

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Нижекамский химико-технологический институт (филиал)  
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего профессионального образования  
«Казанский национальный исследовательский технологический университет»

**Р.Н.Ганиев**

**РАЗРАБОТКА, ИССЛЕДОВАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ  
ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМОГО ЭКСТРУДЕРА В  
ПРОИЗВОДСТВЕ АВТОМОБИЛЬНЫХ ШИН**

**Монография**

**Нижекамск  
2015**

УДК 623.1

Печатается по решению редакционно-издательского совета Нижнекамского химико-технологического института (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ».

### Рецензенты

**Дмитриев В. Н.**, доктор технических наук, профессор;  
**Тумаева Е. В.**, кандидат технических наук, доцент.

### Ганиев Р.Н.

Разработка, исследование и внедрение частотно-регулируемого электропривода экструдера в производстве автомобильных шин: монография / Р.Н.Ганиев – Нижнекамск : Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2015. – 116 с.

В данной монографии приведены принципы и методология построения систем частотно-регулируемых электроприводов экструдеров. Рассмотрены структура и состав этих систем, дана общая характеристика их основных компонентов.

Кроме того, решена задача параметрической оптимизации процесса экструзии методом Левенберга-Марквардта: показано применение информационного, программного, технического, математического и организационного обеспечения, дана характеристика подобных систем, приведены примеры оценки устойчивости электроприводов шприцмашин в «малом» и «в больщом» .

Монография предназначена для студентов электротехнического профиля и аспирантов по специальности 05.09.03 «Электротехнические комплексы и системы», может быть полезна инженерно-техническим работникам и специалистам в области современных систем электропривода.

УДК 623.1

© Ганиев Р.Н., 2015

© Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ», 2015

## Оглавление

Введение .....	.....
1. Экструзионный процесс шинопроизводства и технологические требования к электроприводу экструдеров.....	.....
1.1. Основные задачи экструзии как технологического процесса и пути их решения.....	.....
1.2. Основные типы экструдеров и требования к их электроприводу.....	.....
1.3. Обзор существующих систем электроприводов экструдеров в резинотехнической промышленности.....	26
Выводы.....	30
2. Параметрическая оптимизация технологического процесса экструзии за счет электропривода.....	31
2.1. Исходные данные для решения оптимизационной задачи.....	31
2.2. Исследования влияния параметров привода на процесс экструзии.....	47
2.3. Постановка и решение задачи параметрической оптимизации процесса экструзии.....	51
Выводы.....	62
3. Математическая модель экструдера как объекта автоматического управления посредством электропривода.....	64
3.1. Динамические свойства экструдера.....	64
3.2. Линеаризация модели системы «экструдер-продукт».....	71
3.3. Методика исследования устойчивости экструдера как нелинейного объекта управления .....	76
Выводы.....	84
4. Разработка и исследование частотно-регулируемого электропривода экструдера с векторным управлением .....	84
4.1 Обоснование необходимости применения системы с векторным управлением электроприводом экструдера.....	84
4.2. Работа асинхронного двигателя в режиме векторного управления.....	88
4.3. Функциональная и структурная схема системы ПЧ-АД при питании от источника напряжения с ориентацией по вектору потокосцепления ротора.....	91
4.4. Синтез регуляторов системы электропривода с векторным управлением.....	96
4.5. Моделирование системы векторного управления электроприводом экструдера .....	107
4.6 Система регулирования давления смеси на основе системы векторного управления электроприводом экструдера.....	113
5. Разработка и исследование системы электропривода экструдера частотно-токовым управлением.....	122

5.1. Обоснование применения частотно-токового электропривода для экструдера.....	122
5.2. Математическое описание и структура АД в динамике при питании от источника тока.....	122
5.3. Функциональная и структурная схема частотного электропривода при питании от источника тока.....	131
5.4. Синтез регуляторов в системе частотно-токового управления.....	142
5.5. Моделирование системы электропривода экструдера с частотно-токовым управлением.....	149
Выводы.....	156
Заключение.....	158
Список литературы.....	161
ПРИЛОЖЕНИЕ А. Результаты исследования производства покрышек на ОАО «Нижнекамскшина»... ..	168
ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Технические данные технологического оборудования по производству протекторов.....	172
ПРИЛОЖЕНИЕ В. Расчет схемы замещения электродвигателя.....	175
ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Логарифмические частотные характеристики систем управления экструдером .....	181
ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Графики переходных процессов в разработанных системах электропривода экструдера.....	189
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Расчет и выбор электродвигателя для экструдеров.....	191
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Результаты исследований электропривода и готовой продукции после внедрения системы управления экструдером.....	195

## Введение

**Актуальность темы.** Ускоренное развитие автомобилестроения в последние годы сопровождается многократным увеличением автомобильных шин и резинотехнического сырья для их изготовления. Производство данного вида продукции осуществляется в условиях жесткой рыночной конкуренции между отечественными и зарубежными производителями. Участие в этом процессе одного из ведущих изготовителей автомобильных шин в нашей стране, каким является ОАО «Нижекамскшина», требует повышения качества продукции на всех стадиях производства и, особенно, как показывает анализ, на этапах поточного изготовления резинотехнических полуфабрикатов (РТП). Необходимость повышения качества РТП обуславливается особыми условиями эксплуатации автомобилей новой конструкции, особенно так называемых «внедорожников», а также общим повышением скорости движения, грузоподъемности и проходимости автотранспорта.

Одним из важнейших технологических узлов производства РТП служат поточные линии по изготовлению боковин и протекторов автомобильных покрышек. Главным звеном в технологическом цикле этих линий служат червячные машины (экструдеры), осуществляющие перемешивание резинотехнической массы с последующим ее формообразованием путем выдавливания (шприцевания) через специальные фильерные отверстия. Происходящий таким образом процесс шприцевания должен отвечать высоким требованиям к структурной и температурной однородности и скорости технологической массы в рабочей зоне экструдера. Несоблюдение технологического регламента приводит к браку в виде «неустойчивого течения», дробления экструдата», и т.д.

Традиционный способ вращения червячных машин предусматривает применение трансмиссионных нерегулируемых приводов или, в редких случаях электроприводов постоянного тока. Однако, многолетний опыт эксплуатации данных механизмов убеждает в невозможности построения на их основе современного конкурентоспособного производства. Анализ технологического процесса показывает, что способом доведения качества РТП до уровня общепринятых мировых стандартов служит поддержание постоянства скорости продвижения и давления шприцуемой смеси в выходной зоне экструдера. В условиях поточного производства задача усложняется необходимостью получения целого ряда значений указанных параметров, каждый из которых требуется для выпуска того или иного вида полуфабриката. Указанное требование, наряду с поддержанием высокой производительности при минимальном энергопотреблении составляет основную задачу технологической оптимизации экструзионного процесса.

При выборе того или иного типа регулируемого электропривода в цехах производства автошин необходимо учитывать наличие агрессивной среды в виде выделяющейся мелкодисперсной токопроводящей сажи. Это предполагает применение бесконтактных машин и, прежде всего, асинхронных

короткозамкнутых двигателей (АД) в составе частотно-регулируемых электроприводов.

При выборе того или иного варианта частотно-регулируемого электропривода предполагается исходить из полученных в процессе оптимизации экструзионного процесса результатов анализа, выводов, рекомендаций и корректив. Многовариантность предлагаемых решений объясняется технологическими различиями при производстве того или иного вида полуфабриката. Неодинаковость химического состава перерабатываемых полимерных смесей, рабочих температур и скоростей шприцевания, обуславливают различный характер оптимального регулирования скорости и момента на валу приводного двигателя. Предварительно проведенные экспериментальные исследования указывают на наличие в механических характеристиках привода экструдера, как участков постоянства мощности, так и участков постоянства момента. Критериями при выборе той или иной структуры электропривода и оптимального закона поддержания скорости, момента и давления смеси на выходе послужили минимальные отклонения ее качественных параметров, максимум производительности при ограничении уровня энергопотребления.

Исходя из вышеизложенного, целью монографии явилась оптимизация экструзионного процесса шинопроизводства применением частотно-регулируемого электропривода экструдеров, обеспечивающая повышение производительности и качества резинотехнических полуфабрикатов.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- изучение физических основ процесса экструзии, позволяющих выяснить зависимость качественных показателей продукта (отклонений геометрических размеров и механических свойств) от влияния управляемых координат системы электропривода (частоты вращения и электромагнитного момента) и возмущающих воздействий в виде колебаний рабочей температуры, вязкости и давления смеси на выходе);

- получение математической модели процесса экструзии в виде аналитических зависимостей и построенной на их основе структурной схемы комплекса «электропривод – экструдер – продукт» методами теории автоматического управления;

- проведение параметрической оптимизации технологического процесса экструзии, включающее в себя следующие этапы: а) выбор исходных данных; б) определение варьируемых параметров и пределов их изменения; в) установление критериев оптимизации; г) выбор метода оптимизации и получение на его основе алгоритмов управления электроприводом;

- разработка наиболее перспективных вариантов электропривода для выпуска того или иного вида полуфабрикатов;

- проведение компьютерного моделирования и проверка результатов исследований с помощью цеховой опытно-промышленной установки.

Экспериментальные исследования проведены на действующей экструзионной установке МЧТ-250 в составе поточной линии ИРУ-16Б сборочного производства ОАО «Нижекамскшина» г. Нижнекамск.

Методы исследования. В теоретических исследованиях использован математический аппарат анализа и синтеза систем автоматического управления, в том числе метод параметрической оптимизации на основе поиска экстремальных значений целевой функции. При экспериментальной проверке производилось сравнение результатов имитационного компьютерного моделирования и экспериментального исследования испытаний опытно-промышленной установки.

Достоверность и обоснованность сделанных в работе рекомендаций и выводов подтверждается качественным и достаточно близким количественным совпадением результатов теоретических и экспериментальных исследований, а также успешной эксплуатацией внедренной системы электропривода на поточной линии производства протекторов ИРУ-16Б, ОАО «Нижекамскшина»

## 1. Экструзионный процесс шинопроизводства и технологические требования к электроприводу экструдеров

### 1.1. Основные задачи экструзии как технологического процесса и пути их решения

В настоящее время существует большое число методов переработки полимеров в готовые изделия. Однако, в современной промышленности наиболее распространенным методом переработки является экструзия. По оценкам экспертов более 30 % изделий из полимеров изготавливается данным методом с помощью применения экструдеров в составе различных технологических комплексов переработки полимеров. В частности, экструдеры являются главными агрегатами поточных линий по изготовлению протекторных заготовок для автомобильных шин. Их назначение состоит в процессе перемешивания резиновой смеси с последующим ее формованием с помощью фильеры.

Несмотря на разнообразную классификацию экструдеров, все они имеют схожее устройство и принцип работы. Устройство типичного одночервячного экструдера показано на рис.1.1.

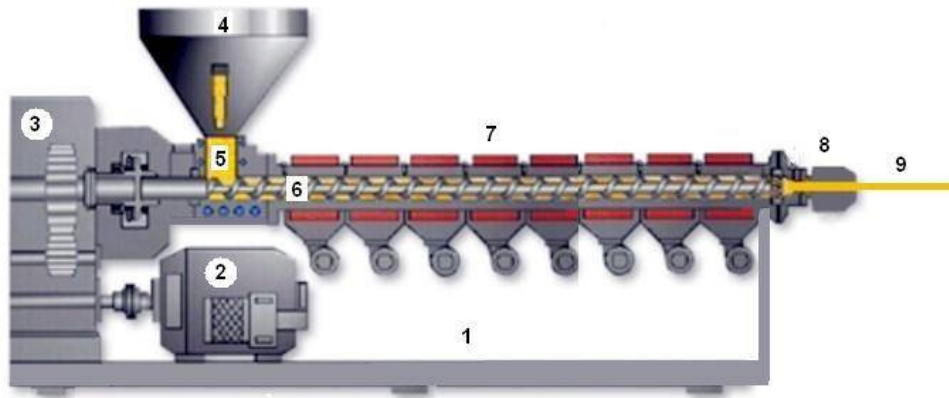


Рис. 1.1. Устройство одночервячного экструдера

Термопластичный материал из бункера 4 поступает в зону загрузки экструдера 5. Вращающийся червяк 6 увлекает и продвигает материал вдоль цилиндра. За счет трения материала о стенки цилиндра и поверхность шнека, а также при помощи нагревателей 7 материал разогревается до температуры плавления полимера (~150-200 С), перемешивается и уплотняется. Высокое давление, возникающее в уплотненной зоне, позволяет продавить вязкий компаунд через формующую головку 8. Выдавленный материал (экструдат) 9 проходит через фильеру. Основные узлы экструдера монтируются на станции 1. Вращение червяка осуществляется при помощи электродвигателя 2 и трансмиссии 3.[35, 63, 76, 106]

К качеству профилируемых заготовок, как к полуфабрикату шинного производства, предъявляются следующие требования [17, 24, 25]:



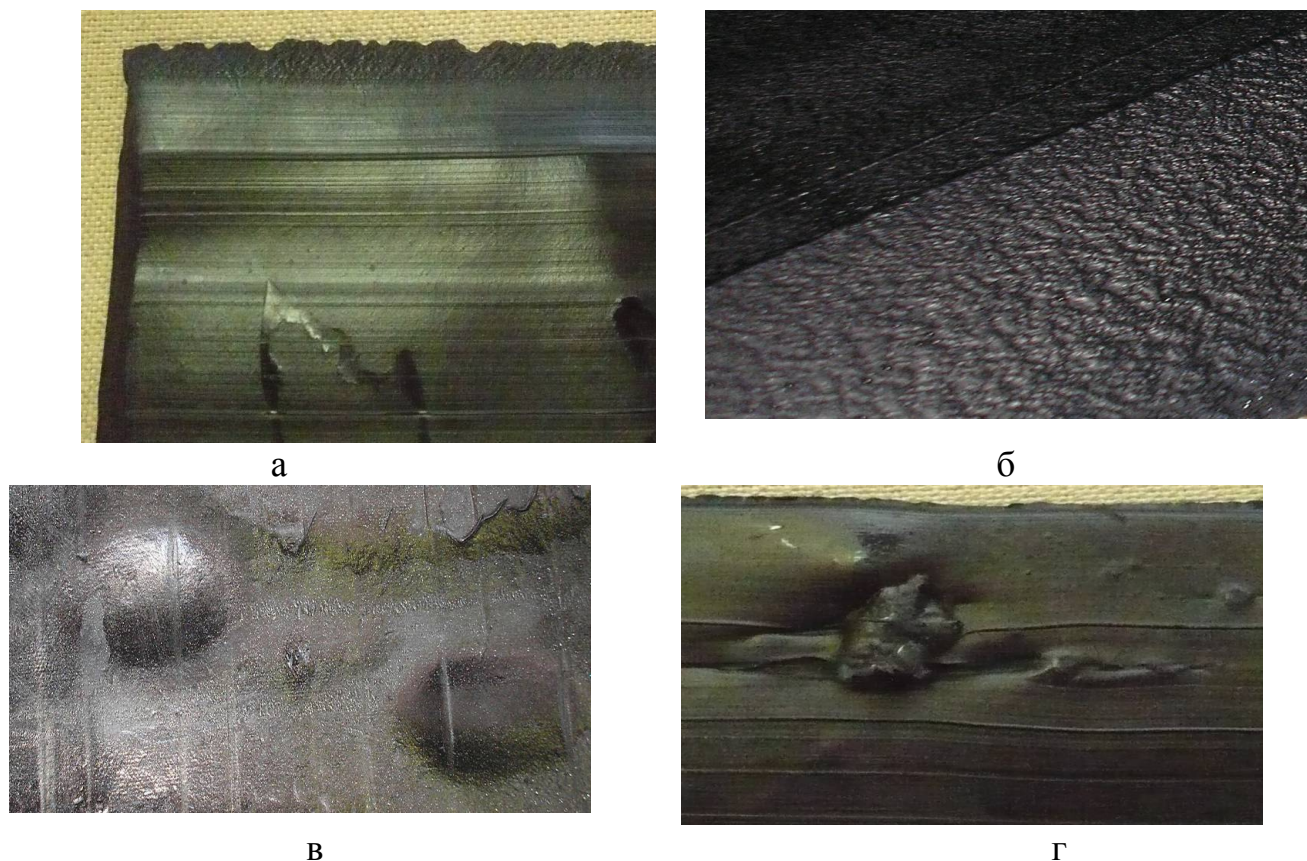
- заготовка должна быть монолитной, плотной с гладкой поверхностью, однородной по длине и профилю);
- в ней должны отсутствовать подвулканизированные частицы и механические включения;
- заготовка должна сохранять массу и приданные ей форму при хранении.

Качество профилируемых изделий зависит от большого числа факторов, к числу которых можно отнести [22, 23]:

- состав (рецептуру) резиновой смеси; реологические свойства (пластичность, вязкость, упругость) материала;
- температурный режим работы экструдера и протекторного агрегата;
- конструкцию профильного приспособления;
- соотношение скоростей вытяжки и принудительной усадки на разных участках протекторного агрегата;
- массу возвращаемых в экструдер отходов («возврата») заготовок и их качество;
- установку, настройку и регулирование профильных приспособлений;
- частоту вращения червяка;
- конструктивный тип червячной машины (МЧТ, МЧХ, отношение L/D и т.д.), особенности, размеры, мощность.

Экспериментальные исследования продуктов экструзии, проведенные в условиях действующего производства автошин на ОАО «Нижекамскшина», в частности, протекторных заготовок, полученных шприцеванием на экструдере МЧТ-250 в составе поточной линии ИРУ-16Б [75], показали, что наблюдаемые отклонения размеров и массы протекторов всего на 3% от установленной нормы приводит к тому, что 20 % всей готовой продукции не соответствует нормативным допускам (прил. А., рис. ПА.1, ПА.2). Это влечет значительные материальные издержки, в связи с возвратом бракованной продукции на вторичную переработку. Так, за 2009 г. финансовые потери при выходе в брак 500 шт. покрышек составили 200 тыс. руб. Всего же ежесуточные потери сборочного производства в связи с переработкой брака, составляют около 3 тыс. руб., что составляет около 1 млн. руб. в год.

В связи с вышеизложенными фактами и предъявляемыми требованиями к качеству профилируемых изделий, формулируется главная задача современной экструзии: производство качественного продукта, отвечающего нормативным требованиям, при максимальной производительности и минимальной технологической мощности процесса. Качество продукта определяется соответствием его параметров нормам технологического регламента и стандартам на полуфабрикаты, получаемые путем экструзии. Потеря качества продукта связана с отклонением физико-химических и режимных параметров профилируемых изделий от регламентированных значений.



**Рис. 1.2.** Фото дефектов экструдата после шприцевания: а) «рваные кромки»; б) «апельсиновая кожура»; в) «вздутия»; г) «неперемешанные включения»

Чаще всего это связано с тремя основными проблемами, возникающими при экструзии полимеров – деструкцией полимера, неустойчивым течением в процессе шприцевания (экструзии) и разбуханием экструдата после шприцевания (рис.1.2, в). Деструкция проявляется в потере механических свойств полимера, в обесцвечивании поверхности, выделении летучих компонентов в процессе переработки. Другой важной проблемой экструзии является «дробление поверхности экструдата». Наблюдая за истечением полимера из формующей фильеры, можно заметить появление на поверхности струи вмятин и утолщений. Данные дефекты поверхности шприцуемого изделия связаны с началом неустойчивого течения. Для описания этого эффекта в литературе применяются различные термины: применительно к слабовыраженным дефектам – это «матовость», «акуля кожа», «апельсиновая кожура» (рис. 1.2 б); применительно к периодическим дефектам – «поверхность бамбука», «винт»; для очень сильных искажений «разрушение», «рваные кромки» (рис. 1.3, а). В целом все явление называют «неустойчивым течением». [17, 94].

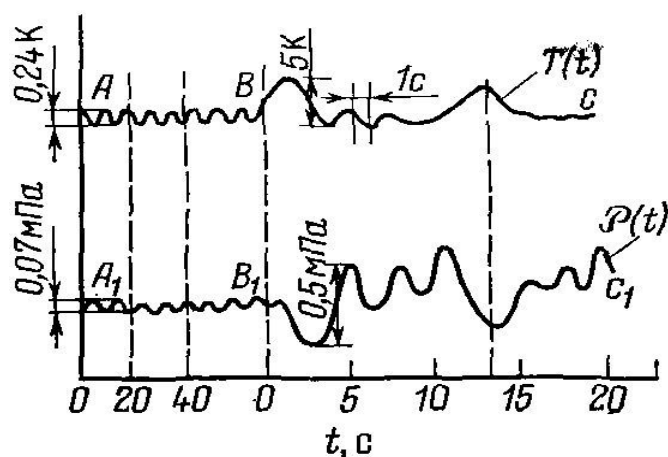
«Неустойчивость течения» также определяется степенью гомогенизации расплава, т.е. однородностью расплава по температуре и по вязкости. Так, в экструдате могут наблюдаться «неперемешанные включения» (рис. 1.3, г). Экспериментально установлено, что перепад температуры на глубине канала червяка может достигать 20 – 30 °С, что при недостаточной гомогенизации

снижает качество изделия. Поэтому, если экструдер работает при максимальной объёмной производительности и низком сопротивлении формующего инструмента, гомогенность расплава может быть недостаточной [25, 94].

Третьей проблемой экструзии является «разбухание экструдата» - увеличение сечения экструдата после выхода из профилирующего отверстия [26, 79], и как следствие отклонение размеров заготовок от регламентированных значений. Разбухание экструдата главным образом обусловлено упругим восстановлением деформации, которой полимер подвергался в головке как на входе в формующую часть головки, так и при ориентации макромолекул полимера в этой части [56]. Этот эффект также имеет важное значение, т.к. приводит к увеличению размеров (диаметра, толщины стенок) экструдата по сравнению с соответствующими размерами формующего инструмента. Окончательное изменение размеров струи экструдата завершается только на некотором расстоянии от выходного канала, поскольку релаксация высокоэластичной деформации происходит в течение определённого промежутка времени. Экспериментально было установлено, что зависимость разбухания от скорости сдвига проходит через максимум, значение которого с ростом температуры увеличивается, а максимальное разбухание сдвигается в область больших скоростей сдвига [55, 79, 94, 99]. Эффект разбухания предопределяет выбор технологических параметров переработки полимеров. При втекании расплава полимера из канала с большим диаметром в канал с меньшим диаметром происходит развитие течения с более высокой скоростью. Поэтому профиль скоростей расплава в канале перестраивается. На входе в канал эпюра скоростей имеет почти прямоугольную форму. На некотором расстоянии от входа в канал профиль скоростей приобретает параболическую форму, характерную для установившегося течения расплава полимеров. [79, 94]

Участок неустановившегося течения, на котором происходит формирование профиля скоростей, принято называть входным участком. За входным участком следует участок установившегося течения. Втекание расплава полимера в канал вызывает дополнительные потери давления. Распределение этого давления носит нелинейный характер. Это обусловлено релаксационными процессами, характерными для вязкоупругих жидкостей при переходном режиме деформирования от низкой скорости течения (до входа в канал) к более высокой скорости (в канале). На входе в канал кроме нормальных и сдвиговых напряжений возникают растягивающие напряжения, что является одной из причин неустойчивости потока. Экспериментальные исследования показывают, что температура и давление расплава на выходе из экструдера колеблются, причём, в зависимости от конструкции червяка и режима работы амплитуда этих колебаний может достигать 30 - 50 К и 1,0 - 1,5 МПа. Аналогичные исследования показывают, что при работе в определённых режимах наблюдаются весьма существенные колебания производительности, достигающие  $\pm 30\%$  [17, 94].

