Динамические характеристики тахогенератора связаны с инерционностью электромагнитных переходных процессов, происходящих в цепи якоря.

Передаточная функция тахогенератора постоянного тока для схемы с конденсатором

$$W_{тг}(p) = \frac{k_{тг}}{T_ф p + 1}, \qquad (8)$$

где $T_ф = C \cdot R_{тг} / (1 + R_{тг} / R_н)$ – постоянная времени фильтра.

При отсутствии фильтра ввиду малости постоянной времени тахогенератора ($T_{тг} \approx 0.001$ с) его принимают в ряде случаев звеном с передаточной функцией $W_{тг}(p) = k_{тг}$.

В электроприводах постоянного тока находят применение датчики тока (ДТ), в которых сигнал о величине тока снимается в виде напряжения с шунта, включенного в цепь якоря. Выходное напряжение датчика $U_{дт\,max} = \pm 10$ В, коэффициент усиления может ме-

няться от 53 до 135. Напряжение на входе (0...75)мВ, чувствительность 2 мВ, кратность измеряемых токов 1...2.5, полоса пропускания не менее 2 кГц.

Передаточная функция датчика тока описывается апериодическим звеном с постоянной времени $T_{дт} \approx 0.001$ с. Если считать ДТ безынерционным, то тогда его передаточная функция примет вид

$$W(p) = U_{нш} \cdot k_{удт} / I_{нш} \ , \qquad (9)$$

где $U_{нш}$ – номинальное падение напряжения на сопротивлении шунта $R_ш$ при протекании тока якоря, равного номинальному току шунта $I_{нш}$, А;

$k_{удт}$ – коэффициент усиления ячейки датчика тока.

При определении коэффициентов обратных связей датчиков тока $К_{от}$ и угловой скорости $К_{ос}$ следует иметь ввиду, что максимальное значение задающего сигнала управления $U_{з\,max} = 10$ В.

Тогда коэффициент $К_{ос} = U_{з\,max}/\omega_{0\,max}$, где $\omega_{0\,max}$ – максимальная угловая скорость идеального холостого хода электропривода. При выборе тахогенератора постоянного тока целесообразно, чтобы его угловая скорость, приведенная в паспорте, составляла $(1.1...1.2) \cdot \omega_{0\,max}$.

Коэффициент обратной связи по току можно определить по формуле $К_{от} = К_ш \cdot К_{удт}$, где коэффициент передачи шунта $К_ш = U_{нш}/I_{нш}$, а $К_{удт} = U_{дт\,мах}/U_{нш}$. В результате получаем $К_{от} = U_{дт\,мах}/I_{нш}$. Необходимо обеспечить такой коэффициент усиления ячейки датчика тока, чтобы $U_{дт\,мах} = U_{з\,max}$.

Более подробную информацию и справочные материалы о датчиках угловой скорости и тока можно получить в [1, 6, 7].

На втором этапе выполнения лабораторной работы, связанном с исследованием двухмассовой ЭМС, необходимо проследить влияние обратных связей на демпфирующие и динамические свойства электропривода. С этой целью следует поварьировать величиной коэффициентов обратных связей. Важно установить также, какое действие оказывают на динамику и демпфирующую способность электропривода знаки обратных связей при выбранных ранее значениях коэффициентов.

2. ЗАДАНИЕ ДЛЯ ДОМАШНЕЙ ПОДГОТОВКИ

1. Подготовить математические описания и структурные схемы для системы ТП – ДПТ НВ с положительной обратной связью по току и отрицательной обратной связью по скорости для одномассовой механической части электропривода.

2. Подготовить математические описания и структурные схемы для системы ТП – ДПТ НВ с положительной обратной связью по току и отрицательной обратной связью по скорости при двухмассовой упругой механической части электропривода.

3. Изучить теоретический материал о влиянии обратных связей на статические и динамические характеристики регулируемого электропривода постоянного тока с одно- и двухмассовой механической частью [2].

4. Рассчитать значения коэффициентов обратных связей.