Наряду с влиянием реологических свойств полимеров в процессе переработки смесей, существенное влияние на качество выходного продукта оказывают так называемые периодические пульсации. Причиной возникновения периодических пульсаций является периодическое изменение относительного расположения загрузочного отверстия и гребня витка. Соответственно изменяется и эффективная длина зоны загрузки, обеспечивающая подачу материала. Поскольку объёмная производительность зоны плавления не зависит от длины червяка и остаётся в течении полного его оборота неизменной, то изменение зоны дозирования проявляется в виде периодических пульсаций давления и температуры расплава на выходе из червяка. Увеличение частоты вращения червяка при постоянной производительности вызывает рост амплитуды пульсаций температуры и давления. Увеличение производительности приводит к уменьшению амплитуды пульсаций температуры и увеличению амплитуды пульсаций давления. Данные выводы подтверждают экспериментальные кривые рис. 1.3. [24, 94]



**Рис. 1.3.** Экспериментальные зависимости пульсаций температуры  $T(t)$  и давления  $P(t)$

(параметры червяка экструдера  $D = 63$  мм;  $L/D = 27$ ; длина зоны дозирования  $L_d = 12D$ ; глубина винтового канала в зоне питания  $h_1 = 10$  мм; в зоне дозирования  $h_2 = 3,75$  мм; шаг винтовой линии  $t = D$ ; производительность  $Q = 21$  см /сек; материал - полиэтилен высокой плотности)

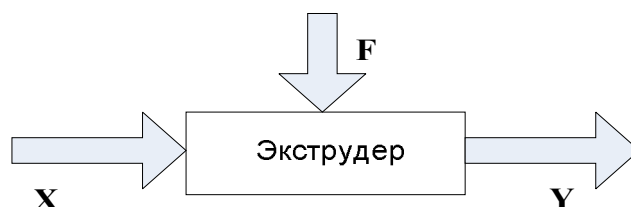
Профиль протектора, который задается профилирующей планкой и формующей головкой, искажается при усадке («разбухании»). Усадку необходимо минимизировать и эффективно регулировать. Для этого необходимо поддерживать на одном уровне температуру, вязкоэластические свойства смеси; производительность; обеспечивать полную готовность смеси к поступлению ее в экструдер. Изменение размеров поперечного сечения экструдата на выходе из формующего инструмента часто называют "эффектом Вайссенберга". При входе перерабатываемого материала в формующий канал возникают нормальные напряжения и напряжения сдвига, которые изменяются в зависимости от геометрических размеров профилирующих элементов и релаксируют на выходе из них с изменением размеров экструдата [17, 24, 94].

Существует несколько способов решения указанных проблем экструзии. Деструкция полимера зависит от распределения времен пребывания полимера в экструдере, распределения температур, скорости деформации, присутствия агентов кислорода и других агентов, способствующих деструкции. Первые три фактора в основном зависят от геометрических форм рабочих органов машины, оптимальный выбор которых возможен лишь при проектировании оборудования. На присутствие агентов кислорода можно оказать влияние в ходе технологического процесса, например, поместив загрузочный бункер под азотную подушку [94].

Уменьшить усадку и неустойчивое течение материала можно, подвергнув изделие на выходе из формующего канала дополнительной деформации, т.е. последующей вытяжке, каландрованию, проведению через формующие каналы головки [10,70,71] и т.п. Второй способ заключается в экспериментальном определении режимов переработки (давление и температура смеси) и геометрии формующих каналов для изделия заданного профиля при переработке конкретного полимерного материала. Третий способ заключается в определении степени пластикации материала. Степень пластикации в свою очередь можно учитывать с помощью суммарной величины сдвига  $\gamma$ , которая представляет собой функцию различных конструктивных параметров шнека, формующих каналов экструзионной головки и технологических параметров процесса содержащихся в математической модели экструзии резиновых смесей [76, 94].

Однако, изменение геометрических размеров действующего оборудования невозможно по техническим причинам, а изготовление оборудования для переработки отдельных полимеров с учетом их специфических свойств, крайне невыгодно. Для обеспечения требуемого качества профилируемых изделий учитываются особенности переходных режимов. Даже если экструдер полностью прогрет до заданной температуры и заполнен расплавом полимера, любое изменение скорости вращения червяка под действием каких-либо случайных возмущений вызывает изменение распределения давления и температуры, а также сдвиговых напряжений, что и является причиной возникновения неустойчивого течения. При этом возникают пульсации давления смеси на выходе и колебания скорости экструзии, наблюдаются описанные выше дефекты экструдата [47, 94].

Качество экструдированного продукта зависит от множества различных параметров экструзии, которые в общем случае трудно оценить, т.к. процесс изменения физико-химических свойств экструдата в машине носит случайный характер. Однако, представив экструдер в виде некоторого объекта управления с определенными входными  $\mathbf{X}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  и выходными  $\mathbf{Y}(y_1, y_2, \dots, y_m)$  параметрами (рис.1.4), а также с учетом действия возможных возмущений  $F(f_1, f_2, \dots, f_k)$ , можно оценить поведение объекта в статическом и динамическом режимах, выявить взаимосвязи входных и выходных параметров, определить в дальнейшем оптимальное управление машиной [20, 21, 22].



**Рис.1.4.** Экструдер – многомерный объект управления

Как правило, технологические циклы процесса экструзии проходят на установках, конструктивные параметры которых остаются неизменными в течении всего цикла. Физико-химические свойства же смесей могут отличаться в зависимости от внутреннего состава и типа выпускаемого полуфабриката, что может привести к неустойчивым режимам при смене рабочих смесей. В таких условиях выбор вектора входных параметров может явиться решающим фактором, от которого зависят свойства продукта.

С точки зрения механического воздействия на экструдат, в качестве входных параметров могут быть приняты скорость вращения червяка, определяющая производительность машины, момент на валу червяка, определяющий силовое воздействие на смесь, температура входной смеси, определяющее начальное механическое состояние рабочей массы. Очевидно, что указанные параметры непосредственно влияют на характеристики конечного продукта экструзии. Поэтому одним из возможных решений проблем деструкции полимера в экструзии, может стать определение оптимальных значений, управление и контроль кинематических параметров червяка и начальной температуры смеси. Данная задача большей частью возлагается на систему электропривода червяка. С точки зрения автоматического управления применение регулируемого электропривода экструзионной линии может существенно повысить технико-экономические показатели шинного производства. Однако, применяемые системы электропривода экструдеров построены без учета специфических особенностей технологического процесса шприцевания. Современная теория переработки полимеров находится в стадии совершенствования и уточнения основных количественных аналитических зависимостей между технологическими параметрами. Отсутствует представление данного процесса методами ТАУ. Это обусловлено сложностью самого технологического процесса переработки полимеров. Как показывает практика, для обеспечения стабильного режима работы до сих пор используются модели процесса, построенные на эмпирических зависимостях.

## **1.2. Основные типы экструдеров и требования к их электроприводу**

Широкий ассортимент деталей шин, получаемых методом экструзии, обуславливает необходимость проектирования объектно-ориентированных систем электроприводов червяка. Так, существуют универсальные агрегаты, на которых получают как протекторные заготовки, так и беговые и подбреккерные

ленты. Для такого рода машин характерны механические характеристики червяка, приведенные на рис. 1.5

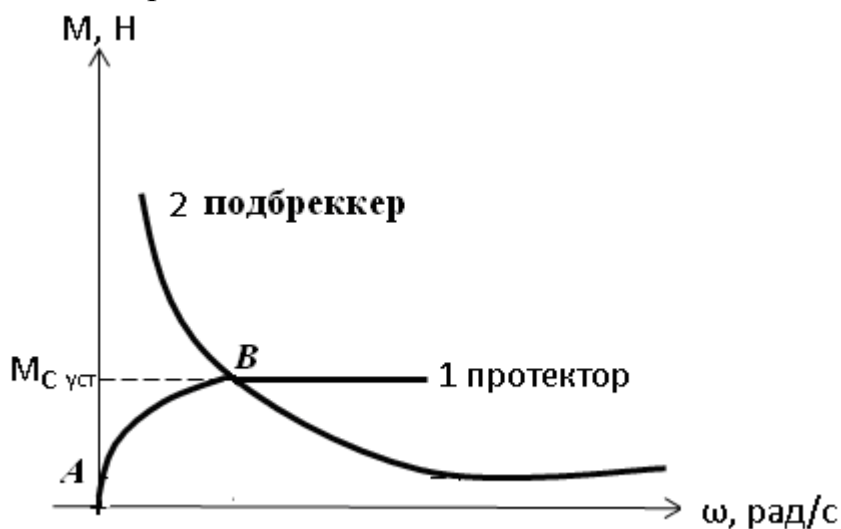


Рис. 1.5. Общий вид механических характеристик экструдеров

В первом случае, при экструзии протекторных деталей (участок А-В кривой 1) механическая характеристика экструдера имеет вид «вентиляторной» нагрузки, т.е. статический момент сопротивления изменяется пропорционально квадрату скорости. В установившемся режиме наблюдается приблизительно постоянный статический момент.

Во втором случае, при производстве подбореккерных лент (кривая 2) экструдер работает по гиперболической характеристике с более низким статическим моментом на более высоких скоростях.

В качестве реального примера рассмотрим экспериментальные характеристики машины МЧХ-250 при переработке резиновых смесей различной степени вязкости, полученные в ходе работ [11] (рис. 1.6).

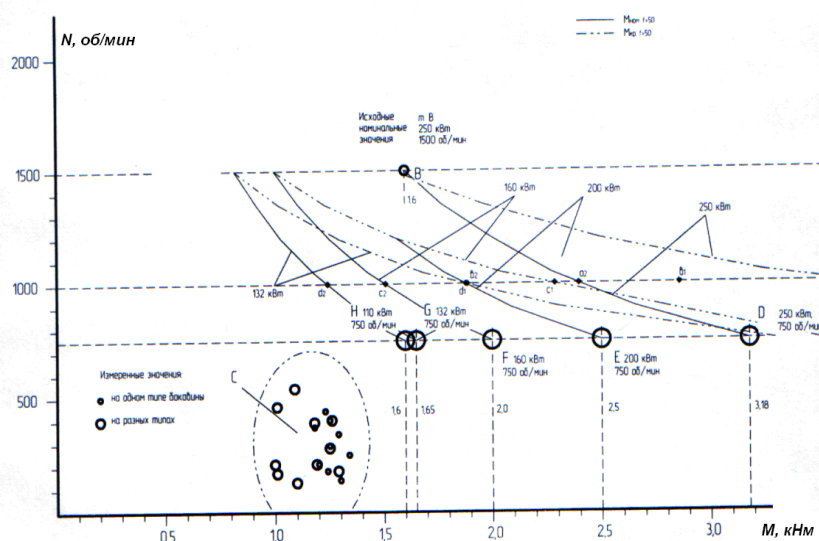


Рис.1.6. Экспериментальная зависимость  $M=f(N)$  электропривода машины МЧХ-250

Анализ технических параметров области «С» показывает, что эксплуатируемый привод работал на скоростях не более 750 об/мин, обеспечивая при этом необходимую компенсацию момента сопротивления на валу червяка экструдера. Из анализа технологических показателей области «С» вытекают следующие требования к приводу, приведенные в [11]:

1) привод должен иметь верхний предел скорости не более 750 об/мин при выпуске основных типов технологических деталей;

2) номинальный момент двигателя проектируемого привода должен иметь величину момента соизмеримую с величиной момента эксплуатируемого двигателя.

3) согласно технологическим требованиям проектируемый двигатель должен иметь возможность работы со скоростями до 1000 об/мин при минимальных нагрузках на валу, т.е. при выпуске вспомогательных деталей.

Рассмотренные случаи указывают на работу экструдера в двух основных режимах: 1) на высоких скоростях с незначительным моментом сопротивления на валу; 2) на малых скоростях с постоянным значением момента (работа «на упор»).

Особенности работы универсальных экструдеров обуславливают применение электропривода червяка с двухзонным регулированием.

Анализ экспериментальных исследований [75] и источников [2, 33, 15, 45, 46] позволил сформулировать основные требования к электроприводам экструдеров: регулирование скорости в диапазоне 1:5 с точностью 0,5 %, а также регулирование момента червяка с точностью 2 % при изменении статического момента до  $\pm 50\%$  от номинального значения. Обеспечение пускового момента при максимальном моменте на валу червяка около 180% номинального. Кроме того, согласно проведенным исследованиям, для минимизации потерь и повышения качества продукции при шприцевании вязкоупругих смесей к экструдеру должны предъявляться следующие требования [68]:

а) время регулирования давления на выходе экструдера должно быть не более  $T_p = 12$  с;

б) допустимые колебания давления при переходном процессе должны составлять не более 20% от установившегося значения;

в) требуемая точность стабилизации давления в установившемся режиме работы не более 2 %.

### **1.3 Обзор существующих систем электроприводов экструдеров в резинотехнической промышленности**

До недавнего времени для привода экструдеров мощностью от 30 до 200 кВт применялись преимущественно электроприводы постоянного тока по системе тиристорный преобразователь - двигатель независимого возбуждения. Одна из таких систем электропривода шприцмашины МЧТ-250, реализованная на базе тиристорного преобразователя серии ТП, применяемого в сборочном производстве ОАО «Нижекамскшина» изображена на рис. 1.7 [9, 90]



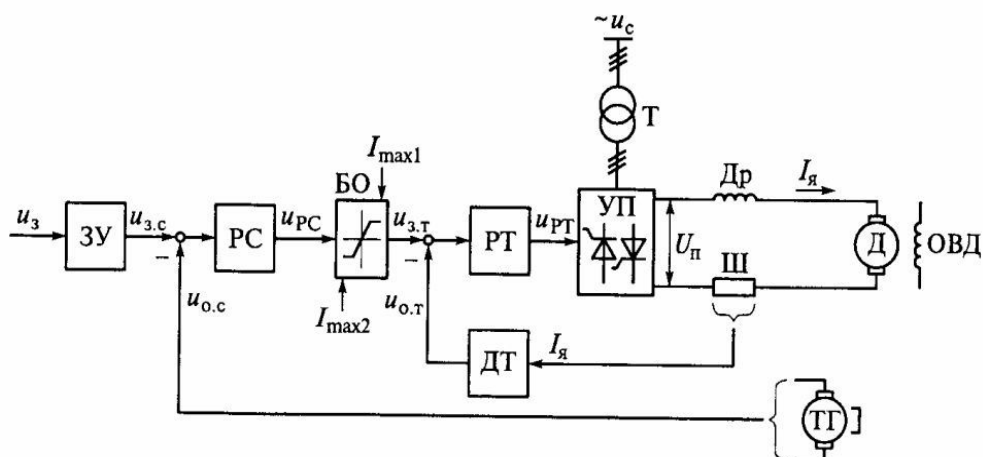


Рис. 1.7. Функциональная схема электропривода постоянного тока с подчиненным регулированием тока и скорости

Двухконтурная система построена по принципу подчиненного регулирования координат, внутренним контуром которой является контур тока, а внешним контур скорости. Электроприводы постоянного тока имеют отличные регулировочные характеристики и обладают малой инерционностью в заданном диапазоне регулирования, их механические характеристики имеют вид прямых с постоянным наклоном во всем диапазоне. Исследования [75], что данные системы автоматического регулирования на базе ПИ-регулятора скорости и П-регулятора тока, полностью соответствовали приведенным выше требованиям. Однако, эксплуатация данных систем сопряжена с большими эксплуатационными затратами ввиду частого выхода из строя машины постоянного тока. Это объясняется быстрым износом коллекторно-щеточного механизма двигателя в условиях агрессивной среды производственных помещений шинного производства, где присутствует токопроводящая мелкодисперсная пыль; повышением энергоемкости привода, ввиду установки громоздкого коллекторно-щеточного механизма для машин большой мощности, а также сложностью подбора соответствующих электрических щеток с учетом их физико-механических характеристик. Кроме того, машина постоянного тока критична к изменению тока якоря в процессе регулирования, что ведет к искрению на коллекторе в связи с влиянием реакции якоря [29, 30, 31]. Все это привело к распространению электроприводов переменного тока с асинхронными двигателями [4].

Для универсальных агрегатов, предназначенных для производства различного типа деталей, решением является применение асинхронных электроприводов с системой векторного управления, позволяющей разделить каналы регулирования и обеспечить независимое управление по модулю вектора потокосцепления ротора и электромагнитному моменту двигателя. Благодаря этому в системах векторного управления появляется возможность реализовать двухзонное регулирование частоты вращения по аналогии с электроприводом постоянного тока, обеспечить стабильность момента электромагнитного двигателя вне зависимости от возмущающего воздействия.

Строгое требование к поддержанию постоянства крутящего момента червяка обусловило применение регулируемого привода с векторным управлением и для экструдеров, перерабатывающих высоковязкие смеси в производстве протекторов грузовых автошин с резкопеременным характером момента нагрузки на валу червяка. Вязкость связывает реологические свойства смеси с конструкционно-технологическими параметрами червячной машины, но корректное определение этого параметра весьма затруднительно [37]. Повышение вязкости материала внутри машины вызвано различными причинами: изменением температуры смеси, гидростатического давления влиянием предыстории деформации и тиксотропных свойств материала на напряжение сдвига (и, следовательно, вязкость); изменением скорости сдвига в зависимости от приложенного напряжения, глубины червячного канала, в случае если геометрия червяка не постоянна по длине [56].

Так, для привода червяка шприцмашины линии производства гермослоя на заводе массовых шин ОАО «Нижекамскшина», используется электропривод фирмы Siemens с векторным управлением с ориентацией по вектору потокосцепления ротора.

Однако, для агрегатов, в которых перерабатываются высоковязкие смеси при производстве деталей протекторов, допустимо использование системы привода с однозонным регулированием (см. рис. 1.6, кривая 1).

В данном случае наряду с векторной системой, применима замкнутая система частотно-токового управления с поддержанием постоянства потокосцепления ротора [88]. Данные системы обеспечивают механические характеристики приводов подобные характеристикам приводов постоянного тока. В данных приводах достигается упрощение системы автоматического управления (САУ) за счет того, что в качестве управляющего воздействия принимается не напряжение АД, а его ток, модуль которого контролируется с помощью внутреннего контура регулирования тока. Контроль положения результирующего вектора тока статора в пространстве в данном случае также не представляет трудностей, так как фаза выходного тока АИТ однозначно определяется состоянием его ключей [30, 87].

## **2. Параметрическая оптимизация технологического процесса экструзии за счет электропривода**

## 2.1 Исходные данные для решения оптимизационной задачи

Для разработки математической модели и решения задачи оптимизации процесса экструзии необходимо определить основные зависимости технологических и энергосиловых параметров процесса, основанных на свойствах полимеров, в частности, резиновых смесей, и поведении их внутри шприцмашины.

Механические свойства полимеров определяют степень перерабатываемости продукта, механизм возникновения и пределы изменения нагрузок червяка, удельные энергозатраты и производительность процесса экструзии. Основываясь на литературных источниках [1, 6, 7, 17, 19, 24, 25, 35, 36, 43, 47, 53, 55, 58, 60, 76, 79, 94, 99], приведем основные свойства резиновых смесей – сырьевого материала для производства профилируемых изделий, которые могут служить исходными данными поставленной задачи.

Основной физической характеристикой резиновых смесей, являются упругая и пластическая деформации материала при его переработке. Уравнение для деформации имеет вид:

$$\gamma = p / G \quad [\text{м}]; \quad (2.1)$$

где  $p$  – приложенное механическое напряжение,  $G$  – модуль упругости. Это уравнение известно как закон Гука. Графически закон Гука можно изобразить в виде прямой, иллюстрирующей пропорциональную связь между напряжением и деформацией (рис. 2.1, кривая 1).

После достижения предела текучести  $p \geq p_t$ , для дальнейшего увеличения деформации не требуется увеличения напряжений. На графике рис. 2.1 эта особенность приводит к появлению вертикального участка на кривой 2.

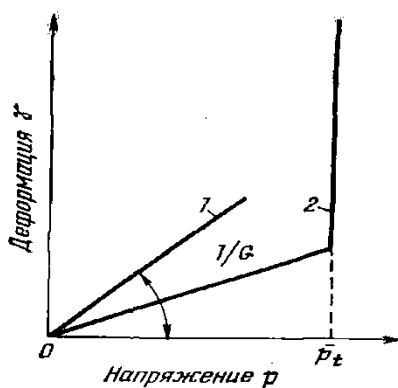


Рис. 2.1. Графики деформации упругого (1) и пластического (2) материала

При тчении расплавленной смеси деформация и скорость сдвига определяют важнейший параметр смеси – вязкость расплава  $\eta$  [Па с]. В зоне выдавливания этот параметр определяет величину сопротивления расплава течению под действием внешней силы. Количественно сдвиговая вязкость определяется как отношение приложенного напряжения к скорости сдвига:

$$\eta_{\text{сд}} = \frac{p}{\dot{\gamma}} \text{ [Па с]}. \quad (2.2)$$

Зависимость вязкости от скорости сдвига определяет реологический класс жидкости. Так, существует класс «ньютоновских» жидкостей, вязкость которых не зависит от скорости сдвига, сюда относятся низкомолекулярные жидкости с низкой вязкостью, а также большинство газов.

Применительно к данной задаче закон Ньютона записывается в виде:

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{p}{\eta} \quad (2.3)$$

где  $\dot{\gamma}$  - скорость сдвига;  $\eta$  - коэффициент вязкости.

Графически закон Ньютона изображается прямой линией с угловым коэффициентом, равным  $1/\eta$  (прямая 1 на рис. 2.2). Существует большой класс жидкостей, у которых скорость сдвига увеличивается быстрее, чем напряжение сдвига. Такие жидкости принято называть «аномально-вязкими», к числу которых и относятся резиновые смеси. Типичная зависимость (кривая течения) для жидкости такого типа изображена на рис. 2.2 (кривая 2). По аналогии с «ньютоновскими» жидкостями можно считать, что в любой точке кривой 2 величина скорости сдвига по-прежнему определяется выражением (2.3). При этом коэффициент вязкости уже утрачивает значение константы, а сам, в свою очередь, зависит от скорости (или напряжения) сдвига. В этом случае его принято называть «эффективной вязкостью» и обозначать  $\eta_{\text{эф}}$ . Для иллюстрации изменения эффективной вязкости в зависимости от напряжения сдвига на рис. 2.2 проведена серия пунктирных прямых, угловым коэффициент которых пропорционален текучести. Видно, что по мере удаления от точки, соответствующей началу аномального поведения ( $p_0$ ), значение эффективной вязкости все время уменьшается. [94]

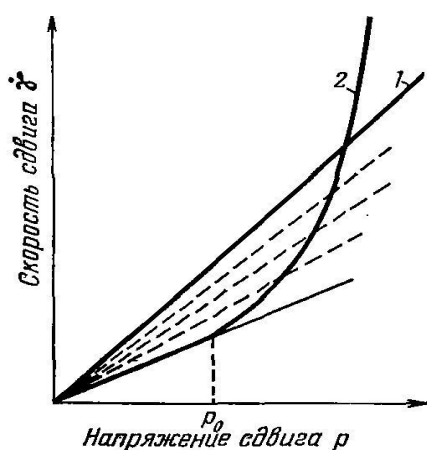


Рис. 2.2. Кривые течения: 1 – Ньютоновская жидкость; 2 – аномально-вязкая жидкость

Для математического описания аномально-вязких жидкостей применяется так называемый степенной закон вида:

$$\dot{\gamma} = (p/\mu)^n \text{ или } p = \mu(\dot{\gamma})^{1/n}. \quad (2.4)$$

Значение  $n$  называется индексом течения, и по определению, равно производной для соответствующего участка логарифмической кривой течения:

$$n = d(\lg \dot{\gamma}) / d(\lg p) \quad (2.5)$$

Для ньютоновских жидкостей  $n=1$ , для большинства полимеров этот показатель колеблется от 1 до 5.[79, 94]

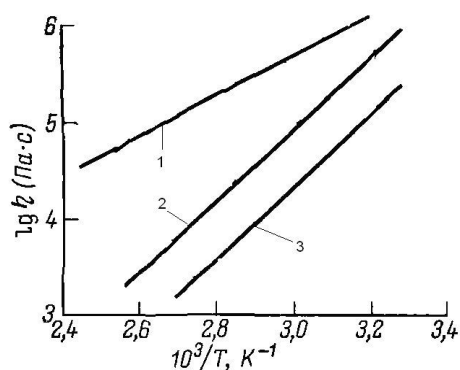
Экспериментальные исследования влияния давления на вязкостные свойства позволяют говорить о так называемом пьезоэффekte вязкости [торнер], который у расплавов полимеров выражен значительно сильнее, чем у низкомолекулярных жидкостей. Так, при изменении гидростатического давления от 35 до 175 МПа эффективная вязкость полиэтилена, определенная при температуре 423 К и скорости сдвига  $50 \text{ с}^{-1}$ , увеличилась в 5,6 раза [94]. Эффективная вязкость полистирола, определенная при температуре 469 К и скорости сдвига  $70 \text{ с}^{-1}$ , при повышении давления от 14 до 175 МПа возросла в 135 раз.

Изменение температуры увеличивает кинетическую энергию теплового движения, увеличивая тем самым пластичность и уменьшая вязкость смеси. В соответствии с теорией Френкеля — Эйринга температурная зависимость вязкости при постоянстве напряжения сдвига имеет вид [94]:

$$\eta_{эф} = A_{\eta} \cdot \exp\left(\frac{E}{RT}\right) \quad (2.6)$$

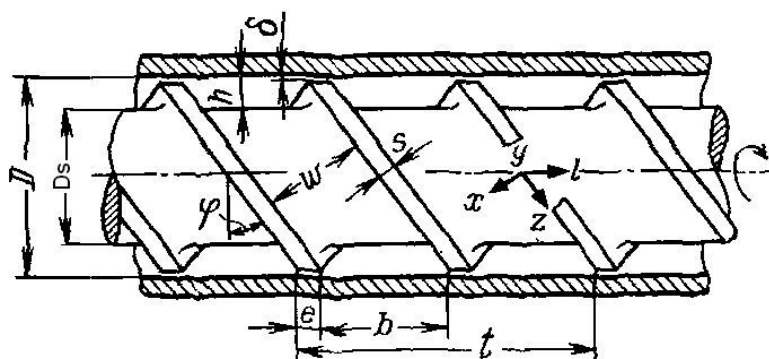
где  $A_{\eta}$  – коэффициент, зависящий от молекулярной природы жидкости,  $E$  – энергия активации вязкого течения. Для большинства резиновых смесей на основе синтетических и натуральных каучуков значение  $E$  лежит в пределах 40 – 60 кДж/моль (Торнер, с 71);  $R$  – газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль К);  $T$  – абсолютная температура полимера.

Данная зависимость хорошо согласуется с экспериментальными данными, представленными в [17, 25, 94] и графиками зависимостей  $\lg \eta$  от  $1/T$ . (рис. 2.3)



**Рис 2.3.** Зависимость логарифма вязкости от обратной температуры: 1 – смесь на основе натурального каучука, 2 – смесь европрен-1500, 3 – СКС-30.

Сделаем отступление и рассмотрим геометрию червяка и форму выходной головки, применив схему червяка с двухзаходной нарезкой, приведенную на рис.6.



**Рис.2.4.** Геометрия червяка и схема расположения координатных осей

В схеме приняты следующие обозначения:  $D_s$  – диаметр сердечника червяка,  $D$  – диаметр цилиндра,  $\delta$  – зазор между гребнем винтовой нарезки и цилиндром,  $h$  – зазор между сердечником червяка и поверхностью цилиндра,  $\varphi$  – угол подъема винтовой линии,  $w$  – ширина канала червяка,  $s$  – толщина лопасти червяка,  $e$  – аксиальная ширина лопасти червяка,  $b$  – аксиальная ширина лопасти червяка,  $t$  – шаг винтовой нарезки. Система координат  $x$ ,  $y$ ,  $z$  неподвижна, ось  $z$  ориентирована вдоль оси винтового канала червяка, вспомогательная ось  $l$  – направлена вдоль оси червяка.

Технологические параметры экструзии зависят от механических и реологических свойств резиновых смесей и определяют энергосиловые характеристики процесса. К ним следует отнести распределение давлений смеси, температурное поле вдоль червяка, скорость шприцевания, сопротивление формующей головки. В состав выражений, определяющих технологические параметры экструзии, также входят геометрические константы червяка, цилиндра (канала) и формующей головки.

Интенсивность течения смеси, а также величину *прямого* и *обратного* потоков смеси определяет форма головки. Наличие обратного потока (противотока) обусловлено тем, что не вся смесь проходит через фильеру в виду разности размеров входного и выходного отверстий головки. При экструзии высоковязких полимеров и, прежде всего, резиновых смесей коэффициент сопротивления головки должен быть минимальным.[12, 63] В случае «листовальных» головок необходимо также обеспечить равномерные поля давлений перед формующей щелью (фильерой). Оба эти требования в определенной мере удовлетворяются применением клиновых «листовальных» головок с минимальным путем потока, называемых иногда «рыбий хвост». Схема такой головки показана на рис 2.5. Особенность головок этого типа состоит в том, что линии тока в них распределены более равномерно, чем в коллекторных головках. Поэтому в таких головках легче избежать появления так называемых мертвых зон.[94]

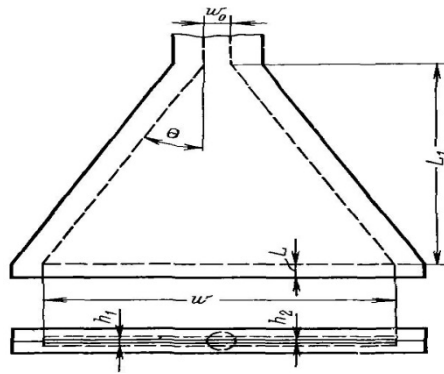


Рис. 2.5 Формующая головка «Рыбий хвост»

Основными параметрами головки являются: высота сечения подводящего канала  $h_1$ , высота щели  $h_2$ , длина губок головки  $l$ , длина головки  $L_1$ , угол клина  $\theta$ , ширина щели  $w$ , ширина входного отверстия  $w_0$

Коэффициент сопротивления головки протекторного типа определяется выражением [24, 25]:

$$K_g = wh_2^3 / 12L_1. \quad (2.7)$$

Отношение  $h_2/w$  определяет коэффициенты прямого  $F_a$  и обратного  $F_p$  потоков в головке [17, 94]

Скорость шприцевания  $v_s$  - технологический параметр, определяющий интенсивность течения смеси из головки, с достаточной для инженерных расчетов точностью может быть определен по эмпирической формуле [25]:

$$v_s = Q / A'(F_0\rho), \quad (2.8)$$

где  $F_0$  – площадь отверстия профилирующей головки,  $\rho$  – плотность смеси,  $A'$  – постоянная, зависящая от геометрии экструдера.

Суммируя приращения давлений по участкам, определяем фактическое давление на выходе из червяка. Считая, что давления на выходе из червяка и на входе в формующую головку равны, можно рассчитать суммарный перепад давлений в экструдере по упрощенной формуле [25]

$$\Delta P = \frac{F_a \alpha N^{1/n}}{\frac{K_g}{\eta_{эф}} + \frac{F_p \beta}{\eta_{эф} L}}, \quad (2.9)$$

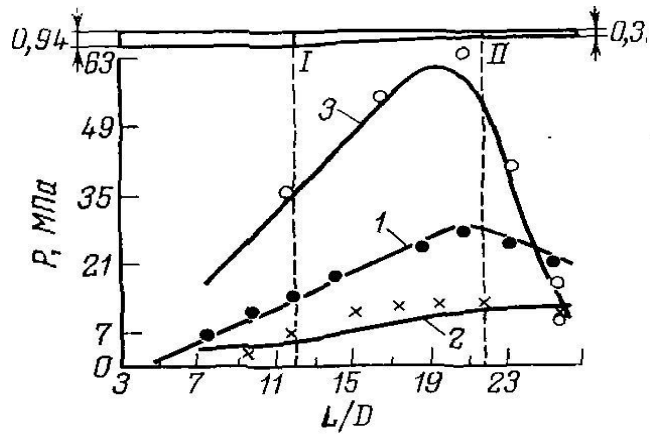
где  $\alpha$  и  $\beta$  функции геометрических параметров экструдера, определяемых выражениями:

$$\alpha = \frac{\pi^2 D^2 h_{cp} \sin \varphi \cos \varphi}{2} \left(1 - \frac{2\delta}{D} - \frac{ei}{\pi D \sin \varphi}\right) \left(1 - \frac{\delta}{h_{cp}}\right) F_a, \quad (2.10)$$

$$\beta = \frac{\pi D h_{cp}^3 \sin^2 \varphi}{12} \left[1 - \frac{2\delta}{D} - \frac{ei}{\pi D \sin \varphi}\right] \left[1 + \left(\frac{\delta}{h_{cp}}\right)^3 \left(\frac{w}{e}\right) \left(\frac{1}{\sin \varphi \cos \varphi}\right)\right] F_p, \quad (2.11)$$

где  $h_{cp}$  – средняя глубина канала червяка.

Рассчитанные таким образом поля давления приведены на рис.2.6 в сравнении с экспериментальными данными [94].



**Рис. 2.6.** Экспериментальные данные (точки) и расчетные кривые распределения давлений: 1 – полиэтилен низкой плотности, 2 – полипропилен, 3 – непластифицированный поливинилхлорид, по оси абсцисс отложено  $L/D$  – расстояние от загрузочной воронки в шагах, сверху приведен размер сердечника червяка

Анализ выражения (2.9) указывает на степенную зависимость давления от частоты вращения червяка, а также на косвенную зависимость давления от температуры, которая в общем случае также не постоянна, а является функцией скорости вращения червяка, геометрии рабочих органов, теплофизических свойств смеси, термодинамического режима работы и производительности машины:

$$T(l) = T_0 + \frac{1}{\alpha_t} \ln(1 + \mu_0 A \alpha_t N^{1+1/n} k l_0 / (Q \rho c)) \quad (2.12)$$

где  $A$  – коэффициент теплового рассеяния;  $l_0$  – продольная координата нормального сечения, изменяющаяся в пределах  $0 \leq l_0 \leq l_d$ ;  $Q$  – объемная производительность экструдера;  $\rho$  – плотность смеси;  $c$  – удельная теплоемкость смеси;  $k$  – коэффициент политропичности, определяющий термодинамический режим процесса: при  $k = 1$  – процесс адиабатный,  $k > 1$  – процесс с подводом тепла извне, при  $k < 1$  – процесс с отводом тепла.

Температура расплава на выходе из червяка также подсчитывается из выражения (2.15), только в этом случае вместо текущей координаты  $l$  подставляется значение фактической длины зоны дозирования  $l_d$ . [94]

Для расчета энергосиловых характеристик экструзии широкое распространение получила гидродинамическая теория шприцевания [74], позволяющая рассчитывать производительность червячных машин и потребляемую в процессе шприцевания мощность по их конструктивным и технологическим характеристикам. Однако на практике взаимный учет характеристик перерабатываемого материала и технологического процесса является довольно затруднительным, что может привести к ошибкам при расчете производительности и потребляемой мощности. Если для пластических масс в ряде случаев обеспечивается высокая точность расчета с помощью гидродинамической теории, то для резиновых смесей из-за ярко выраженных высокоэластических свойств и высокой вязкости подобная



точность не обеспечивается. Более высокая точность достигается при использовании эмпирических и полуэмпирических зависимостей.[24, 25,74]

Дадим определения основных понятий, используемых далее для установления связей между физико-химическими параметрами перерабатываемой смеси и энергосиловыми параметрами электропривода.

**Производительность.** Согласно [25], если противодействие, создаваемое головкой отсутствует, то вынужденный поток определяет производительность машины. При постоянной глубине и ширине винтового канала (постоянном шаге  $t$ ) и постоянной температуре расплавленного или вязкотекучего материала производительность  $Q_d$  (объемный расход) выражается упрощенной формулой:

$$Q_d = A_3 N, \quad (2.13)$$

где  $Q_d$  - расход, определяемый вынужденным потоком;  $A_3$  – постоянная, зависящая от геометрии экструдера.

Данное упрощенное выражение показывает, что расход, определяется вынужденным потоком при свободном выходе и отсутствии сопротивления головки, и не зависит от аномально-вязкого поведения смеси. Как уже отмечалось, при наличии формующей головки на выходе возникает противоток смеси, обусловленный наличием противодействия. При этом полимер начинает перемещаться в зазорах между гребнем нарезки червяка и корпусом (поток утечки) в направлении, обратном вынужденному потоку. Противоток изменяет профиль скоростей в канале и приводит к увеличению интенсивности циркуляции поперек канала [25, 92]. При этом противоток определяется следующим соотношением:

$$Q_p = B_3 \Delta P / \eta_{эф}, \quad (2.14)$$

где  $B_3$  – постоянная зависящая от геометрии экструдера,  $\Delta P$  – перепад давлений в головке. Интенсивность потока утечки  $Q_{ут}$  также пропорциональна  $\Delta P$  и обратнопропорциональна  $\eta_{эф}$ .

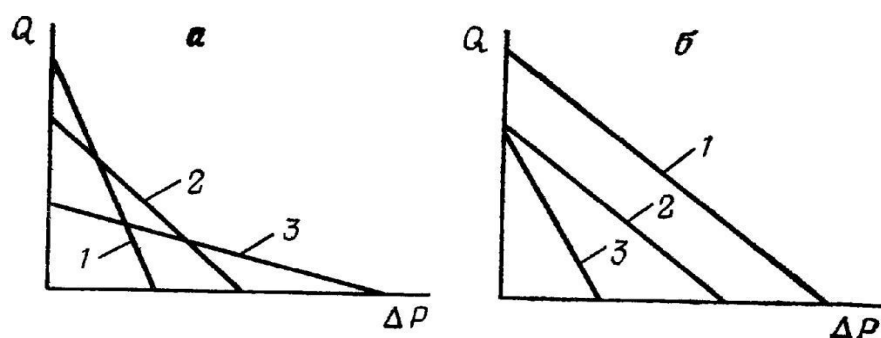
В этом случае суммарная производительность может быть выражена:

$$Q_\Sigma = Q_d - Q_p - Q_{ут}. \quad (2.15)$$

Поток утечки в червячных машинах при переработке высоковязких материалов, таких, как резиновые смеси, невелик, и может не учитываться [1,8 Востр черв маш]. Тогда:

$$Q_\Sigma = A_3 N - B_3 \Delta P / \eta_{эф}. \quad (2.16)$$

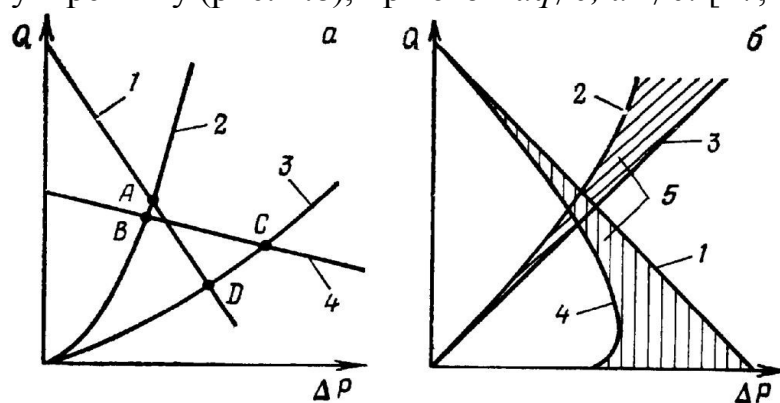
Уравнение (2.16) – как функция перепада давления – есть уравнение прямой с угловым коэффициентом  $B_3/\eta_{эф}$ , определяющим интенсивность снижения производительности при повышении давления. Это иллюстрируется зависимостями  $Q=f(\Delta P)$ , называемыми характеристиками червяка (см. рис. 2.7).



**Рис. 2.7.** Характеристики червяка: а) 1 – глубокий канал; 2 – базовая характеристика; 3 – мелкий канал; б) 1 – увеличенная скорость; 2 – базовая характеристика; 3 – повышенная температура корпуса червяка или экструдата.

Из графика видно, что увеличение скорости вызывает смещение характеристики вверх, а увеличение глубины канала, также как и повышение температуры, повышает крутизну характеристики. Это обусловлено тем, что с увеличением глубины канала вынужденный противоток возрастает, но медленнее, чем возрастает противоток. [25, 74]

Важно также учесть, в каком термодинамическом режиме протекает процесс. Если обозначить количество передаваемого тепла через  $dq$ , то при адиабатическом процессе  $dq=0$ , при изотермическом процессе ( $T=const$ )  $dT=0$ . Такой процесс в реальных червячных машинах с внутренними тепловыделениями, особенно при переработке резиновых смесей, должен так балансироваться путем интенсивного теплообмена, чтобы температура по зонам оставалась неизменной. Однако, большинство процессов экструзии протекает не адиабатически и не изотермически, а по промежуточному «политропическому» режиму (рис. 2.8), при этом  $dq \neq 0$ ,  $dT \neq 0$ . [17, 25, 94]



**Рис. 2.8.** Характеристика червяка (1,4) и головки (2,3) при политропическом (а), а также изотермическом и адиабатическом (б) режимах: а) 1 – червяк с глубоким каналом; 2 – головка с большим сечением; 3 – головка с малым сечением; 4 – головка с мелким каналом; б) 1,3 – изотермический режим; 4 – адиабатический режим; 5 – политропические области

Наиболее точные результаты для машин теплого питания при политропическом режиме экструзии дает формула, учитывающая конструкцию червяка и головки экструдера, а также влияние эффективной вязкости [25]:

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 k_n h_{cp} N \sin \varphi \cos \varphi}{2} \left(1 - \frac{ie}{t}\right) F_a - \frac{\pi^2 k_o D h_{cp}^3 \varphi \sin^2 \varphi \Delta P}{12 \eta_{\text{эф}} L} \left(1 - \frac{ie}{t}\right) F_p. \quad (2.17)$$

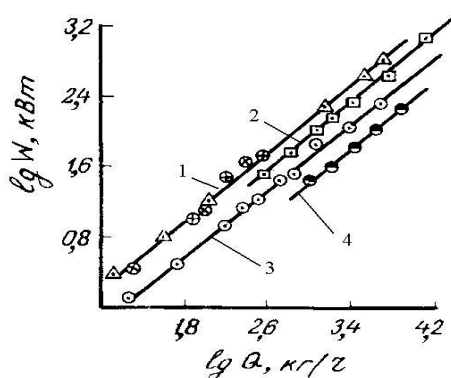
Данное выражение хорошо соотносится с экспериментальными данными для машин теплого питания типа МЧТ при введении дополнительных коэффициентов  $k_n$  и  $k_o$ , учитывающих потери прямого и обратного потока.

**Потребляемая мощность.** При обработке резиновой смеси в червячных машинах определенной конструкции к ней, независимо от диаметра червяка, должна быть приложена одна и та же деформация. В то же время для обеспечения оптимальных условий обработки температура смесей должна быть одинаковой для машин различных размеров, в результате смеси одного состава будут иметь одну и ту же вязкость, необходимую для осуществления переработки на машине. Потребляемая мощность пропорциональна вязкости смеси, частоте вращения червяка и диаметру червяка в третьей степени, то есть пропорциональна производительности машины и вязкости. Таким образом, потребляемую мощность можно рассчитать по упрощенной формуле [74]:

$$W = C_w \cdot Q, \quad (2.18)$$

где  $C_w$  – константа, определяемая геометрией рабочих органов машины, пропорциональная максимальной вязкости перерабатываемых смесей.

В [74] приведены результаты проверки справедливости данного уравнения для различных машин. Были получены зависимости  $\lg W - \lg Q$ , представляющие собой прямые с тангенсом угла наклона, равным 1 (рис. 2.9)



**Рис. 2.9.** Зависимость потребляемой мощности червячных машин различных типов от их производительности: 1 – машины холодного питания фирмы «Трестер» (ФРГ) и «Андуарт» (Франция), 2 – Машины типа «Трансфермикс»; 3,4 – машины теплого питания «Трестер» и «Берсторфф» (ФРГ)

В машинах теплого питания потребляемая мощность практически эквивалентна энергии, выделяемой при переработке смеси, а мощность привода максимальному значению этой энергии [74], поэтому потребляемую мощность в машинах теплого питания можно приравнять к мощности привода.

Для расчета мощности привода одношнековых экструдеров удовлетворительные результаты дает формула, учитывающая геометрию рабочих органов экструдера, а также колебания вязкости смеси при

переработке в каналах червяка и зазоре между стенкой цилиндра и витками червяка [47]:

$$W_{\text{п}} = \frac{\pi^2}{2} D^2 N h_{\text{cp}} \Delta P \operatorname{tg} \varphi + \pi^3 D^2 N^2 \bar{\eta}_{\text{эф}} L_2 \frac{D}{h_{\text{cp}} \cos \varphi}. \quad (2.19)$$

**Крутящий момент червяка.** Установлено, что если при переработке определенного материала заданным червяком, варьируется число оборотов  $N$ , то потребляемая мощность привода изменяется в зависимости от условий работы. При этом давление и средняя вязкость смеси в общем случае не остаются постоянными.