5. Изучить структурные схемы и передаточные функции датчиков тока и скорости [5, 6, 7].

6. Исследовать устойчивость:

а) для бригад, имеющих *четный* номер варианта, необходимо определить условия устойчивости одномассовой системы с обратной связью по току;

б) для бригад, имеющих *нечетный* номер варианта, необходимо определить условия устойчивости одномассовой системы с обратной связью по скорости;

в) для всех бригад определить условия устойчивости одномассовой системы при совместном действии ОС по току и по скорости.

3. ЗАДАНИЕ К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

1. Для одномассовой электромеханической системы ТП – ДПТ НВ:

1.1. Набрать структурную схему с положительной обратной связью по току двигателя и исследовать влияние коэффициента обратной связи на динамические свойства электропривода при ступенчатом управляющим и возмущающем воздействиях по каналам $E_{тп}$, $I_{я}$, ω.

1.2. Набрать структурную схему с отрицательной обратной связью по скорости двигателя и исследовать влияние коэффициента обратной связи на динамические свойства электропривода при сту-

пенчатом управляющем и возмущающем воздействиях по каналам $E_{тп}$, $I_я$, ω.

1.3. Набрать структурную схему с совместным действием отрицательной обратной связью по скорости двигателя и положительной обратной связью по току двигателя и исследовать динамические свойства электропривода при ранее выбранных в пп. 1.1 и 1.2 значениях коэффициентов обратных связей по каналам $E_{тп}$, $I_я$, ω.

2. Для двухмассовой электромеханической системы ТП – ДПТ НВ:

2.1. Набрать структурную схему с положительной обратной связью по току двигателя и исследовать динамические свойства электропривода по каналам $E_{тп}$, $I_я$, M_{12}, ω_1 , ω_2 при выбранных в п. 1.1 коэффициентах обратной связи.

2.2. Набрать структурную схему с отрицательной обратной связью по скорости двигателя ω_1 и исследовать динамические свойства электропривода при выбранных в п. 1.2 коэффициентах обратной связи.

2.3. Набрать структурную схему с отрицательной обратной связью по скорости исполнительного органа ω_2 и исследовать динамические свойства электропривода по каналам п. 2.1 при выбранных в п. 1.2 коэффициентах обратной связи.

2.4. Набрать структурную схему с совместным действием обратных связей по току $I_я$ и скорости двигателя ω_1 и исследовать динамические свойства электропривода по каналам п. 2.1 для выбранных в п. 1.3 коэффициентов обратных связей.

2.5. Рассчитать коэффициенты ОС при которых будет наблюдаться наибольшее демпфирование колебаний. Построить характеристики.

2.6. Для структурной схемы согласно п. 2.4 изменить знаки обратных связей на противоположные и выполнить исследования, аналогичные п. 2.4.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать:

1. Цель работы.

2. Математическое описание и структурные схемы одно- и двухмассовой ЭМС с обратными связями и рассчитанными при домашней подготовке параметрами структурной схемы.

3. Частотные и временные характеристики одномассовой ЭМС по каналам $E_{тп}$, $I_{я}$, ω при ступенчатом управляющем и возмущающем воздействиях при различных значениях коэффициентов обратных связей в случаях одиночного и совместного действия. Анализ характеристик и выводы.

4. Частотные и временные характеристики двухмассовой ЭМС по каналам $E_{тп}$, $I_{я}$, M_{12}, ω_1, ω_2 при ступенчатом управляющем и возмущающем воздействиях для значений коэффициентов обратных связей, принятых для одномассовой ЭМС, при одиночном и совместном действии обратных связей. Анализ характеристик и выводы.

5. Частотные и временные характеристики двухмассовой ЭМС по каналам $E_{тп}$, $I_{я}$, M_{12}, ω_1, ω_2 при ступенчатом управляющем и возмущающем воздействиях для коэффициентов ОС согласно п. 2.5 задания к лабораторной работе. Анализ характеристик и выводы.