При изотермическом режиме  $W$  растет пропорционально  $N$  [47]:

$$W_{\text{изот}} = C_w \eta N^2. \quad (2.20)$$

В данном случае крутящий момент

$$M_{\text{к.изот}} = \frac{W_{\text{изот}}}{N} = C_w \eta N. \quad (2.21)$$

изменяется пропорционально частоте вращения червяка.

При адиабатическом режиме работы в первом приближении [] имеем

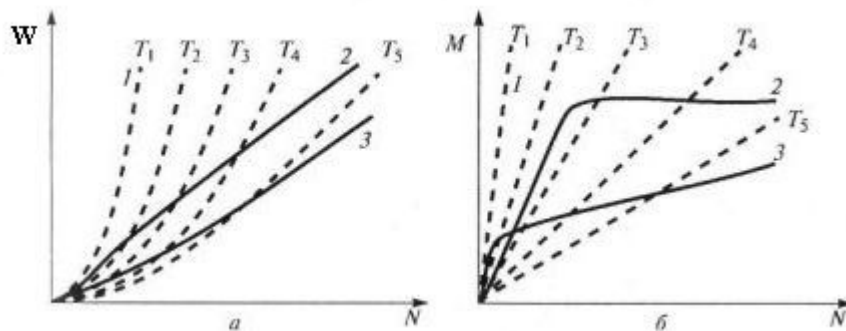
$$W_{\text{п.адиаб}} = C_w \eta N^{\nu}. \quad (2.22)$$

Тогда, крутящий момент определится

$$M_{\text{к.адиаб}} = \frac{W_{\text{адиаб}}}{N} = C_w \eta N^{\nu-1}, \quad (2.23)$$

где  $\nu$  - показатель роста  $N$  при политропическом процессе.

Определено, что в случае указанного режима мощность привода при малом числе оборотов червяка повышается пропорционально  $N^2$ , а при большей частоте вращения – пропорционально  $N$ . Отсюда следует, что в данном случае крутящий момент на валу шнека при малых частотах вращения, растет пропорционально  $\nu$ , в то время как при больших частотах остается постоянным. На (рис.2.10) приведены зависимости потребляемой мощности привода и крутящего момента от числа оборотов при изотермическом, адиабатическом и политропическом режимах работы. Такая зависимость наблюдается при экструзии резиновых смесей.



**Рис. 2.10.** Зависимость потребляемой мощности (а) и крутящего момента (б) от числа оборотов: 1 – при изотермическом (при различных значениях температуры  $T$ ), 2 – при адиабатическом, 3 – при политропическом режимах работы одношнекового экструдера

**Качество экструдата.** Одним из способов контроля качества экструдата, описанных в п. 1.2, настоящей работы является поддержание постоянной степени пластикации смеси в ходе ее переработки. В качестве параметра состояния, описывающего степень пластикации экструдата, в работах [1,76] принималась величина суммарного сдвига:

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_p \tau_s + \dot{\gamma}_g \tau_g, \quad (2.24)$$

где суммарная величина сдвига в каналах червяка определяется следующим образом [1, 76]:

$$\dot{\gamma}_{\text{ш}} = \dot{\gamma}_p \tau_s, \quad (2.25)$$

где  $\dot{\gamma}_p$  – расчетная скорость сдвига в каналах шнека,  $\text{с}^{-1}$  [1,76];

$$\dot{\gamma}_p = \frac{\omega \left( \frac{1}{n} + 1 \right)}{h_{\text{ср}}}, \quad (2.26)$$

$\tau_s$  – время пребывания перерабатываемого материала в материальном цилиндре:

$$\tau_s = \frac{w h_{\text{ср}} L_1}{Q \sin \varphi}. \quad (2.27)$$

Величина сдвига в формующем канале экструзионной головки определяется следующим образом:

$$\dot{\gamma}_g = \frac{2Q(n+2)}{w_g h^2}. \quad (2.28)$$

Время пребывания перерабатываемого материала в канале головки:

$$\tau_g = \frac{h w L}{Q}. \quad (2.29)$$

На практике более удобным критерием оценки качества продукта, учитывающим степень пластикации и вязкоупругие свойства экструдата и деформации, является модифицированный критерий неустойчивости потока экструдированного полимера, по значению которого можно прогнозировать шприцуемость экструдата в баллах (наихудшая шприцуемость – высший балл) [25]. Модифицированный критерий неустойчивости потока имеет вид:

$$N_s = \frac{M_w \lambda_p^{\text{эф}} v_s}{\dot{\gamma} D}, \quad (2.30)$$

где  $M_w$  – среднемассовая молекулярная масса эластомера;  $\lambda_p^{\text{эф}}$  – время релаксации деформаций, физически характеризующее диссипативные (механические) потери на теплообразование. Время релаксации быстрых деформаций можно определить по формуле:

$$\lambda_p^{\text{эф}} = \eta_{\text{эф}} / G. \quad (2.31)$$

Качество профилируемых изделий является обратной величиной критерию неустойчивости:

$$Ks = \frac{1}{N_s} \cdot \quad (2.32)$$

Формула (2.30) показывает, что при фиксированных условиях шприцевания и примерно одинаковой молекулярной массе критическое значение  $N_s$  достигается тем быстрее, чем больше  $\lambda^{\text{эф}}_p$  и меньше  $\gamma$ . К примеру, для смесей на основе диенового синтетического каучука  $N_s$  больше, чем у других каучуков, чем и можно объяснить его плохую шприцуемость (дробление струи экструдата, сильную шероховатость поверхности и разрывы кромок протекторных заготовок). Правая часть формулы (2.30) содержит в числителе величину скорости экструзии. Очевидно, что увеличение скорости экструзии ведет к увеличению  $N_s$ , а уменьшение - к снижению пластичности экструдата.

Таким образом, формулы (2.6 – 2.13), (2.17), (2.19), (2.24 – 2.32) представляют собой математическую модель процесса экструзии с учетом качества экструдированного продукта. Модель показывает взаимосвязь многих параметров, основными из которых являются скорость шприцевания, давление и температура смеси, потребляемая мощность, производительность, скорость вращения червяка и момент вращения на валу червяка.

## 2.2. Исследования влияния параметров привода на процесс экструзии

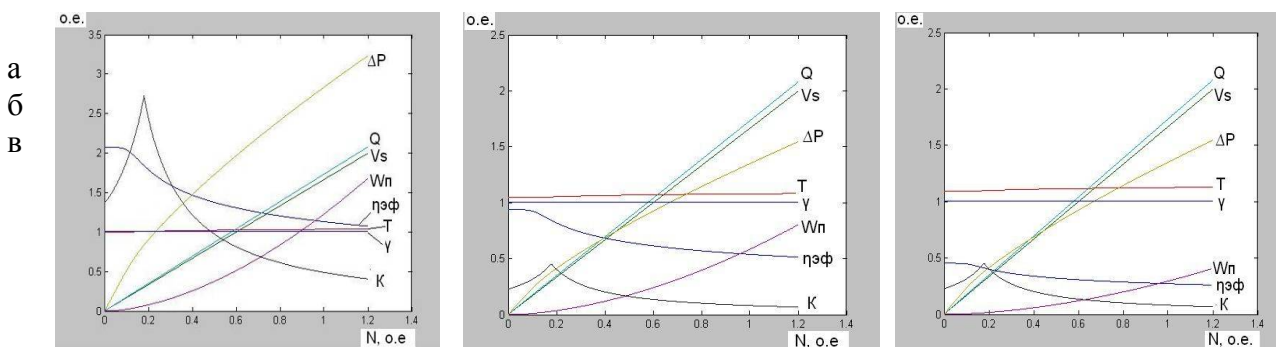
Анализ дефектов профилированных деталей, полученных шприцеванием резиновых смесей на шприцмашине МЧТ-250 на предприятии ОАО «Нижекамскшина» показал, что такие дефекты заготовок, как «пористость», «пузыри», «рваные кромки», «шероховатая поверхность» связаны с колебаниями таких параметров как температура смеси, скорость шприцевания, а так же флуктуациями давления на выходе экструдера.

Ранее было показано, что главным органом экструдера является червяк (см. рис. 1.1), обуславливающий энергопотребление машины, обеспечивающий производительность и степень гомогенности рабочей смеси в процессе переработки материала, а также выходное давление и температуру экструдата в головке, и как следствие, качество производимого изделия. Для оценки возможности получения качественного продукта путем управления координатами привода червяка, рассмотрим влияние указанных параметров на технологические характеристики процесса. Регулирование данных параметров определяется системой электропривода, которая в общем случае должна быть построена с учетом специфических требований со стороны рабочего механизма.

Рассмотрим влияние скорости и момента привода МЧТ-250 на примере экструзии резиновой смеси 4НК-971 для производства протекторов со следующими теплофизическими и реологическими свойствами:  $\rho = 1200 \text{ кг/м}^3$ ;  $\lambda = 0,22 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$ ;  $c = 2200 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{°C)}$  в политропическом режиме экструзии ( $\mu_0 = 40 \text{ кПа}\cdot\text{сн}$ ;  $n = 0,225$ ;  $K$ ;  $T_{\text{ц}} = 353 \text{ К}$ ) и различных температурах входной смеси  $T_{\text{лвх}} = 330 \text{ К}$ ,  $T_{\text{лвх}} = 345 \text{ К}$ ;  $T_{\text{лвх}} = 360 \text{ К}$ .

Результаты исследования влияния скорости вращения червяка на процесс экструзии и качество экструдата при различных температурах смеси, поступающей в экструдер, приведены в виде зависимостей реологических, технологических и энергосиловых параметров от скорости вращения червяка в относительных единицах на рис. 2.11 (а – в).

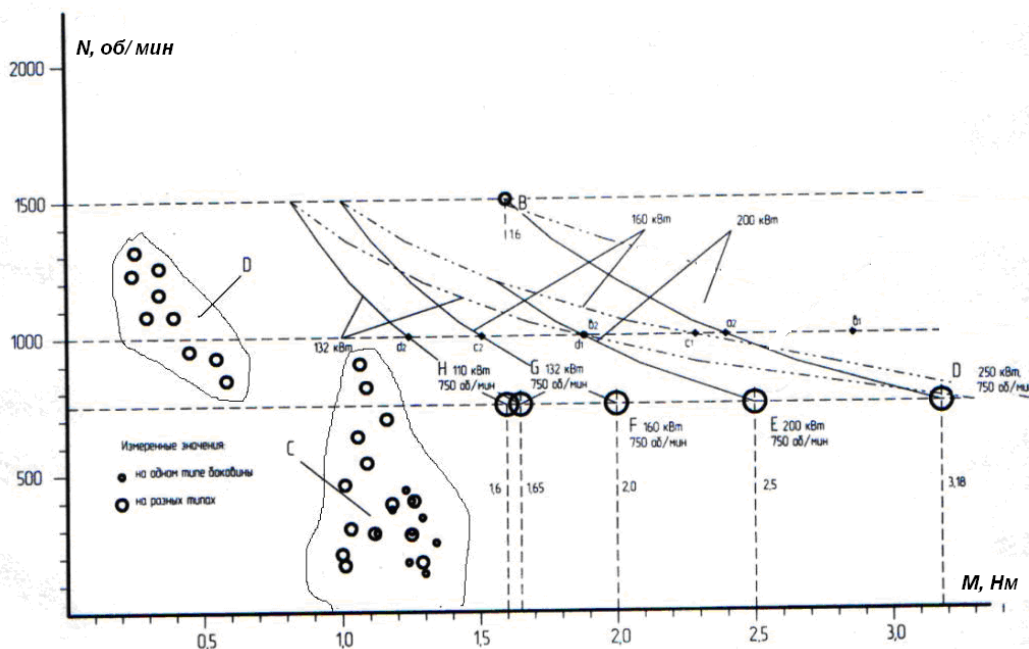
Из диаграмм видно, что максимально качественный экструдат получается при низких скоростях вращения червяка. С ростом температуры смеси, качество снижается, что обусловлено прямой зависимостью критерия подвулканизации смеси от температуры [1,76]. Изменение температуры практически не зависит от скорости. Но время релаксации снижается с ростом скорости, в связи с уменьшением эффективной вязкости, при этом критерий неустойчивости течения увеличивается, а качество экструдата снижается.



**Рис.2.11.** Графики зависимостей реологических, технологических и энергосиловых параметров от скорости вращения червяка при входной температуре смеси:  
а)  $T=330$  К, б)  $T=345$  К, в)  $T=360$  К.

Производительность увеличивается пропорционально скорости при любой температуре, но большее значение принимает при температуре 360 К, что связано с уменьшением давления при высокой температуре. Давление смеси, в свою очередь, изменяется в обратной от вязкости зависимости.

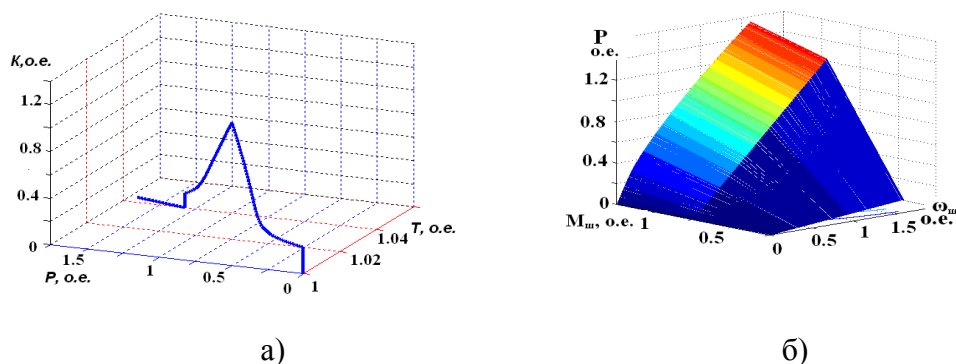
Потребляемая мощность растет в параболической зависимости от скорости вращения червяка. При этом, как видно на экспериментальных характеристиках, работа привода осуществляется в области «С» [11] с примерно постоянным значением статического момента (рис. 2.12).



**Рис. 2.12.** Экспериментальные нагрузочные характеристики приводов экструдеров типа МЧТ

При изготовлении боковых и подбреркерных лент покрышек, рабочие точки образуют область D в области высоких скоростей вращения червяка. В указанной области работа экструдера происходит при постоянстве потребляемой мощности и низких значениях момента нагрузки.

Для реализации системы управления экструдером целесообразно регулирование одного или нескольких основных технологических параметров, влияющих на качество и производительность процесса экструзии. Из анализа полученных зависимостей рис. 2.11 и рис. 2.13 для политропического режима, можно сделать вывод, что из двух основных технологических параметров – давления и температуры – наиболее существенное влияние на качество и производительность процесса оказывает давление смеси. Из графика (рис. 2.13, а) видно, что экстремум функции качества наблюдается при оносительном значении давления  $p = 1$  о.е.. Увеличение давления приводит к разбуханию и



**Рис. 2.13.** Графики исследования процесса экструзии: а) зависимость показателя качества  $K$  от давления  $P$  и температуры  $T$  смеси; б) зависимость давления  $P$  от скорости  $\omega_{ш}$  и момента  $M_{ш}$  на валу червяка



дальнейшим разрывам экструдата при выходе из фильеры вследствие действия вынужденных процессов релаксации (рис. 1.2.), качество продукта падает. При меньших значениях давления наблюдаются волнистость и пористость экструдата, вследствие образования «пустот» в рабочей массе, куда могут проникнуть воздух и газы, выделяющиеся при переработке из-за недостаточной плотности потока смеси в формирующей головке. Таким образом, задача минимизации критерия неустойчивости течения при экстремуме целевой функции сводится к обеспечению постоянства требуемого давления смеси в формирующей головке экструдера.

Зависимость давления от варьируемых параметров  $M_{ш}$  и  $\omega_{ш}$  приведена на рис. 2.13, (б). Видно, что с ростом частоты вращения и момента на валу червяка давление неуклонно растет. Данное обстоятельство позволяет оценить статическую связь давления и параметров привода. В окрестности точки максимума, рассмотрим малое изменение давления  $\Delta P$ , которому соответствуют малые приращения частоты вращения червяка  $\Delta\omega$  и момента  $\Delta M$ . Считая  $M=const$ , определим коэффициент передачи экструдера по скорости:

$$K_{\omega} = \frac{\Delta P}{\Delta\omega} [\text{Па/м}]. \quad (2.48)$$

Аналогично, при  $\omega=const$ , коэффициент передачи по моменту:

$$K_m = \frac{\Delta P}{\Delta M} [\text{Па/Нм}]. \quad (2.49)$$

Полученные зависимости позволяют представить экструдер в статике в виде объекта управления со следующей структурой (рис. 2.14):

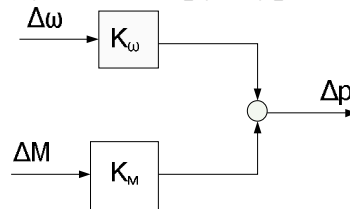


Рис. 2.14. Упрощенная структурная схема экструдера как объекта управления

Однако, для полного удовлетворения требований к работе экструдера, требуется определение связи давления с параметрами привода в динамических режимах.

### 2.3. Постановка и решение задачи параметрической оптимизации процесса экструзии

В условиях экструзии полимерных материалов оптимизация представляет многокритериальную задачу с определением оптимальных значений нескольких варьируемых параметров. Данная задача может быть решена путем применения алгоритмов оптимизации, основанных на использовании производных и текущих значений минимизируемой функции нескольких параметров, при этом на варьируемые параметры должны быть наложены

ограничения в виде параметрических границ. В этих условиях расчёт оптимального режима экструзии представляет собой математическую неопределённую задачу со многими возможными решениями. Решение оптимизационной задачи позволит определить значения варьируемых параметров червяка, при которых обеспечивается удовлетворительный процесс экструзии с требуемым качеством шприцуемого изделия.

В общем случае задача параметрической оптимизации может быть сформулирована в следующем виде [39]. Требуется найти вектор  $\vec{x}$ , обеспечивающий минимизацию целевой функции

$$\min \Phi(x), \quad (2.33)$$

при ограничениях:

$$\left. \begin{aligned} g_i(\vec{x}) &= 0, \quad i=1,2,\dots,m; \\ g_i(\vec{x}) &\leq 0, \quad i=1,2,\dots,m; \\ x_l &\leq x_i \leq x_m, \end{aligned} \right\} \quad (2.34)$$

где  $\vec{x}$  — вектор оптимизируемых параметров ( $x_i \in R^n$ );

$\Phi(\vec{x})$  — скалярная целевая функция (критерий) векторного аргумента ( $\Phi(\vec{x}): R^n \rightarrow R$ );

$g_i(\vec{x})$  — также некоторые скалярные функции векторного аргумента;  $R^n$  -  $n$ -мерное пространство искомых переменных.

При необходимости задача максимизации сводится к задаче минимизации заменой  $\Phi(\vec{x})$  на (минус) —  $\Phi(x)$ .

Эффективность и точность решения данной задачи зависит как от числа параметров и ограничений, так и от вида целевой функции.

Существующие алгоритмы оптимизации могут быть разделены на две группы — алгоритмы, базирующиеся на использовании производных минимизируемой функции (градиентные методы, в том числе методы второго порядка) и алгоритмы, использующие текущие значения функции (безградиентные методы).

К числу последних относится, например, симплексный метод Нелдера—Мида [69], пригодный для минимизации нелинейных и разрывных функций. Градиентные методы (методы первого порядка) эффективны в случаях целевых функций, непрерывных вместе с первыми производными. Методы второго порядка, такие как метод Ньютона, применяются реже, поскольку требуют больших вычислительных затрат для расчета матриц вторых производных [48].

Классический метод Ньютона использует так называемый гессиан функции. Шаг метода определяется произведением матрицы, обратной к гессиану, на градиент функции. Если функция является положительно определенной квадратичной формой, то за один шаг данного метода мы окажемся в её минимуме. В случае знаконеопределенной квадратичной формы, у которой нет минимума, решение сходится к «седловой точке» или к максимуму. Результатом служит стационарная точка в виде квадратичной формы. [39]

На практике обычно приходится иметь дело с функциями, не являющимися квадратичными формами. Если такая функция гладкая, то в окрестностях минимума она достаточно хорошо описывается квадратичной формой, чтобы метод Ньютона сошелся к минимуму. Но с тем же успехом он может сойтись к оказавшемуся рядом максимумом, в результате осуществления шага в направлении возрастания функции, вместо шага, уменьшающего значение функции.

Градиентные методы используют информацию о наклоне функции для выбора направления поиска экстремума. В одном из таких методов — наискорейшего спуска — на каждой итерации движение к точке минимума осуществляется в направлении  $-\nabla\Phi(\vec{x})$ , где  $\nabla\Phi(\vec{x})$  — вектор-градиент целевой функции  $\Phi(\vec{x})$ . Этот метод оказывается неэффективен в ситуациях, когда поверхность целевой функции имеет узкие «овраги», как, например, у известной функции Розенброка [48].

В случае многофункционального процесса экструзии задача оптимизации сводится к поиску минимума целевой функции переменных процесса  $\Phi(\vec{x}): R^n \rightarrow R$ . По сути, эта задача равносильна нахождению нуля градиента  $\nabla\Phi(\vec{x})$ . Применяя метод Ньютона для многомерной системы, получим [5, 48]:

$$\nabla\Phi(\vec{x}_j) + H(\vec{x}_j)(\vec{x}_{j+1} - \vec{x}_j) = 0, \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (2.35)$$

где  $H(\vec{x}_j)$  - гессиан функции  $\Phi(\vec{x}_j)$ , в виде итераций это выражение примет вид:

$$\vec{x}_{j+1} = \vec{x}_j - H^{-1}(\vec{x}_j)\nabla\Phi(\vec{x}_j). \quad (2.36)$$

Поиск решения продолжается до тех пор, пока не выполнится условие

$$\left| \vec{x}_{j+1} - \vec{x}_j \right| \leq \varepsilon, \quad (2.37)$$

где  $\varepsilon$  - заданная точность вычисления.

Для поиска оптимального вектора свободных параметров  $\vec{x}_{j+1}$  целесообразно использовать задачу о наименьших квадратах, формулируемую в виде [5, 69]:

$$F(\vec{x}) = \left\| \Phi(\vec{x}) \right\|^2 = \sum_{i=1}^n \Phi_i^2(\vec{x}) = \sum_{i=1}^n (\varphi_i(\vec{x}) - F_i)^2 \rightarrow \min. \quad (2.38)$$

В данном случае градиент и матрица Гессе имеют вид:

$$\left. \begin{aligned} \nabla F(\vec{x}) &= 2J^T(\vec{x})\Phi(\vec{x}), \\ H(\vec{x}) &= 2J^T(\vec{x})J(\vec{x}) + 2Q(\vec{x}) \end{aligned} \right\} \quad (2.39)$$

где  $Q(\vec{x}) = \sum_{i=1}^m \Phi_i(\vec{x})H_i(\vec{x})$ ,  $J(\vec{x})$  - матрица Якоби вектор-функции  $\hat{O}_i(\vec{x})$ ,  $H_i(\vec{x})$  - матрица Гессе для ее компоненты  $\hat{O}_i(\vec{x})$ .