6. Частотные и временные характеристики двухмассовой ЭМС при смене знаков обратных связей в случае их совместного действия согласно п. 2.6 задания к лабораторной работе. Анализ характеристик и выводы.

7. Анализ устойчивости по вариантам.

8. Общие выводы по лабораторной работе.

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как влияет положительная обратная связь по току якоря на динамические характеристики электропривода постоянного тока с одномассовой механической частью?

2. В чем проявляется влияние величины коэффициента отрицательной обратной связи по скорости на динамические характеристики электропривода с одномассовой механической частью?

3. Как проявляется влияние значений коэффициентов обратных связей при совместном действии положительных и отрицательных обратных связей на динамические характеристики электропривода с одномассовой механической частью?

4. Какими структурными схемами можно представить датчики тока и скорости?

5. Каким образом можно уменьшить амплитуду и число колебаний автоматизированного электропривода с одномассовой механической частью?

6. Как влияет положительная обратная связь по току якоря на динамические характеристики электропривода с двухмассовой упругой механической частью?

7. Какое влияние оказывает величина коэффициента отрицательной (положительной) обратной связи по скорости двигателя на динамические характеристики электропривода с двухмассовой упругой механической частью?

8. Как влияет расположение датчика скорости (на двигателе или на исполнительном органе) на динамические характеристики электропривода с двухмассовой упругой механической частью?

9. Какие существенные отличия наблюдаются в динамике электропривода с отрицательной обратной связью по скорости двигателя при одномассовой и двухмассовой механической частью?

10. Каким образом можно уменьшить амплитуду колебаний угловой скорости автоматизированного электропривода с двухмассовой упругой механической частью?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фролов Ю.М., Бурковский В.Л. Математическое моделирование в автоматизированном проектировании электроприводов: Учеб. пособие, Воронеж: ВГТУ, 2000. 143 с.

2. Ключев В.И. Теория электропривода: Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат. 1985. 560 с.

3. Чиликин М.Г., Ключев И.В., Сандлер А.С. Теория автоматизированного электропривода: Учеб. пособие для вузов. М.: Энергия, 1979. 616 с.

4. Егоров В.Н., Корженевский-Яковлев О.В. Цифровое моделирование электропривода. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1986. 168 с.

5. Фролов Ю.М. Конспект лекций по дисциплине "Моделирование в электроприводе" для студентов специальности 180400 "Электропривод и автоматика промышленных установок и технологических комплексов" В 2 ч. Воронеж: ВГТУ, 2000.

6. Терехов В.М. Элементы автоматизированного электропривода. Учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат. 1984. 224 с.

7. Тун А. Я. Системы контроля скорости электропривода. М.: Энергоатомиздат, 1984. 168 с.

8. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов. Н.А. Бабанов, А.А. Воронов, А.А. Воронова и др. В 2 ч. Ч. I. Теория линейных систем автоматического управления. 2-е изд., перераб. и доп. / Под ред. А.А. Воронова. М.: Высшая школа, 1986. 367 с.

9. Егоров В.Н., Шестаков В.У. Динамика систем электропривода. Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1983. 216 с.

10. Дьяконов В, Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. Специальный справочник. – СПб.: Питер, 2002. – 448 с.

11. Слепокуров Ю.С. MATLAB 5. Анализ технических систем: Учеб. пособие. / Воронеж: Изд-во ВГТУ, 2001. – 167 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

к лабораторным работам по курсу
"Моделирование электропривода"
для студентов специальности 180400
“Электропривод и автоматика промышленных
установок и технологических комплексов”
очной формы обучения

Составители
Фролов Юрий Михайлович,
Романов Андрей Владимирович

ЛР № 066815 от 25.08.99. Подписано в печать 22.09.2003.
Формат 60x80/16. Бумага для множительных аппаратов.
Уc.печ.л. 1,7. Уч.-изд. л. 1,4. Тираж 50 экз. «С» .
Зак. № .

Воронежский государственный технический университет
394026 Воронеж, Московский просп., 14