А направление поиска  $\vec{d} = \vec{x}_{j+1} - \vec{x}_j$  определится из системы:

$$\left[ J^T(\vec{x})J(\vec{x}) + \sum_{i=1}^m \hat{O}_i(\vec{x})H_i(\vec{x}) \right] \vec{d} = 2J^T(\vec{x})\hat{O}(\vec{x}). \quad (2.40)$$

Или в более компактном виде:

$$\frac{1}{2} H(\vec{x}) \vec{d} = \frac{1}{2} \nabla F(\vec{x}). \quad (2.41)$$

Откуда итерационный процесс:

$$\vec{x}_{j+1} = \vec{x}_j - \nabla F(\vec{x})H^{-1}(\vec{x}). \quad (2.42)$$

Однако, как ранее отмечалось, вычисление гессиана на каждой итерации сопряжено с трудоемкой операцией вычисления матрицы производных второго порядка. Одной из модификаций метода является метод Гаусса-Ньютона, строящийся на положении о том, что слагаемое  $J^T(\vec{x})J(\vec{x})$  доминирует над  $Q(\vec{x})$ . Тогда можно записать:

$$\left[ J^T(\vec{x})J(\vec{x}) \right] \vec{d} = 2J^T(\vec{x})\Phi\vec{x}. \quad (2.43)$$

Таким образом, когда норма  $Q(\vec{x})$  близка к нулю, а матрица  $J(\vec{x})$  имеет полный столбцевой ранг, направление  $\vec{d}$  мало отличается от ньютоновского (с учётом  $Q(\vec{x})$ ), и метод может достигать квадратичной скорости сходимости, хотя вторые производные и не учитываются. Улучшением метода является алгоритм Левенберга – Марквардта.[48] Согласно данному алгоритму направление поиска определяется из системы:

$$\left[ J^T(\vec{x}_k)J(\vec{x}_k) + \lambda_k I \right] \vec{d}_k = J^T(\vec{x}_k)\Phi\vec{x}_k, \quad (2.44)$$

где  $I$  – единичная матрица,  $\lambda_k$  — параметр алгоритма, определяемый в процессе линейной (скалярной) оптимизации вдоль выбранного направления. Отсюда направление поиска:

$$\vec{d}_k = -(J^T(\vec{x}_k)J(\vec{x}_k) + \lambda_k I)^{-1} J^T(\vec{x}_k)\Phi\vec{x}_k. \quad (2.45)$$

Преимуществом алгоритма является возможность выбора  $\lambda_k$ , который можно осуществлять, делая его значение достаточным для монотонного спуска по функции  $F(x)$ . То есть можно увеличивать данный параметр до тех пор, пока

не будет достигнуто условие  $F(\vec{x}_{k+1}) < F(\vec{x}_k)$ . Указанные операции можно осуществить с применением ЭВМ. В данной работе для поиска минимума целевой функции использован алгоритм Левенберга – Марквардта, реализованный в пакете *Mathcad 13* с помощью встроенной функции «Minimize».

В пакете под  $J(x)$  понимается матрица-якобиан размером  $m \times n$ , то есть матрица первых частных производных вектор-функции  $\Phi(x)$  по векторному аргументу  $x$ , а не определитель этой матрицы, как обычно принято в математической литературе [40].

Для случая производства РТП путем экструзии задача параметрической оптимизации решается отысканием оптимального скоростного и температурного режима машины с заданными конструктивными параметрами. Поскольку геометрические размеры машины и свойства смесей не подлежат изменению, число варьируемых параметров уменьшается, что заметно упрощает многокритериальную задачу оптимизации. В этом случае задача параметрической оптимизации сводится к отысканию набора параметров, являющегося оптимальным в смысле некоторых критериев. При этом на варьируемые параметры наложены ограничения в виде параметрических границ.

В качестве примера рассмотрим задачу параметрической оптимизации процесса экструзии в шприцмашине МЧТ-250. Данная машина используется при переработке резиновой смеси 4НК-971 в составе поточной линии по производству протекторов ИРУ-16Б на ОАО «Нижекамскшина».

К числу исходных параметров задачи следует отнести реологические константы перерабатываемой смеси, а так же геометрические размеры шприцмашины:

- $t=0,25$  м – шаг винтовой нарезки червяка;
- $D=0,25$  м – диаметр червяка;
- $h_{cp}=0,05$  м – средняя глубина винтового канала червяка;
- $i=2$  – число заходов червяка;
- $\varphi=0,3$  рад – угол подъема винтовой нарезки;
- $B=0,104$  м – аксиальная ширина канала червяка;
- $\delta=0,0008$  м – зазор между гребнем червяка и цилиндром;
- $e=0,013$  м – ширина лопасти винтовой нарезки червяка;
- $L_1=1,05$  м – эффективная длина нарезной части червяка;
- $l_0=0,67$  м – длина зоны дозирования;
- $w=0,8$  м – ширина щели формирующей головки;
- $L=0,31$  м – длина формирующей головки;
- $h=0,035$  м – средняя высота щели формирующей головки;
- $n=0,225$  – средний индекс течения полимера;
- $c=2200$  Дж/(кг К) – теплоемкость смеси;
- $\mu_0=2000000$  Па с – начальная (ньютоновская) вязкость смеси;
- $G=200000$  Па – модуль упругости перерабатываемого материала;
- $M_w=120000$  а. е. м. – среднемассовая молекулярная масса полимера;

$A_\eta = 0,0025 \text{ Па с}$  – коэффициент молекулярного состава смеси;  
 $Q_n = 0,00074 \text{ м}^3/\text{с}$  – номинальная производительность экструдера;  
 $A_3 = 0,0002852 \text{ м}^3/\text{с}^2$  – геометрическая постоянная экструдера;  
 $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль К})$  – универсальная газовая постоянная.  
 $A_t = 100$  – коэффициент теплового рассеяния.

При отыскании оптимального режима учитывалась возможность изменения частоты вращения электродвигателя с помощью задатчика скорости на пульте управления, а также предварительного разогрева резиновые смеси до необходимой температуры перед вводом в экструдер. В качестве варьируемых параметров принимались значения скорости вращения рабочего вала  $\omega_{ш}$ , момента на валу червяка  $M_{ш}$  и температуры разогретой смеси  $T_i$ . Пределы изменения варьируемых параметров:  $0 < \omega_{ш} < 8$  (рад/с),  $333 < T_i < 373$  (К),  $500 < M_{ш} < 1500$  (Нм).

Оценка результатов оптимизации производится с помощью обобщенного критерия в виде взвешенной суммы нормированных частных критериев:

$$\Phi(x) = \sum_{i=1}^{\kappa} \lambda_i \Phi_i(x), \quad (2.46)$$

где  $\lambda_i$  - весовые коэффициенты, в которые проектировщик вкладывает смысл "относительной важности" соответствующего критерия  $\Phi$  [39]. При этом  $\lambda_i \geq 0$ ,  $\sum_{i=1}^{\kappa} \lambda_i = 1$ .

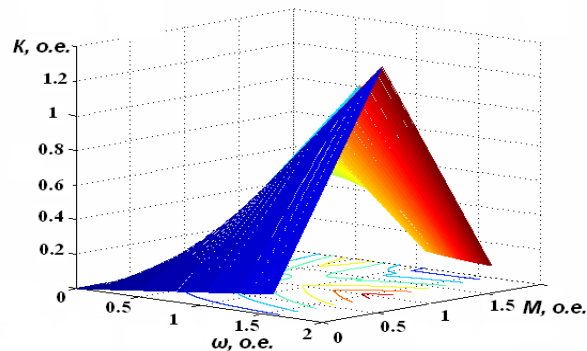
В качестве частных критериев оптимальности были приняты: максимальная производительность машины МЧТ-250 -  $Q_{\max}$ , минимальная потребляемая мощность -  $W_{n \min}$ , минимальное значение критерия неустойчивости течения экструдата  $N_{s \min}$ .

Минимум обобщенного критерия оптимальности имеет вид:

$$\Phi = \lambda_1 \left( \frac{Q_{\max} - Q}{Q_{\max}} \right)^2 + \lambda_2 \left( \frac{W_{\min} - W}{W_{\min}} \right)^2 + \lambda_3 \left( \frac{N_{s \min} - N_s}{N_{s \min}} \right)^2, \quad (2.47)$$

где  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  - весовые коэффициенты, соответственно, производительности, потребляемой мощности и критерия неустойчивости течения. учитывающие важность сохранения экстремальных значений отдельных показателей, полученных при частной оптимизации. Данные частных оптимизаций были найдены решением оптимизационных задач при вариации весовых коэффициентов целевой функции (2.46). Согласно рекомендациям [39,40], при нахождении оптимального значения выбранного параметра его весовой коэффициент принимался равным единице, а весовые коэффициенты при всех других параметрах приравнивались нулю. Нахождение частных оптимумов проводилось при политропическом процессе

экструзии протекторной смеси 4НК-971.К примеру, полученный путем моделирования параметрический трехмерный график зависимости качества экструдата от варьируемых параметров  $\omega$ ,  $M$ , приведен на рис.2.15.



**Рис. 2.15.** Зависимость качества экструдата от скорости вращения и момента на валу червяка

Данная зависимость наглядно иллюстрирует результаты частной оптимизации по критерию качества: максимум критерия наблюдается при относительном значении скорости вращения червяка 0,6 и относительном значении момента - 0,9, что соответствует абсолютным значениям частоты вращения 42 об/мин и момента на валу 1,5 кНм.

Блок-схема программного решения оптимизационной задачи приведена на рис. 2.16. Программа оптимизационного расчёта выполнена в среде *Mathcad 13*, где для поиска оптимума используется стандартная функция *Minimize*. Алгоритм поиска минимума основан на методе Левенберга\_Мрквардта.

Программа оптимизационного расчёта выполнена в среде *Mathcad 13*, где для поиска оптимума используется стандартная функция *Minimize*. Результат решения оптимизационной задачи приведен на рис. 2.17,а. Минимум целевой функции  $\Phi$  согласно (5), построенный в зависимости от сумм частных

$$\text{оптимумов} \quad \text{opt}_1 = \lambda_1 \left( \frac{Q_{\max} - Q}{Q_{\max}} \right)^2 + \lambda_2 \left( \frac{W_{\min} - W}{W_{\min}} \right)^2, \quad \text{opt}_2 = \lambda_3 \left( \frac{N_{s \min} - N_s}{N_{s \min}} \right)^2,$$

свидетельствует о существовании оптимальных значений варьируемых параметров  $M_{opt}$  и  $\omega_{opt}$  при которых возможны наибольшая производительность при минимальном энергопотреблении и минимальном значении критерия неустойчивости течения.

В ходе решения задачи получены график оптимального сочетания критериев оптимизации в зависимости от варьируемых параметров привода  $M_{in}$  и  $\omega_{in}$  (рис. 2,б). Зависимости наглядно иллюстрируют экстремальный характер исследуемого процесса.

Кривая, полученная в результате пересечения поверхностей  $W=f(\omega, M)$ ,  $Q=f(\omega, M)$ ,  $K=f(\omega, M)$  критериев в трехмерном пространстве, соответствует ряду значений скоростей и моментов, при которых обеспечивается оптимальное сочетание критериев (рис. 2.17, б).

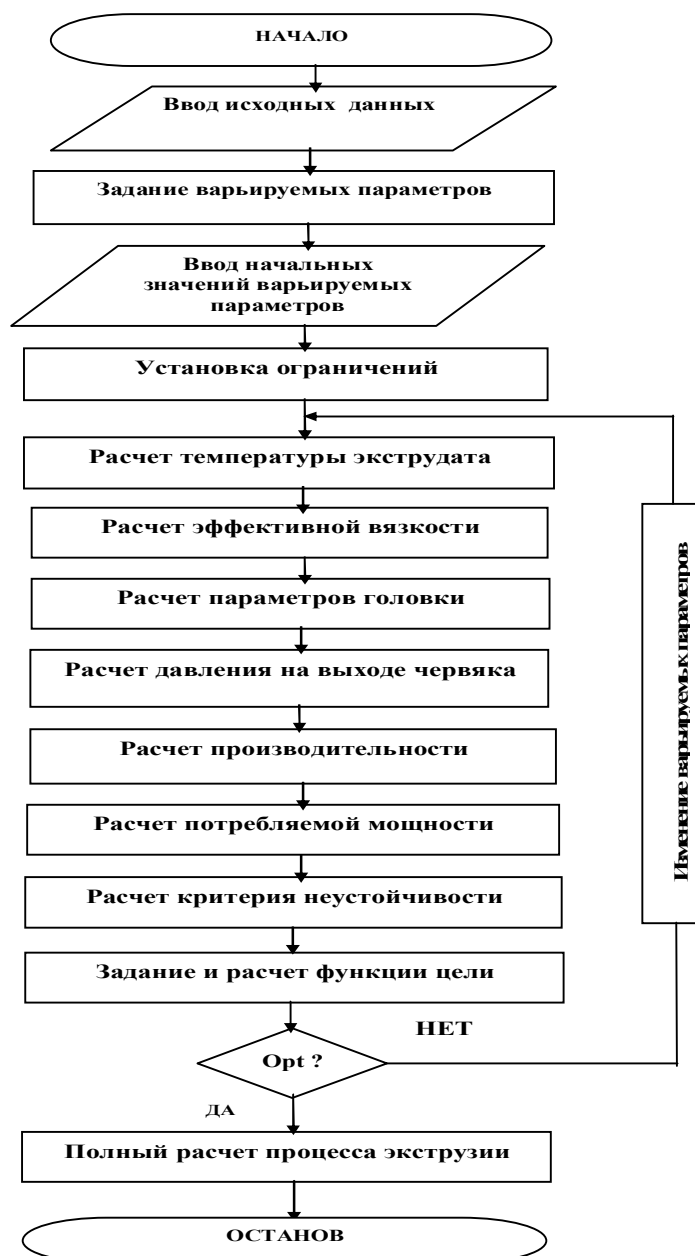


Рис.2.16 Алгоритм оптимизационного расчета процесса экструзии

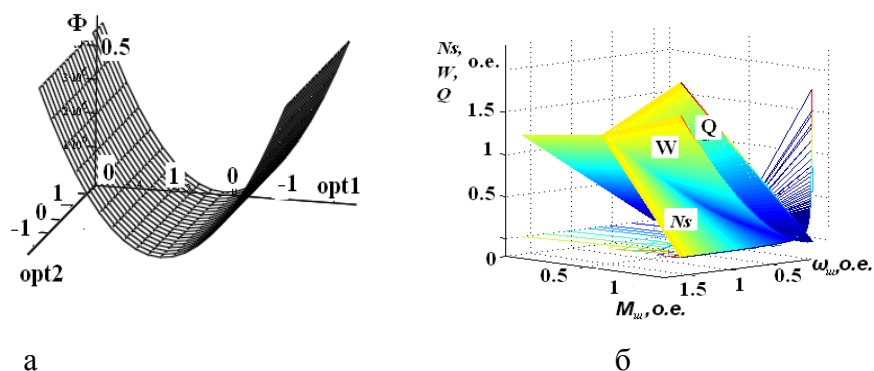


Рис. 2.17. Результаты решения оптимизационной задачи: а) обобщенный критерий оптимальности процесса экструзии; б) графики зависимости критерия неустойчивого течения ( $N_s$ ), производительности ( $Q$ ), потребляемой мощности ( $W$ ) от варьируемых параметров  $M_w$ ,  $\omega_w$



### 3. Математическая модель экструдера как объекта автоматического управления посредством электропривода

#### 3.1. Динамические свойства экструдера

Чтобы бы перейти к структурному синтезу системы управления электроприводом экструдера, необходимо оценить изменение зависимостей (2.48), (2.49) в динамике. Для этого рассмотрим ламинарное течение несжимаемой изотропной жидкости в направлении оси рабочего цилиндра экструдера, записанное в общем виде [17, 76, 94]:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \mu \left( \frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial v_z}{\partial x} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial x} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \cdot \frac{\partial \mu}{\partial y} \quad (3.1)$$

где  $p$  - давление расплава, Па;  $\eta_{эф}$  - вязкость расплава. Па с;  $v_z$  - скорость движения расплава вдоль канала червяка, м/с;  $x, y$  — текущие координаты частиц расплава, м.

Уравнение (3.1) достаточно строго позволяет описать винтовое течение неньютоновской жидкости для всех реальных случаев [43, 60, 62]. Получить общее аналитическое решение (3.1) весьма сложно, оно может быть получено только численным методом [94]. Для построения модели, допускающей аналитическое решение, примем следующие допущения, приведенные в [17,94]:

- вязкость расплава очень мало изменяется вдоль оси  $x$  в поперечном сечении канала, температура экструдата в канале и величина градиента скорости при переходе от одной стенки гребня канала к другой почти не меняются, поэтому принимаем  $\frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$ ;

- поскольку вязкость расплава по высоте канала также практически не меняется, допустимо принять  $\frac{\partial \mu}{\partial y} = 0$ ;

- влияние стенок винтового канала на распределение скорости пренебрежимо мало, поэтому  $\frac{\partial v_z}{\partial x} = 0$ ;

- движение в направлении оси  $y$  существует только в непосредственной близости к стенкам канала, в остальной части сечения канала течение в направлении оси  $y$  отсутствует;

- размеры канала по всей длине практически постоянны, поэтому, значения скоростей  $v_x, v_z$  не зависят от координаты  $z$ ;

- вследствие большого отношения винтового канала к его глубине, а также особенностей циркуляционного течения можно принять, что скорости  $v_x, v_z$  не зависят от координаты  $X$ , следовательно,

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} = 0, \frac{\partial v_x}{\partial y} = 0, \frac{\partial v_y}{\partial y} = 0, \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0, \frac{\partial v_z}{\partial x} = 0. \quad (3.2)$$

Из уравнений равновесия напряжения, приведенных в [94], получим:

$$p_{xy} = \eta \frac{\partial v_x}{\partial y}; p_{yz} = \eta \frac{\partial v_z}{\partial y}; p_{zx} = 0. \quad (3.3)$$

С учетом принятых допущений уравнение (3.1) примет вид:

$$\frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} = \frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z}. \quad (3.4)$$

После преобразований уравнения (3.4) может быть получено объемное уравнение производительности экструдера вида (2.16) [17]. С учетом потока утечки данное уравнение запишется в виде :

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 k_n h_{cp} \sin \varphi \cos \varphi}{2} \left(1 - \frac{ie}{t}\right) F_a - \frac{\pi^2 k_o D h_{cp}^3 \varphi \sin^2 \varphi}{12 \eta_{эф} L} \frac{\partial p}{\partial l} \left(1 - \frac{ie}{t}\right) F_p - \frac{\pi^2 D^2 \delta^3 \operatorname{tg} \varphi \Delta P}{10 \eta_{эф} e L} \quad (3.5)$$

В винтовом канале червяка с постоянными размерами и постоянной вязкостью  $\eta_{эф}$ ,  $Pa \cdot c$ , градиент давления по длине канала является постоянным [17]. Тогда можно принять:

$$\frac{dp}{dl} = \frac{\Delta P}{L}. \quad (3.6)$$

Работа червячного экструдера зависит не только от конструкции червяка, но и от формующего инструмента (головки). Конструкция и проходные сечения каналов, конструктивное оформление формующего инструмента зависят от реологических свойств расплава полимеров и специфических гидродинамических явлений [68]. Для получения формулы производительности формующего инструмента примем допущения [12], согласно которым:

- в местах стыков каналов с различной геометрией имеются, как правило, монотонные переходы, поэтому влиянием входных эффектов можно пренебречь;

- каналы головки можно разбить на ряд зон, характеризующихся постоянным или монотонно изменяющимся поперечным сечением, для которых находятся коэффициент гидравлического сопротивления;

- расчет формующего инструмента будем рассматривать при показателе течения, равном единице, т.е. для ньютоновской жидкости.

Объемная производительность потока ньютоновских жидкостей через формующий инструмент  $Q$ , кг/с определяется по формуле:

$$Q = K_g \frac{\Delta P}{\eta_{эф}}, \quad (3.7)$$

где  $K_g$  — общая константа головки, зависящая от конфигурации и размеров отдельных элементов головки,  $m^3$ .

Используя выражения (3.2) и (3.6), приведем уравнение (3.5) к более удобному виду:

$$K_g \frac{\Delta P}{\eta_{эф}} + \beta \frac{dp}{dl} + \gamma \frac{\Delta P}{\eta_{эф}} = \frac{30 \alpha \omega_{ш}}{\pi}, \quad (3.8)$$

где  $\omega_{ш}$  - угловая скорость вращения червяка,  $rad/c$ .

В этом уравнении имеется производная по направлению  $dp/dl$ . Для эквивалентного преобразования используем выражение, приведенное в [68]:

$$dl = \omega_{ш} R_{ц} \operatorname{tg} \varphi dt, \quad (3.9)$$

где  $R_{ц}$  - радиус цилиндра, м.

Заменив производную градиента давления  $dp/dl$  на производную, отражающую временную зависимость изменения давления от времени  $dp/dt$ , получим выражение:

$$\omega_{ш} \left( K_g \frac{\Delta P}{\eta_{эф}} + \gamma \frac{\Delta P}{\eta_{эф}} \right) + \beta \frac{L}{\mu R_{ц} \operatorname{tg} \varphi} = \frac{30 \alpha \omega_{ш}^2}{\pi}, \quad (3.10)$$

где  $\Delta P$  — приращение давления по длине всего канала головки, Па.

В этой формуле берется средняя вязкость расплава [43]. Дифференциальное уравнение (3.10) является нелинейным. Линеаризация дифференциального уравнения экструдера позволит получить передаточную функцию объекта. Для этого выразим переменные через приращения  $\Delta \omega$ ,  $\Delta P$  относительно координат рабочей точки экструдера ( $\omega_{шр}$ ,  $P_0$ ):

$$\omega_{ш} = \omega_{ш0} + \Delta \omega_{ш}, P = P_0 + \Delta P. \quad (3.11)$$

Подставив эти выражения в исходное соотношение (3.8), упростим запись координат рабочей точки. В результате получается линейное выражение для приращений. После преобразований уравнение для статического режима приобретает вид:

$$K_g \frac{P}{\eta_{эф}} + \gamma \frac{P}{\eta_{эф}} = \frac{30 \alpha \omega_{шр}}{\pi}. \quad (3.12)$$

В динамическом режиме уравнение, связывающее приращения координат, можно записать так:

$$\Delta \omega_{ш} \left( K_g \frac{\Delta P}{\eta_{эф}} + \gamma \frac{\Delta P}{\eta_{эф}} \right) + \beta \frac{L}{\mu R_{ц} \operatorname{tg} \varphi} = \frac{30 \alpha \cdot 2 \Delta \omega_{ш} \omega_{шр}}{\pi}. \quad (3.13)$$

На основании уравнений (2.14) и (2.15) можно записать передаточную функцию экструдера между частотой вращения червяка и выходным давлением. После соответствующих преобразований получим:

$$W_{\omega}(p) = \frac{\Delta P}{\Delta \omega_{ш}} = \frac{60 \omega_{шр} \alpha / \pi - P(K_g + \gamma) / \eta}{\frac{\beta \alpha}{\eta R_{ц} \operatorname{tg} \varphi} p + \frac{\omega_{шр}}{\eta} (K + \gamma)}, \quad (3.14)$$

где  $p$  - оператор Лапласа.

Запишем данную передаточную функцию в упрощенном виде:

$$W_{\omega} = \frac{\Delta P}{\Delta \omega_{ш}} = \frac{K_{\omega}}{T_{\omega} p + 1}, \quad (3.15)$$

где  $K_{\omega} = \frac{60 \alpha \eta_{эф}}{\pi (K + \gamma)} - \frac{P}{\omega_{шр}}$ ,  $T_{\omega} = \frac{\beta L}{R_{ц} \operatorname{tg} \varphi \cdot \omega_{шр} (K + \gamma)}$  соответственно

коэффициент передачи и постоянная времени экструдера по скорости как апериодического звена первого порядка.

Можно видеть, что переходной процесс изменения давления на входе формующей головки носит явно выраженный апериодический характер. Инерционность экструдера зависит как от конструктивных параметров экструдера и формующего инструмента, так и от физико-химических свойств перерабатываемого полимера. Это факт находится в согласии с принятыми выше допущениями и упрощениями гидродинамической модели.

Для оценки крутящего момента на валу червяка, рассмотрим выражение мощности привода (2.19). Поделив обе части этого уравнения на величину  $\omega_{ш}$ , получим линейное уравнение, разрешенное относительно давления  $P$  в виде:

$$P = \frac{M - k_2 \omega}{k_1}, \quad (3.16)$$

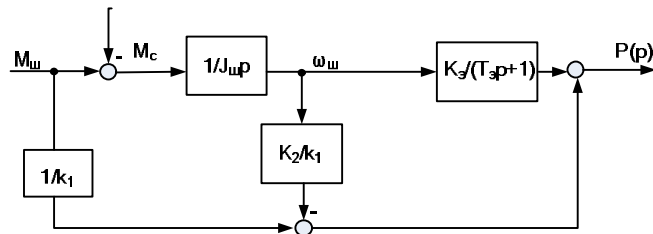
где  $M_o = W_i / \omega_o$  - момент на валу червяка (шнека);  $k_1 = \frac{\pi^2}{2} D^2 h_{cp} \operatorname{tg} \varphi$ ,  
 $k_2 = \pi^3 D^2 \bar{\eta}_{эф} L_2 \frac{D}{h_{cp} \cos \varphi}$  - константы экструдера. Уравнения (3.15), (3.16), а также

уравнение вращательного движения червяка

$$M_{ш} - M_c = J_{ш} p \omega_{ш}, \quad (3.17)$$

где  $J_o$  - момент инерции червяка;

позволяют представить экструдер в виде объекта управления, структурная схема которого приведена на рис. 3.1.



**Рис. 3.1** Структурная схема экструдера, согласно уравнениям (3.15) – (3.17)

Используя аналогию работы экструдера и насоса как устройств, перекачивающих некоторый объем материала, можно вывести выражение для мощности, затрачиваемой на этот процесс. Мощность указанных механизмов выводится из выражения кинетической энергии, сообщаемой движущейся жидкости [3]:

$$\dot{A} = \frac{m v^2}{2}, \quad (3.18)$$

где  $m$  – масса жидкого материала, проходящая через нагнетательную часть насоса или головку экструдера, кг.;  $v$  – скорость движения материала, м/с. Массу материала можно определить как

$$m = \rho V, \quad (3.19)$$

где  $\rho$  – плотность (кг/м<sup>3</sup>),  $V$  – объем материала (м<sup>3</sup>), проходящего через поперечное сечение канала течения  $S$  (м<sup>2</sup>).

Исходя из определения мощности в механике как работы, совершаемой в единицу времени ( $W=A/t$ ) и считая, что вся кинетическая энергия расходуется на перемещение жидкого материала ( $A=E$ ), с учетом (3.18) и (3.19) получим общее выражение для мощности, затрачиваемой на осуществление указанного процесса:

$$W = \frac{A}{t} = \frac{mv^2}{2t} = \frac{\rho V v^2}{2t}. \quad (3.20)$$

Объем материала  $V$ , прошедшего через поперечное сечение канала за время  $t$  определяется скоростью истечения жидкости через поперечное сечение канала  $S$ , поэтому справедливо соотношение:

$$\frac{V}{t} = \frac{S}{v}. \quad (3.21)$$

Откуда:

$$W = \frac{\rho \cdot S \cdot v^3}{2}. \quad (3.22)$$

Таким образом, если учесть, что  $S \cdot v = Q_{\bar{a}}$  - производительность головки ( $\text{м}^3/\text{с}$ ),  $\frac{\rho \cdot v^2}{2} = P_{\bar{a}}$  - удельное давление или напор материала на выходе головки ( $\text{Н}/\text{м}^2$ ), получим выражение, определяющее мощность на продавливание жидкого материала сквозь фильеру:

$$W = Q_{\Gamma} P_{\Gamma}. \quad (3.23)$$

Примем, что в установившемся режиме давление в головке равно давлению, развиваемому червяком (см. рис. 2.8). Тогда связь производительности с давлением в головке может быть определена по формуле (2.14)  $Q_{\bar{a}} = B_{\bar{y}} P_{\bar{a}} / \eta_{\bar{y}\bar{o}}$  [25]. Полагая, что основная часть кинетической энергии червяка затрачивается на преодоление реакций каналов головки, можно установить, что статический момент сопротивления вращению червяка может быть определен как отношение полной мощности  $W_{\Gamma}$  к скорости вращения червяка  $\omega_{\text{ш}}$ :

$$M_c = \frac{W}{\omega_{\text{ш}}} = \frac{P_{\Gamma} Q_{\Gamma}}{\omega_{\text{ш}}}, \quad (3.24)$$

Таким образом, согласно уравнениям (2.14), (3.18-3.24) в структурную схему системы «экструдер – нагрузка» вводится внутренняя отрицательная обратная связь. Структурная схема привода экструдера принимает вид:

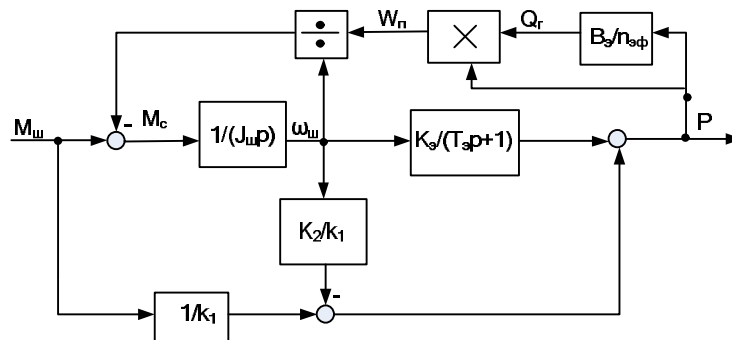


Рис. 3.2. Структурная схема привода экструдера с учетом цепи обратной связи

### 3.2. Линеаризация модели системы «экструдер-продукт»

Представленная схема (рис. 3.2) содержит нелинейность в цепи обратной связи. Для анализа динамики экструдера как объекта управления при малых отклонениях переменных  $P$ ,  $\omega_u$ ,  $M_c$ . проведем линеаризацию уравнений цепи обратной связи. Для этого, так же, как и ранее, воспользуемся разложением переменных в ряд Тейлора. После отбрасывания, ввиду малости, производных второго и более высокого порядков, запишем выражения в виде сумм установившихся значений и малых приращений рассматриваемых переменных:

$$\left. \begin{aligned} P &= P_0 + \Delta P, \\ \omega_u &= \omega_{u0} + \Delta\omega, \\ M_c &= M_{c0} + \Delta M_{c0} \end{aligned} \right\} \quad (3.25)$$

С учетом (3.25), уравнение (3.24), примет вид:

$$(P_0 + \Delta P)^2 \frac{K}{(\omega_{u0} + \Delta\omega_u)\eta_{эф}} = M_{c0} + \Delta M_c. \quad (3.26)$$

Или после очевидных преобразований:

$$(P_0^2 + 2P_0\Delta P + \Delta P^2)K = \omega_{u0}\eta_{эф}M_{c0} + \Delta\omega_u\eta_{эф}M_{c0} + \Delta\omega_0\eta_{эф}\Delta M_c + \omega_{u0}\eta_{эф}\Delta M_c. \quad (3.27)$$

Исключая слагаемые, являющиеся произведениями малых приращений, а также произведениями установившихся значений, запишем уравнение относительно приращений

$$2P_0\Delta PK = \Delta\omega_u\eta_{эф}M_{c0} + \omega_0\eta\Delta M_c. \quad (3.28)$$

Отсюда получим уравнение связи статического момента и давления в головке:

$$\Delta M_c = \frac{1}{\omega_0\eta_{эф}}(2P_0\Delta PK - \Delta\omega_u M_{c0}). \quad (3.29)$$

С учетом (3.19) – (3.23) получим линеаризованную структурную схему системы «экструдер-нагрузка» (рис. 3.3).

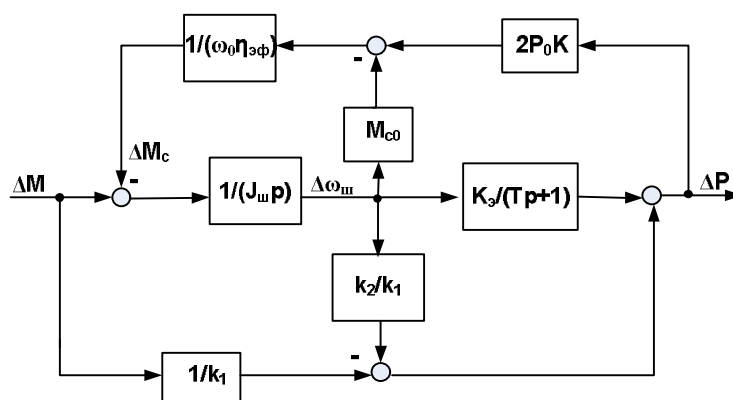


Рис. 3.3. Линеаризованная структурная схема системы «экструдер – нагрузка»

Для определения передаточной функции объекта управления удобно представить структурную схему в виде сигнального графа (рис. 3.4).

Воспользуемся методикой определения передаточной функции по формуле Мейсона [38].

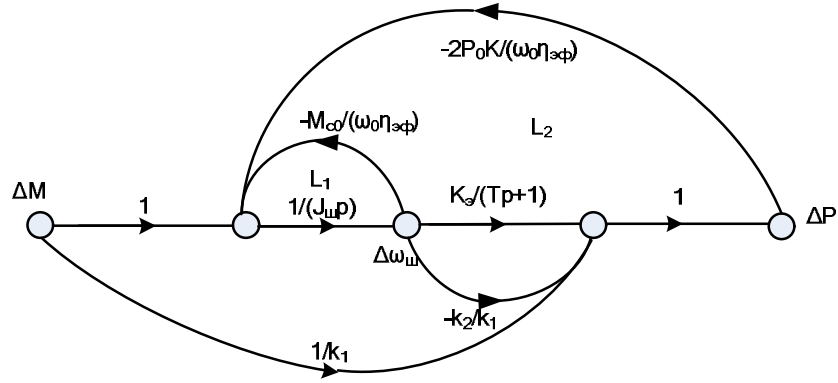


Рис. 3.4. Сигнальный граф системы «экструдер – нагрузка»

Формула, связывающая выходную  $Y(p)$  и входную  $X(p)$  переменные графа, в общем виде имеет вид:

$$W(p) = \frac{Y(p)}{X(p)} = \frac{\sum_k P_k \Delta_k}{\Delta} \quad (3.30)$$

где  $P_k$  – коэффициент передачи пути  $k$ , определяемый как непрерывная последовательность ветвей в направлении указанном стрелками, причем ни один узел в этой цепи не встречается более одного раза;

$\Delta$  – определитель графа, находится как

$$\Delta = 1 - \sum_{n=1}^N l_n + \sum_{m=1, q=1}^{M, Q} l_m l_q - \sum l_r l_s l_f \dots \quad (3.31)$$

где  $l$  – коэффициент передачи контура;

$\Delta_k$  – дополнительный множитель для  $k$ -го пути, равный определителю всех касающихся контуров при удалении  $k$ -го пути.

Определим прямые пути и дополнительные множители графа по рис. 3.9:

$$P_1 = \frac{K_\varepsilon}{T_p+1} \frac{1}{J_u p}, \quad \Delta_1 = 1; \quad P_2 = 1/k_1, \quad \Delta_2 = 1 - L_1; \quad P_3 = -\frac{1}{J_o p} \frac{k_2}{k_1}, \quad \Delta_3 = 1,$$

передаточные отношения замкнутых контуров графа:

$$L_1 = \frac{-M_{c0}}{\omega_0 \eta_{y\phi}} \frac{1}{J p}, \quad L_2 = \frac{-2P_0 K}{\omega_0 \eta_{\varepsilon\phi}} \frac{1}{J_u p} \frac{K_\varepsilon}{T_p+1},$$

а также его определитель:

$$\Delta = 1 - L_1 - L_2 = 1 + \frac{M_{c0}}{\omega_0 \eta_{\varepsilon\phi}} \frac{1}{J_u p} + \frac{2P_0 K}{\omega_0 \eta_{\varepsilon\phi}} \frac{1}{J_u p} \frac{K_\varepsilon}{T_p+1}.$$

Считая входным воздействием момент привода, а выходной величиной – давление в головке, запишем передаточную функцию объекта управления:

$$W_s(p) = \frac{\Delta P(p)}{\Delta M(p)} = \frac{P_1 \Delta_1 + P_2 \Delta_2 + P_3 \Delta_3}{\Delta} = \frac{\frac{K_\varepsilon}{T_p+1} \frac{1}{J_u p} + \frac{1}{k_1} \left(1 + \frac{M_{c0}}{\omega_0 \eta_{\varepsilon\phi}} \frac{1}{J_u p}\right) - \frac{1}{J_u p} \frac{k_2}{k_1}}{1 + \frac{M_{c0}}{\omega_0 \eta_{\varepsilon\phi}} \frac{1}{J_u p} + \frac{2P_0 K}{\omega_0 \eta_{\varepsilon\phi}} \frac{1}{J_u p} \frac{K_\varepsilon}{T_p+1}} \quad (3.32)$$

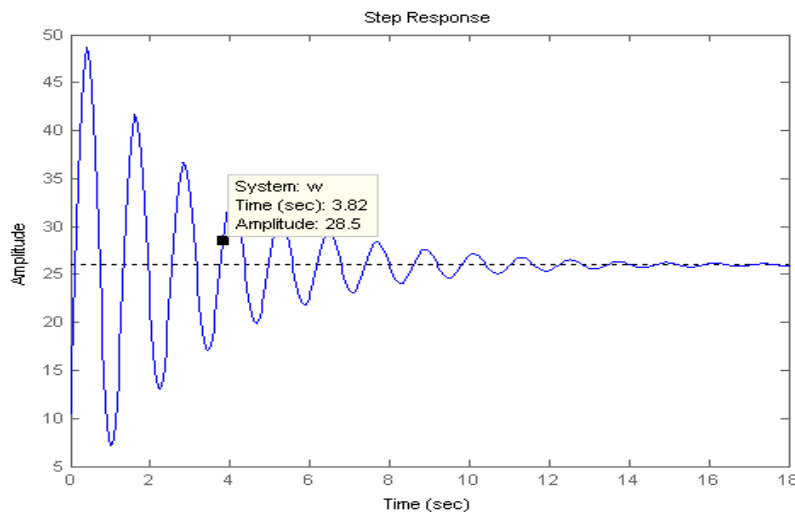
После преобразований (3.32) получим :

$$W_s(p) = \frac{\Delta P(p)}{\Delta M(p)} = \frac{p^2(k_2 J_u \omega_0 \eta_{эф} T_s) + p(J_u \omega_0 \eta_{эф} - k_2 \omega_0 \eta_{эф}) + \omega_0 \eta_{эф} K_s k_1 + M_{c0}}{p^2(k_1 J_u \omega_0 \eta_{эф} T_s) + p(k_1 J_u \omega_0 \eta_{эф}) + k_1 M_{c0} + 2P_0 K K_s}. \quad (3.33)$$

Принимая в качестве установившихся значений номинальные параметры экструдера при шприцевании резиновой смеси 4НК-971 (см. приложение 5) и подставив численные значения параметров в (3.38), передаточную функцию перепишем :

$$W_s(p) = \frac{\Delta P(p)}{\Delta M(p)} = 26 \frac{0,015p^2 + 0,17p + 1}{0,037p^2 + 0,023p + 1}.$$

Анализ показывает, что характеристическое уравнение рассматриваемой системы имеет два левых комплексно - сопряженных корня  $p_1 = -0,31 + j5,17$  и  $p_2 = -0,31 - j5,17$ . В этой связи переходный процесс изменения давления при скачке момента на входе имеет колебательный затухающий характер. Из диаграммы переходного процесса на рис.3.5 видно, что объект управления обладает большой колебательностью, а длительность процесса установления давления на выходе экструдера оказывается не менее 16 с. Данное свойство следует отнести к недостаткам агрегата, способным привести к снижению производительности и получению большого объема некачественного экструдата.



**Рис. 3.5.** Переходный процесс обработки скачка момента на входе системы

Не удовлетворительный вид переходного процесса ставит задачу модернизации существующей системы автоматического управления приводом экструдера с целью удовлетворения поставленным динамическим требованиям. Показано, что процесс экструзии протекает при взаимном влиянии большого числа переменных, характеризующих с одной стороны физико-химические, а с другой – механические свойства перерабатываемой смеси. Невозможность отдельного рассмотрения одной из сторон этого процесса ставит задачу разработки полной математической модели системы в комплексе «электропривод-экструдер-продукт». Общую схему модели можно получить путем объединения линеаризованной структурной схемы экструдера и системы электропривода с передаточной функцией  $W_{эл}(p)$  и



датчиком обратной связи  $k_{occ}$ . Механическая часть системы образована кинематической цепью «ротор двигателя – редуктор – червяк». Анализ показывает, что не смотря на разветвлённость этой цепи, демпфирующие свойства перерабатываемой смеси позволяют считать кинематические связи бесконечно жесткими [3]. В этой связи указанную часть системы целесообразно представить в виде одномассовой системы с суммарным, приведенным к валу двигателя, моментом инерции  $J_{\Sigma}$ . Тогда связь между скоростью двигателя привода и скоростью вращения червяка будет определять коэффициент передачи редуктора  $k_p$ . Аналогично определяется связь между приводным моментом  $\Delta M$  и моментом на валу червяка  $\Delta M_{ш}$ .

С учётом выше изложенного, полная структурная схема системы приобретает следующий вид :

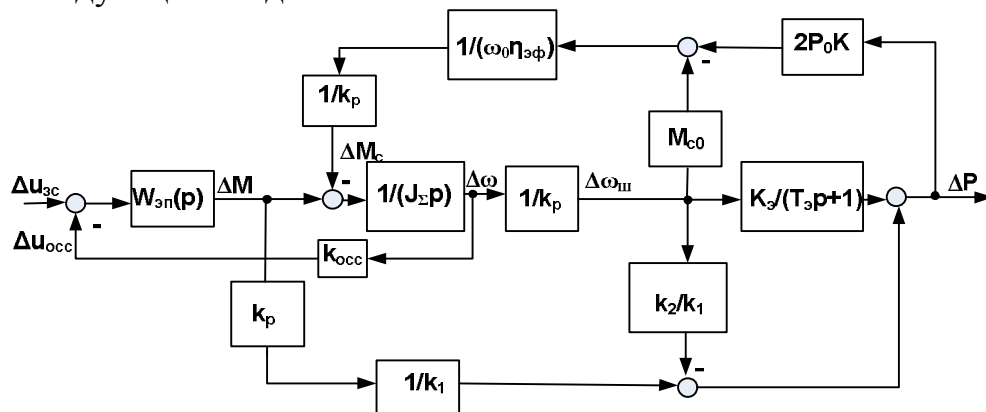


Рис. 3.6. Структурная схема системы «электропривод-экструдер-продукт»

#### 4. Разработка и исследование частотно-регулируемого электропривода экструдера с векторным управлением

##### 4.1. Обоснование необходимости применения системы с векторным управлением электроприводом экструдера

Результаты решения задачи параметрической оптимизации процесса экструзии подтверждают необходимость эффективного регулирования скорости вращения и момента на валу червяка экструдера при экструзии вязкоупругих смесей. Этим обеспечивается максимальное качество экструдата при номинальной производительности и потребляемой мощности агрегата. Анализ механических характеристик универсальных экструдеров указывает на существование участков, где регулирование происходит при постоянном моменте  $M_c \approx const$  (1-я зона) и мощности  $P_c = const$  (2-я зона).

Причем в зависимости от технологических режимов переработки удовлетворить обоим требованиям можно лишь в условиях отдельного управления скоростью и моментом электродвигателя. Как показали исследования червячных машин [75], технологические требования по выходному давлению смеси могут быть удовлетворены применением электропривода червяка с независимым регулированием указанных координат со следующими показателями качества [68, 87]:

- колебания статического момента при переходном процессе не должны превышать 25 % от установившегося номинального значения момента двигателя;

- точность поддержания момента приводного двигателя не должна превышать 2%;

- точность стабилизации частоты вращения червяка в статическом и динамическом режиме работы должна составлять 0,1%.

Работа электроустановок в агрессивных условиях шинного производства и требования к надежности привода со стороны технологического процесса обуславливают применение электроприводов на основе асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором (АДКЗР). Для эффективного управления координатами асинхронного электропривода в статических и динамических режимах работы в широком диапазоне регулирования скоростей, желательно применить непосредственное управление моментом АД.

#### **4.2. Система ПЧ-АД при питании от источника напряжения с ориентацией по вектору потокосцепления ротора**

Функциональная схема системы на основе автономного инвертора напряжения с прямой ориентацией по вектору потокосцепления ротора представлена на рис. 4.5 [90]. Система имеет два внешних контура регулирования - модуля вектора потокосцепления ротора и угловой скорости двигателя. Система включает два подчиненных внутренних контура регулирования тока  $I_{lx}$  и  $I_{ly}$  в осях  $x$ ,  $y$  ортогональной системы, вращающейся синхронно с полем двигателя. Сигнал задания  $|\Psi_2|_c$  формируется вычислительным устройством, использующим математическую модель двигателя с реальными параметрами двигателя. Сигнал задания скорости подается на вход задатчика интенсивности, формирующего требуемый темп изменения скорости. Для ограничения и управления электромагнитным

моментом двигателя на выходе регулятора скорости (РС) используется блок ограничения момента БОМ, а для поддержания постоянства момента введен блок деления (БД) с выхода БО на  $|\Psi_2|$ . Сигналы задания токов  $I_{1x3}$ ,  $I_{1y3}$  формируются соответственно на выходе регулятора потокосцепления (РП) и БД, данные сигнала сравниваются с текущими составляющими токов статора  $I_{1x}$ ,  $I_{1y}$ , получаемых с датчиков тока, на регуляторах тока РТ<sub>x</sub> и РТ<sub>y</sub>, выходные сигналы которых определяют задания напряжения статора  $U_{1x3}$  и  $U_{1y3}$  в системе координат  $x, y$ .

Преобразование координат системы  $\alpha, \beta$  в координаты системы  $x, y$  осуществляется с помощью вектор-фильтра ВФ и координатного преобразователя КП1 в соответствии с выражениями:

- для ВФ

$$|\Psi_2| = \sqrt{\Psi_{2\alpha}^2 + \Psi_{2\beta}^2}, \quad \cos \varphi_{0y\bar{e}} = \frac{\Psi_{2\alpha}}{|\Psi_2|}, \quad \sin \varphi_{0y\bar{e}} = \frac{\Psi_{2\beta}}{|\Psi_2|}, \quad (4.16)$$

где  $\varphi_{0y\bar{e}}$  - электрический угол поворота относительно статора в осях  $x, y$ .

- для КП1

$$U_{1\alpha} = U_{1x} \cos \varphi_{0y\bar{e}} - U_{1y} \sin \varphi_{0y\bar{e}}; U_{1\beta} = U_{1x} \sin \varphi_{0y\bar{e}} + U_{1y} \cos \varphi_{0y\bar{e}}. \quad (4.17)$$

В преобразователе фаз ПФ формируются трехфазные синусоидальные сигналы, определяющие частоту и амплитуду напряжения питания статорных обмоток в соответствии с [82]:

$$U_{1a} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_{1\alpha}; U_{1b} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( -\frac{1}{\sqrt{3}} U_{1\alpha} + U_{1\beta} \right); U_{1c} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left( -\frac{1}{\sqrt{3}} U_{1\alpha} - U_{1\beta} \right). \quad (4.18)$$

Поворот вектора магнитодвижущей силы статора на угол  $\varphi_{0y\bar{e}}$  осуществляет блок КП2 в соответствии с выражениями (4.11)

Блок БК на схеме рис. 4.4 осуществляет компенсацию составляющих  $E_{1x}$  и  $E_{1y}$  в системе дифференциальных уравнений (4.22). Без учета их влияния можно записать выражения связи между напряжениями и токами статорной цепи в осях  $x, y$ :

$$\left. \begin{aligned} U_{1x}(p) &= R_{1\sigma}(1 + T_{1\sigma}p)I_{1x}(p); \\ U_{1y}(p) &= R_{1\sigma}(1 + T_{1\sigma}p)I_{1y}(p). \end{aligned} \right\} \quad (4.19)$$

Тогда с учетом (4.19), можно записать передаточные функции между составляющими сигналов задания  $U_{1x3}$  и  $U_{1y3}$  и токов  $I_{1x}$  и  $I_{1y}$  статора.

$$\left. \begin{aligned} W_{nx} &= \frac{I_{1x}(p)}{U_{1x3}(p)} = \frac{k_n}{T_n p + 1} \frac{1}{R_{1\sigma}(1 + T_{1\sigma}p)}; \\ W_{ny} &= \frac{I_{1y}(p)}{U_{1y3}(p)} = \frac{k_n}{T_n p + 1} \frac{1}{R_{1\sigma}(1 + T_{1\sigma}p)} \end{aligned} \right\} \quad (4.20)$$

Здесь  $k_n$  - эквивалентный статический коэффициент передачи,  $T_n$  - эквивалентная постоянная времени цепи управления преобразователем.

Обобщенная линеаризованная схема электропривода с учетом соотношений, (4.16) - (4.20) приведена на рис. 4.5.

Для синтеза регуляторов в системах электропривода наиболее часто применяют метод стандартных настроек контуров регулирования на модульный (технический) оптимум или симметричный оптимум. Считается, что разомкнутый контур регулирования, настроенный на модульный оптимум имеет передаточную функцию вида:

$$W(p)_{MO} = \frac{1/k_{oc}}{a_m T_\mu p (T_\mu p + 1)}, \quad (4.21)$$

где  $T_\mu$  – малая некомпенсируемая постоянная времени апериодического звена,  $a_m$  – коэффициент настройки на модульный оптимум,  $a_m=1\dots 4$ , стандартное значение  $a_m=2$ ,  $k_{oc}$  коэффициент обратной связи [3, 22].

При этом замкнутый контур регулирования с единичной обратной связью имеет передаточную функцию

$$W(p)_{MO} = \frac{1}{a_m T_\mu^2 p^2 + a_m T_\mu p + 1} \quad (4.22)$$

На частоте среза  $\omega_n = 1/(2T_\mu)$  запас по фазе составляет  $\Delta\varphi=64$  градуса, что вполне достаточно для устойчивости системы.

При настройке на МО достигается компромисс между быстродействием и перерегулированием, когда при сравнительно высоком быстродействии перерегулирование составляет менее 5%. Процесс с данными динамическими показателями можно считать вполне приемлемым для большинства технологических установок. Так как структурная схема векторной системы подобна структуре двухзонного регулирования скорости привода постоянного тока, то при настройке контуров регулирования векторной системы целесообразной является настройка на модульный оптимум.

**Таблица 4.1**

Контур	Объект регулирования	Описание объекта
Контур тока $I_{1x}$	$\frac{K_n}{T_n p + 1}$	Преобразователь частоты
	$\frac{1/R_{l\sigma}}{T_{l\sigma} p + 1}$	Обмотка статора. Инерционное звено первого порядка

Контур потока	$\frac{K_r \cdot L_r}{T_2 \cdot p + 1}$	Обмотка ротора. Инерционное звено первого порядка
Контур тока $I_{1y}$	$\frac{1/R_{l_3}}{T_{l_3} p + 1}$	Обмотка статора. Инерционное звено первого порядка
Контур скорости	$3/2 \cdot p_{\Pi} \cdot k_r$	Конструктивный коэффициент
	$\frac{1}{J_{\Sigma} \cdot p}$	Механическая часть. Интегрирующее звено

## 4.2 Синтез регуляторов системы электропривода с векторным управлением

Для определения параметров регуляторов системы необходимо рассчитать параметры Т-образной схемы замещения АД (рис.4.1).

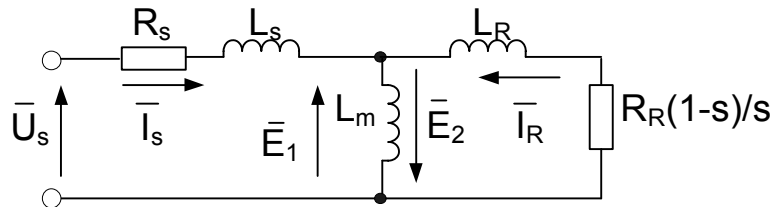
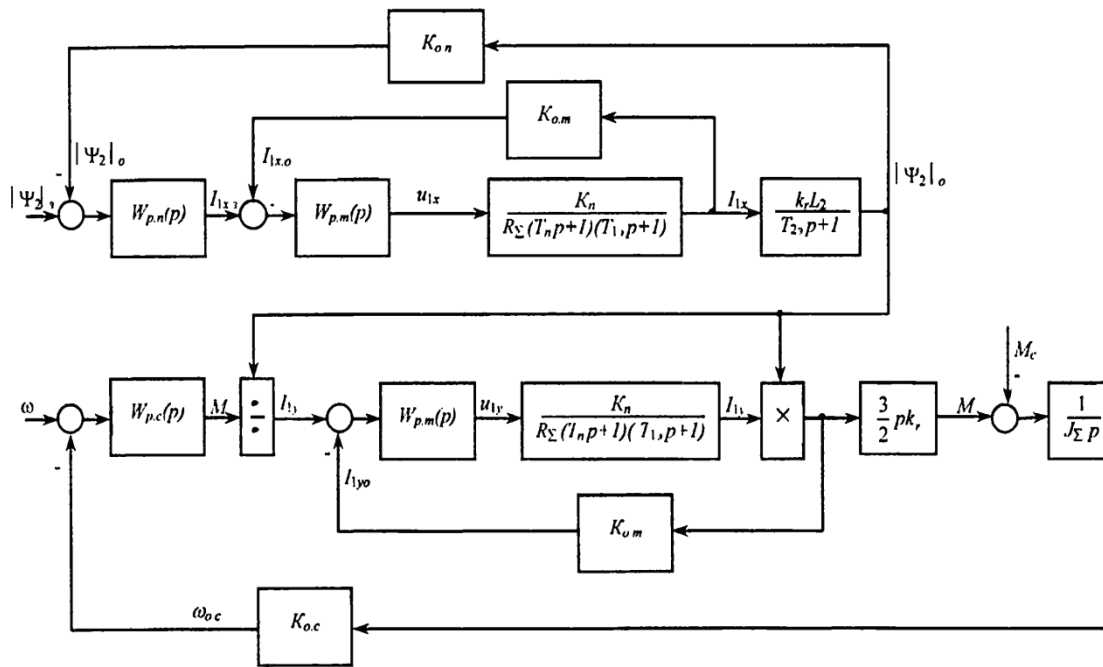


Рис. 4.1. Т-образная схема замещения АД

Расчет Т-образной схемы замещения выполнен на основании методики приведенной в [61]. Упрощенная математическая модель асинхронного двигателя представляется при этом в виде:

$$\left. \begin{aligned}
 \overline{U}_S &= R_S \cdot \overline{I}_S + \frac{d\overline{\Psi}_S}{dt} + j\omega_{0эл} \cdot \overline{\Psi}_S \\
 \overline{U}_R &= R_R \cdot \overline{i}_R + \frac{d\overline{\Psi}_R}{dt} + j(\omega_{0эл} - p_{\Pi} \cdot \omega) \cdot \overline{\Psi}_R \\
 \overline{\Psi}_S &= L_S \cdot \overline{I}_S + L_m \cdot \overline{i}_R \\
 \overline{\Psi}_R &= L_m \cdot \overline{I}_S + L_R \cdot \overline{i}_R
 \end{aligned} \right\} (4.2)$$



**Рис. 4.2.** Структурная схема системы ПЧ-АД при ориентации координат  $x, y$  по потокосцеплению ротора

где  $\overline{U}_S$  - вектор напряжения на статоре;

$R_S$  - активное сопротивление статора;

$\overline{I}_S$  - вектор полного тока статора;

$\overline{\Psi}_S$  - потокосцепление статора;

$\omega_{0эл}$  - угловая частота вращения магнитного поля статора;

$\overline{U}_R$  - вектор напряжения ротора;

$R_R$  - активное сопротивление ротора;

$\overline{i}_R$  - полный ток ротора;

$\overline{\Psi}_R$  - вектор потокосцепления ротора;

$p_l$  - число полюсов;

$\omega$  - угловая частота вращения ротора;

$L_m$  - взаимная индуктивность между обмотками статора и ротора;

$L_S$  - полная индуктивность фазы статора,  $L_S = L_m + L_{1\delta}$ ;

где  $L_{1\delta}$  - индуктивность рассеяния обмотки статора;

$L_R$  - полная индуктивность фазы ротора,  $L_R = L_m + L_{2\delta}$ ;

где  $L_{2\delta}$  - индуктивность рассеяния обмотки ротора.

Данные для расчета приведены в таблице Б.3 (прил. 3)/

Методика определения параметров через схему замещения асинхронного двигателя [61] позволяет с достаточной степенью точности определить параметры схемы замещения асинхронной машины на основе каталожных данных. Погрешность расчета параметров не превосходит 15%, что является вполне допустимым условием. Расчет параметров схемы замещения приведен в приложении Г. Необходимые данные для расчета параметров структурной схемы приведены в прил. Б (Таблица Б.2, Б.3).

Для расчета регуляторов и составляющих модели, необходимо задаться базисными значениями координат электропривода [49, 50].

$$U_{\sigma} = \sqrt{2}U_{\phi} = \sqrt{2} \frac{U_n}{\sqrt{3}} \quad \text{амплитудное значение номинального фазного}$$

напряжения обмотки статора, В;

$$I_{\sigma} = \sqrt{2}I_n \quad \text{амплитудное значение номинального тока обмотки статора, А;}$$

$$\omega_{r.\sigma} = \frac{\omega_0}{p_n} \quad \text{угловая частота вращения ротора, с}^{-1};$$

$$M_{\sigma} = K_{кр} \frac{P_n}{\omega_{r.\sigma}} \quad \text{электромагнитный момент, Н·м;}$$

Проекции токов:

$$I_{1\alpha\sigma} = I_{1\alpha} = I_{\sigma} \sqrt{\left( \frac{-R_s \sin \varphi - X_s \cos \varphi}{X_m} \right)^2 + \left( \frac{X_s \sin \varphi + R_s \cos \varphi - \frac{U_n}{I_n}}{X_m} \right)^2};$$

$$I_{1\beta\sigma} = I_{1\beta} = I_{\sigma} \sqrt{\left( \cos \varphi \frac{-R_s \sin \varphi - X_s \cos \varphi}{X_m} \right)^2 + \left( -\sin \varphi - \frac{X_s \sin \varphi + R_s \cos \varphi - \frac{U_n}{I_n}}{X_m} \right)^2};$$

$$I_{1\alpha\dot{a}} = I_{1\alpha} \quad \text{ток в канале потокосцепления двигателя, А;}$$

$$I_{1\beta\dot{a}} = K_{\dot{e}\delta} \cdot I_{1\beta} \quad \text{ток в канале скорости двигателя, А;}$$

где  $K_{кр}$  - отношение критического момента к номинальному.

$$\psi_{2\dot{a}} = \psi_2 = L_m \cdot I_{1\alpha} \quad \text{потокосцепление ротора, Вб;}$$

Расчет базисных значений приведен в приложении В. Результаты расчета сведены в таблицу В.1.

**Синтез регулятора тока.** Запишем передаточную функцию разомкнутого контура стабилизации тока:

$$W_{\text{раз.тока}}(p) = W_{pm}(p) \cdot \frac{k_n}{T_n \cdot p + 1} \cdot \frac{1/R_{1\sigma}}{T_{1\sigma} \cdot p + 1}; \quad (4.24)$$

где  $k_n$  - коэффициент передачи преобразователя по напряжению:

$$k_n = \frac{U_{\sigma}}{U_{pc \max}};$$

$R_{1\sigma}$  - суммарное активное сопротивление фазы двигателя:

$$R_{1\sigma} = R_s + K_r^2 R_r, \quad \text{Ом;}$$

Примем  $U_{pc\ max} = 10$  В – максимальное напряжение регулятора скорости,

$$T_n = 0,001 \text{ с} - \text{ постоянная времени преобразователя [90]; } T_{1\sigma} = \sigma \frac{L_s}{R_{1\sigma}} -$$

постоянная времени статорной цепи.

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура стабилизации тока [3]:

$$W_{\text{ж.раз.тока}}(p) = \frac{1/K_{o.m.}}{a_m T_\mu p (T_\mu p + 1)}; \quad (4.25)$$

где  $T_\mu = T_n = 0,001 \text{ с.}$

$K_{o.m.}$  – коэффициент обратной связи по току.

Принимаем  $a_T = 2$  в соответствие с настройкой регулятора на МО [3] (модульный оптимум).

Передаточная функция регулятора тока [49]:

$$W_{pm}(p) = \frac{1/K_{o.m.}}{a_m T_n p (T_n p + 1)} \cdot \frac{T_n p + 1}{\kappa_n} \cdot \frac{T_{1\sigma} p + 1}{1/R_{1\sigma}} = \frac{T_{1\sigma} p + 1}{T_{ui} p}; \quad (4.26)$$

$$\text{где } T_{ui} = \frac{K_{o.m.} a_m T_n \kappa_n}{R_{1\sigma}}.$$

**Синтез регулятора потока.** Запишем передаточную функцию разомкнутого контура стабилизации потока:

$$W_{\text{раз.тока}}(p) = W_{pn}(p) \cdot W_{\text{зам.тока}}(p) \cdot \frac{K_r \cdot L_r}{T_2 \cdot p + 1}, \quad (4.27)$$

$$\text{где } T_2 = \frac{L_r}{R_r}.$$

Передаточная функция замкнутого контура регулирования тока:

$$W_{\text{зам.тока}}(p) = \frac{W_{\text{раз.тока}}(p)}{1 + W_{\text{раз.тока}}(p) \cdot K_{o.m.}} = \frac{1/K_{o.m.1}}{a_m T_n p + 1}, \quad (4.28)$$

где  $K_{o.t.1}$  – коэффициент обратной связи по току в контуре потокосцепления,  $K_{o.m.1} = \frac{U_{pc\ max}}{I_{1a\sigma}}$ ;

Желаемая передаточная функция разомкнутого контура стабилизации потока:

$$W_{\text{ж.раз.тока}}(p) = \frac{1/K_{o.n.}}{a_m a_n T_{\mu c} p (T_{\mu c} p + 1)}; \quad (4.29)$$

где  $K_{o.n.} = \frac{U_{pc\ max}}{\psi_2}$  – коэффициент обратной связи по потоку.

По условиям высокого быстродействия и малого перерегулирования настраиваем контур потокосцепления на модульный оптимум. Принимаем  $a_m = 2$ ,  $a_n = 2$  в соответствии с настройкой регулятора на МО [3, 49] и некомпенсированную постоянную времени принимаем  $T_{\mu c} = a_n \cdot T_n$ .

Передаточную функция регулятора:



$$W_{pn}(p) = \frac{1/K_{o.n.}}{a_m a_n p (2T_n p + 1)} \cdot \frac{2T_n p + 1}{1/K_{o.m.1}} \cdot \frac{T_2 \cdot p + 1}{K_r \cdot L_r} = \frac{K_{o.m.1} (T_2 \cdot p + 1)}{4T_n p K_{o.n.} L_r} = \frac{T_2 \cdot p + 1}{T_{un} p}; \quad (4.30)$$

$$\text{где } T_{un} = \frac{K_{o.n.} 4T_n L_m}{K_{o.m.1}}.$$

**Синтез регулятора скорости.** Запишем передаточную функцию разомкнутого контура стабилизации скорости [49]:

$$W_{\text{раз. скорости}}(p) = \frac{1}{|\psi_2| \cdot K_{o.n.}} \cdot W_{pc}(p) \cdot W_{\text{зам. тока}}(p) \cdot |\psi_2| \cdot \frac{3}{2} \cdot p_n \cdot k_r \cdot \frac{1}{J_\Sigma \cdot p}. \quad (4.31)$$

Передаточная функция замкнутого контура регулирование тока:

$$W_{\text{зам. тока}}(p) = \frac{W_{\text{раз. тока}}(p)}{1 + W_{\text{раз. тока}}(p) \cdot K_{o.m.}} = \frac{1/K_{o.m.2}}{a_m T_n p + 1}, \quad (4.32)$$

где  $K_{o.t.2}$  – коэффициент обратной связи по току в контуре регулирование момента:  $K_{o.m.2} = \frac{U_{pc \max}}{I_{1\beta\delta}}$ . Желаемая передаточная функция разомкнутого контура стабилизации скорости:

$$W_{\text{жел. кс}}(p) = \frac{1/K_{oc}}{a_t T_{\mu c} p (T_{\mu c} p + 1)}, \quad (4.33)$$

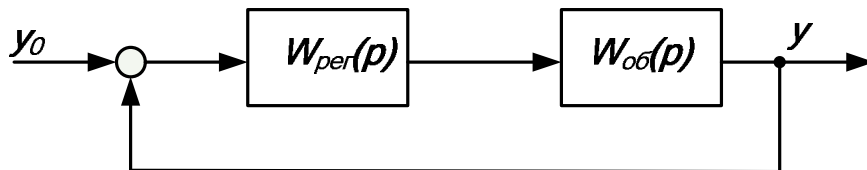
где  $T_{\mu c} = a_c T_n$  – некомпенсированная постоянная времени,  $a_c = 2$ ,  $a_t = 2$  в соответствии с настройкой регулятора на МО,  $K_{oc}$  – коэффициент обратной связи по скорости. Результаты расчета сведены в табл.4.3 Метод стандартных настроек позволяет произвести синтез регуляторов при помощи простых алгебраических операций с использованием стандартных коэффициентов настроек. Однако, данный метод не позволяет наглядно оценить поведение системы и регуляторов во всем диапазоне рабочих частот, а также не позволяет оценить запасы устойчивости системы при использовании стандартных коэффициентов  $a_m$  и  $a_c$ .

Передаточная функция регулятора скорости определится как

$$W_{pc}(p) = \frac{1/K_{oc}}{2 \cdot 2 \cdot T_n p (T_n p + 1)} \cdot \frac{2T_n p + 1}{1/K_{ot}} \cdot \frac{2K_{on} J_\Sigma p}{3Z_p K_r} = \frac{K_{on} K_{om} J_\Sigma p}{3Z_p K_r 2T_n K_{oc}} = K_{pc} \quad (4.34)$$

В отличие от рассмотренного метода, частотный метод синтеза позволяет провести анализ устойчивости системы при желаемых показателях качества управления. Данный метод предполагает использование асимптотических частотных характеристик для расчета систем, функционирующих в режиме отработки входного воздействия. В общем случае расчетная структурная схема замкнутой системы регулирования имеет вид, изображенный на рис. 4.3 [23]

Контур	Расчет параметров
Контур тока	$k_n = \frac{310,27}{10} = 31,027;$ $R_{1\sigma} = 0,01 + 0,967^2 \cdot 0,0103 = 0,0196 \text{ Ом};$ $T_{1\sigma} = 0,05234 \frac{0,0082}{0,0196} = 0,0219 \text{ с.}$
Регулятор тока в контуре потока	$K_{o.m.1} = \frac{10}{208,759} = 0,0479;$ $T_{ui} = \frac{0,0479 \cdot 2 \cdot 0,001 \cdot 31,027}{0,0196} = 0,152 \text{ с.}$ $W_{pm}(p) = \frac{0,0219p + 1}{0,152p}$
Регулятор тока в контуре регулирования момента	$K_{o.m.2} = \frac{10}{489,0279} = 0,02045;$ $T_{ui} = \frac{0,02045 \cdot 2 \cdot 0,001 \cdot 31,027}{0,0196} = 0,0647 \text{ с};$ $W_{pm}(p) = \frac{0,0219p + 1}{0,0647p}.$
Контур потока	$K_{o.n} = \frac{10}{1,676} = 5,967; T_2 = \frac{0,0083}{0,01} = 0,83 \text{ с};$ $T_{ui} = \frac{5,967 \cdot 2 \cdot 0,001 \cdot 0,00803}{0,0479} = 0,004 \text{ с};$ $W_{pm}(p) = \frac{0,83p + 1}{0,004p}$
Контур скорости	$K_{o.c} = \frac{10}{104,72} = 0,0955;$ $K_{pp} = \frac{0,02 \cdot 5,967 \cdot 5,83}{3 \cdot 3 \cdot 0,967 \cdot 2 \cdot 0,001 \cdot 0,0955} = 418,5$



**Рис. 4.3.** Расчетная структурная схема одноконтурной САР ( $W_{пер}(p)$  – передаточная функция регулятора,  $W_{об}(p)$  – передаточная функция объекта)

Передаточная функция разомкнутой системы определяется по формуле [23, 54, 91]:

$$W_{раз}(p) = W_{пер}(p)W_{об}(p). \quad (4.35)$$

Для АЧХ разомкнутой системы справедливо выражение:

$$A_{раз}(\omega) = A_{пер}(\omega)A_{об}(\omega), \quad (4.36)$$

которое в логарифмическом масштабе принимает вид:

$$L_{\text{раз}}(\omega) = L_{\text{рег}}(\omega) + L_{\text{об}}(\omega). \quad (4.37)$$

Задавая желаемый вид ЛАЧХ разомкнутой системы  $L_{\text{раз}}(\omega) = L_{\text{жел}}(\omega)$ , получим расчетное соотношение для ЛАЧХ регулятора:

$$L_{\text{рег}}(\omega) = L_{\text{жел}}(\omega) - L_{\text{об}}(\omega). \quad (4.38)$$

Таким образом, для расчета регулятора требуется построить ЛАЧХ объекта и на основе требований к качеству процессов в замкнутой системе сформировать ЛАЧХ разомкнутой системы. Затем следует определить ЛАЧХ регулятора в соответствии с (4.38). [23]

**Контур потокосцепления.** Передаточная функция объекта управления по току  $I_{1x}$  в контуре регулирования потокосцепления совместно с коэффициентом ОС по току:

$$W_{\text{об}}(p) = \frac{K_n}{T_n p + 1} \cdot \frac{1/R_{I_\alpha}}{T_{I_\alpha} p + 1} K_{\text{от}} \quad (4.39)$$

ЛЧХ - амплитудная  $L_{\text{оу.т}}$  и фазовая  $\varphi_{\text{оу.т}}$  представлены на рис. ПД.1 (прил. Д). При частоте среза  $\omega_c \approx 1260 \text{ с}^{-1}$  фазовая характеристика  $\varphi \approx 152^\circ$ . Практическим опытом настроек установлено, что для нормальной работы систем управления необходимо обеспечить запас устойчивости по фазе  $\Delta\varphi \geq 40^\circ$  на частоте среза. [97, 91]. Запас устойчивости составляет  $\Delta\varphi = \pi - |\varphi(\omega_n)| = 180 - 152 = 28^\circ$ , что после замыкания обратной связью соответствует неустойчивой системе. Выберем желаемую частоту среза  $\omega_{\text{жел}} \approx 920 \text{ с}^{-1}$ , соответствующую фазе  $\varphi \approx 140^\circ$ , при этом  $\Delta\varphi = 60^\circ$ . (прил. Д, рис. ПД.1)

Желаемая ЛАЧХ скорректированной системы в среднечастотной области на частоте  $\omega_{\text{жел}}$  для обеспечения заданных динамических свойств должна иметь наклон  $-20 \text{ дБ/дек}$ . Приблизительно длина среднечастотного участка должна составлять  $\Delta\omega = (1 \dots 1.5)$  декады, причем вправо и влево от частоты среза длина асимптоты составляет  $0,5 l$ , в этом случае в системе будет обеспечено перерегулирование  $\sigma = 20 \dots 40\%$ , при требуемом перерегулировании  $\sigma \leq 20\%$ ,  $\Delta\omega = 1 \text{ дек}$ . [23, 98]

В области высоких частот ЛАЧХ скорректированной системы и объекта могут совпадать или быть параллельными.

Зададим в области низких частот вид желаемой ЛАЧХ, соответствующий интегральному звену, это позволит применить в качестве корректирующего звена ПИ-регулятор тока. Благодаря такому расположению желаемой ЛАЧХ, в систему вводится И-канал, обеспечивающий нулевую статическую ошибку по задающему воздействию, а также П-канал, обеспечивающий желаемое быстродействие. [97]

Таким образом, желаемая ЛАЧХ разомкнутого контура тока  $I_{1x}$  представлена линией  $L_{\text{жел.т}}$  (рис. ПД.1). Используя соотношение (4.38), получим ЛАЧХ регулятора тока  $L_{\text{рег.т}}$  с параметрами:  $K_{\text{рт}} = 0,2$  (-14 дБ),  $T_{\text{рт}} = 0,11 \text{ с}$ . Передаточная функция регулятора тока:

$$W_{\text{рт}}(p) = K_{\text{рт}} + \frac{1}{T_{\text{рт}} p} \quad (4.40)$$

Подставив численные значения, имеем

$$W_{рт}(pp=0,2 + \frac{1}{0,11p} = \frac{0,022p+1}{0,11p}.$$

ЛАЧХ замкнутой системы представлена в виде линии  $L_{зам.т.}$  (рис. 4.10).

Передаточная функция объекта управления контура потокосцепления совместно с коэффициентом обратной связи по потоку:

$$W_{об.н.}(p) = \frac{K_r L_r}{T_2 p + 1} K_{он} \quad (4.41)$$

Передаточная функция разомкнутой системы регулирования потокосцепления ротора:

$$W_{раз.н.}(p) = W_{рп.}(p) \cdot W_{зам.т.}(p) \cdot \frac{K_r L_r}{T_2 p + 1} K_{он} \quad (4.42)$$

где  $W_{рп.}(p)$  – передаточная функция регулятора потокосцепления,  $K_{он}$  – коэффициент обратной связи по потокосцеплению (см. табл. 4.5),  $W_{зам.т.}(p)$  определяется согласно (4.48). Выражению (4.42) соответствует линия  $L_{оу.п}$  на рис. ПД.2 (прил. Д).

ЛАЧХ  $L_{оу.п}$  показывает, что система ослабляет прохождение сигналов во всем диапазоне частот. Коррекция в данном случае заключается в увеличении частоты среза и коэффициента усиления системы. Выберем желаемую частоту среза  $\omega_{с.жел.} \approx 10 \text{ с}^{-1}$ , соответствующую фазе  $\varphi \approx -90$ , при этом  $\Delta\varphi = 90^\circ$ . (рис. ПД.2, прил. Д). Для придания хороших динамических свойств системе, выберем наклон желаемой ЛАЧХ в низко- и среднечастотной области равный - 20 дБ/дек (линия  $L_{жел.п.}$ ). Согласно (4.38) получим ЛАЧХ ПИ-регулятора потокосцепления с параметрами  $K_{рп.} = 15,6$  (24 дБ),  $T_{рп.} = 0,064$  с. Передаточная функция регулятора:

$$W_{рп.}(p) = K_{рп.} + \frac{1}{T_{рп.} p} \quad (4.43)$$

Подставив численные значения, получим

$$W_{рп.}(p) = 15,6 + \frac{1}{0,063p} = \frac{0,99p+1}{0,063p}$$

**Контур скорости.** Синтез РТ для внутреннего контура тока  $I_{ly}$  аналогичен синтезу РТ  $I_{lx}$ . Объект управления во внутреннем контуре регулирования тока  $I_{ly}$  определяется выражением (4.48) и табл. (4.5). Подставив численные значения и построив ЛАЧХ объекта, получим линию  $L_{оу.т.}$  (рис. П.Д.3, прил. Д). При этом  $\varphi(\omega_c) = 150^\circ$ ,  $\Delta\varphi < 40^\circ$ , что будет соответствовать неустойчивой системе при замыкании обратной связью. Задавшись желаемым видом ЛАЧХ разомкнутой системы  $L_{жел.т.}$ , определим согласно (4.47), требуемый вид ЛАЧХ РТ  $L_{рег.}$ , (рис. ПД.3, прил. 3). Передаточная функция РТ, аналогична (4.49). Подставив численные значения, имеем:

$$W_{рт}(pp=0,39 + \frac{1}{0,079p} = \frac{0,031p+1}{0,079p}.$$

Согласно табл. 4.2 объект управления в контуре скорости имеет передаточную функцию:

$$W_{об}(p) = W_{замт}(p) \cdot \frac{3}{2} Z_p K_r \frac{1}{J_\Sigma p} K_{oc}. \quad (4.44)$$

Передаточная функция разомкнутого контура скорости:

$$W_{разс}(p) = W_{рс}(p) \cdot W_{замт}(p) \cdot \frac{3}{2} Z_p K_r \frac{1}{J_\Sigma p} K_{oc}. \quad (4.45)$$

где  $W_{рс}(p)$  – передаточная функция регулятора скорости,  $K_{oc}$  – коэффициент обратной связи по скорости (см. табл. 4.5),  $W_{замт}(p)$  определяется согласно (4.39). ЛЧХ контура регулирования скорости представлены на рис. ПД.4 (прил. Д). Выражению (4.45) соответствует ЛАЧХ  $L_{оу с}$ . Объект ослабляет прохождение сигналов в рабочей зоне частот. Коррекция в данном случае также заключается в увеличении частоты среза и коэффициента усиления системы. Выберем желаемую частоту среза  $\omega_{с.жел} \approx 12,5 \text{ с}^{-1}$ , соответствующую фазе  $\varphi \approx -100^\circ$ , при этом  $\Delta\varphi = 80^\circ$ . (прил. Д, рис. ПД.4). Для придания хороших динамических свойств системе, выберем наклон желаемой ЛАЧХ в низко- и среднечастотной областях, равный - 20 дБ/дек (линия  $L_{жел с}$ ), согласно (4.47), получим ЛАЧХ П-регулятора  $L_{рег с}$  с  $K_{рс} \approx 55 \text{ дБ}$ , что соответствует  $K_{рс} = 560$ .

Передаточная функция замкнутой системы:

$$W_{зам.с}(p) = \frac{W_{раз}}{1 + W_{раз}(p)K_{oc}}. \quad (4.46)$$

Ошибка регулирования скорости от входного воздействия определяется как:

$$\Delta = \frac{1}{1 + W_{раз}(p)K_{oc}} = \frac{1}{1 + W_{рс}(p) \cdot W_{замт}(p) \cdot \frac{3}{2} Z_p K_r \frac{1}{J_\Sigma p} K_{oc}}. \quad (4.47)$$

Подставив, численные значения имеем:

$$\Delta = \frac{8,91 \cdot 10^{-6} p^4 + 9,3 \cdot 10^{-3} p^3 + 5,45 p^2 + 162,8 p}{8,91 \cdot 10^{-6} p^4 + 9,3 \cdot 10^{-3} p^3 + 5,45 p^2 + 188,4 p + 825,8}.$$

При  $p=0$ , получим статическую ошибку  $\Delta=0$ . Это объясняется тем, что в составе передаточной функции объекта управления в контуре имеется интегрирующее звено. Колебательные свойства системы оцениваются с помощью величины перерегулирования  $\sigma$  относительно установившегося значения [23]:

$$\sigma = \frac{h(\infty) - h_{\max}}{h(\infty)} 100\%. \quad (4.48)$$

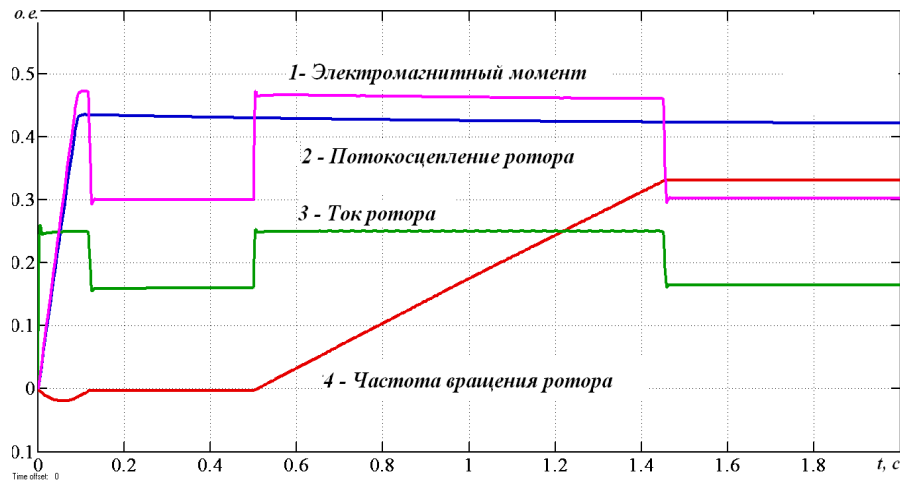
где  $h(\infty)$  - установившееся значение выходной величины,  $h_{\max}$  - максимальное значение выходной величины в переходном процессе. Оценить величину колебаний статического момента можно по переходному процессу нарастания тока  $I_{1у}$  (прил. Е, рис. ПЕ.1, б). В данном случае перерегулирование составляет:  $\sigma = \frac{1,05 - 1}{1} 100\% = 5\% < \sigma_{\max} = 25\%$ ,

Т.е колебания момента в переходном процессе не превышают допустимой величины.

### 4.3. Моделирование системы векторного управления электроприводом экструдера

Для исследования динамических режимов в системе регулирования скорости при векторном управлении АД воспользуемся системой моделирования с помощью ЭВМ. В настоящее время наибольшее распространение получила система инженерных и научных вычислений *MatLab* с пакетом расширения визуального моделирования *Simulink* [41, 57, 72, 84, 101].

Переходные процессы в контуре тока внешнего контура потокосцепления при различных методах синтеза регуляторов приведены в приложении Е. Система «Электропривод-экструдер-продукт», смоделированная в программе *Matlab Simulink 9*, представлена на рис.4.3 и 4.5. Действие противотока в модели учтено введением в схему блока  $M_c$ , имитирующего величину статического момента, пропорционального величине выходного давления экструдера.



**Рис. 4.3.** Переходные процессы в системе векторного управления АД

Как видно из диаграммы переходных процессов, время регулирования давления составляет 6 с, время переходного процесса 10 с. Таким образом, векторная система электропривода обеспечивает требуемые показатели качества регулирования скорости и момента приводного двигателя экструдера, а также постоянство оптимальных значений варьируемых параметров процесса экструзии в статическом режиме, при которых обеспечивается максимальный уровень качества профилируемых изделий, что подтверждается графиками переходных процессов (рис. 4.6).

### 4.6. Система регулирования давления смеси на основе системы векторного управления электроприводом экструдера

Для того, чтобы добиться цели управления в условиях неопределенного изменения параметров, требуется каким-либо способом получать информацию о выходных характеристиках объекта [59,100]. Улучшить качественные показатели управления процессом экструзии можно, если осуществить непосредственный контроль главной технологической координаты – давления смеси. В общем случае в разомкнутой системе регулирования давления с целью уменьшения ошибок управления объектом с нестабильными собственными параметрами приходится осуществлять перенастройку корректирующей цепи (регулятора). Кроме того, в процессе эксплуатации электропривода могут наблюдаться изменения возмущающих и управляющих воздействий в виде скачков питающего напряжения, механических возмущений в кинематической цепи привода и т.д., что в общем случае может привести к расходящемуся процессу.

Один из возможных способов решения указанной проблемы – это обратная связь от датчиков, регистрирующих изменение переменных. Наиболее широкое применение в практике нашел способ подчиненного подключения датчиков к регуляторам. Данный способ достаточно просто реализуем на практике в сравнении с применением адаптивных систем управления экструдерами, в которых требуется реализация сложного алгоритма управления в условиях неопределенности параметров объекта управления и внешних возмущений. Как показано в [79]. Для реализации способа применяются специальные датчики, встраиваемые в формующую головку экструдера (рис. 4.7).

Появление современных пьезоэлектрических полупроводниковых материалов, встроенных в небольшой чип, которые изменяют свое сопротивление при приложении нагрузки, привело к созданию высокочувствительных датчиков давления. Данное достоинство указанных датчиков, позволяет получать электрический сигнал даже при незначительных механических воздействиях на чувствительный элемент. Это определило широкое распространение данного типа датчиков по сравнению с другими типами.

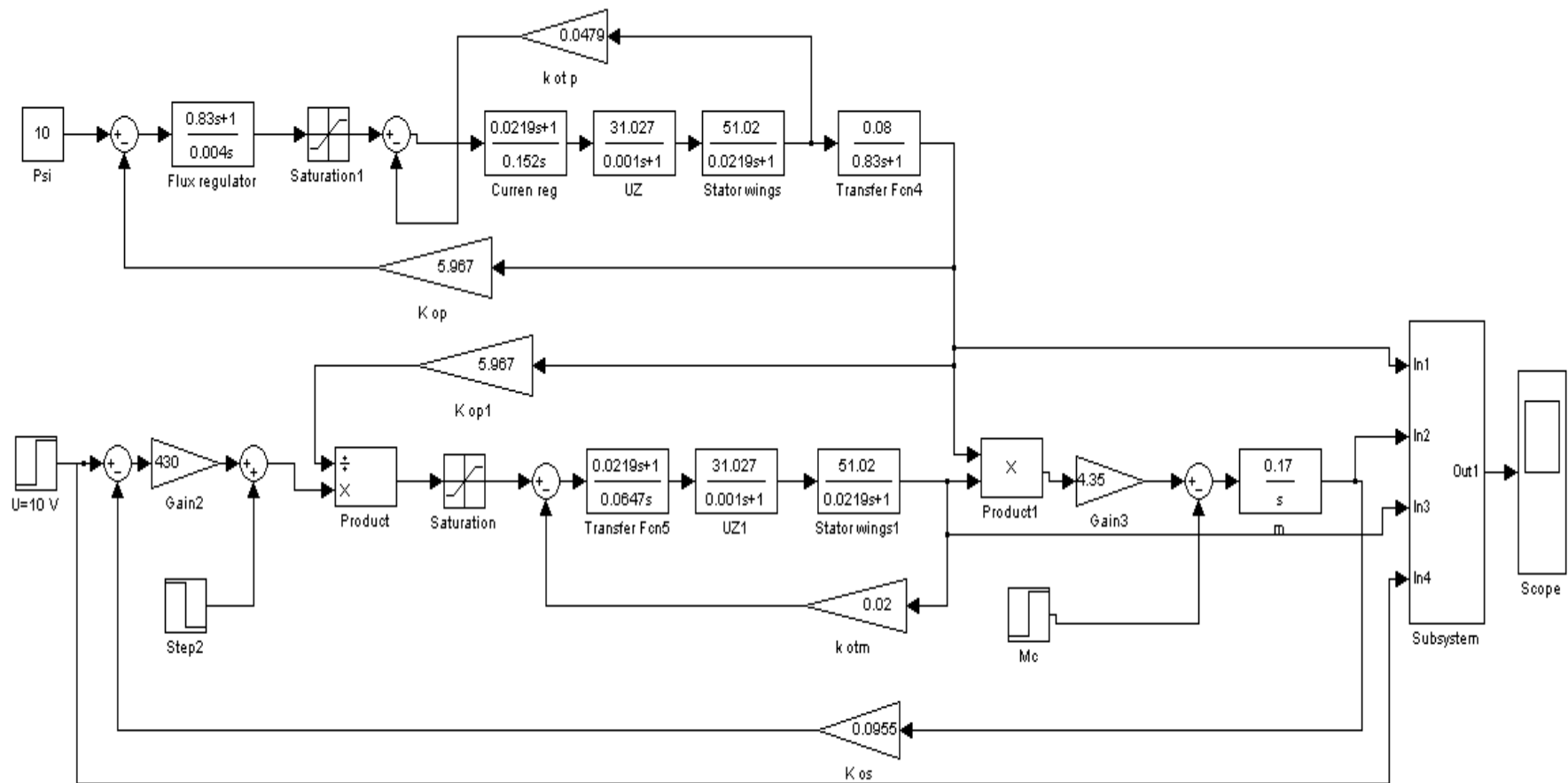


Рис. 4.4. Модель системы векторного управления АД

[Введите текст]



Общая структурная схема замкнутой системы регулирования давления приведена на рис. 4.8. Система управления включает в себя объект управления (экструдер)  $W_{\Sigma}(p)$ , регулятор давления  $W_{рд}(p)$ , замкнутую по скорости систему электропривода  $W_{\Sigma}(p)$ , механическую передачу (редуктор)  $k_p$  и датчик обратной связи  $k_{осд}$ . Выходной переменной экструдера является давление, от которой зависит производительность и качество экструдата. Развернутая структурная схема замкнутой системы регулирования давления, построенная на основе линеаризованной схемы экструдера, приведена на рис. 4.9. Система имеет в составе замкнутую по скорости систему электропривода с передаточной функцией  $W_{\Sigma}(p)$ , механическую передачу (редуктор) с коэффициентом передачи  $k_p$ , объект управления (экструдер), датчик обратной связи по давлению  $k_{осд}$ , регулятор давления  $W_{рд}(p)$ .

Для удобства вычислений примем, что входным сигналом является сигнал задания скорости  $u_{зс}$ , а выходным – сигнал обратной связи, снимаемый с датчика давления  $u_{осд}$ . Примем, что коэффициент передачи датчика давления определяется отношением максимального выходного давления к стандартному сигналу задания:

$$k_{осд} = P_{\max} / u_{зс} = 2 \text{ МПа} / 10 \text{ В} = 0,000005 \text{ Па/В}.$$

Передаточная функция объекта регулирования примет вид:

$$W_{\text{оуд}} = \frac{u_{зс}(p)}{u_{осд}(p)} = \frac{p^2 W_{\text{раз.с}} k_{осд} (k_p^3 k_2 J_{\Sigma} \omega_0 \eta_{\Sigma} T_{\Sigma}) + p(k_p^3 J_{\Sigma} \omega_0 \eta_{\Sigma} W_{\text{раз.с}} k_{осд} - k_p^2 k_2 T_{\Sigma} \omega_0 \eta_{\Sigma}) + \omega_0 \eta_{\Sigma} K_{\Sigma} k_1 k_p + k_p M_{с0} - k_2 \omega_0 \eta_{\Sigma} k_p^2}{p^2 (k_p^2 k_1 J_{\Sigma} \omega_0 \eta_{\Sigma} T_{\Sigma}) + p(k_p^2 k_1 J_{\Sigma} \omega_0 \eta_{\Sigma} + k_1 T_{\Sigma} M_{с0}) k_{осд} W_{\text{раз.с}} + k_1 M_{с0} + k_1 2P_0 K K_{\Sigma}}$$

Подставив численные значения в последнее выражение, получим:

$$W_{\text{оуд}}(pp) = \frac{1,28 \cdot 10^4 p^3 + 0,024 p^2 + 0,64 p + 0,03}{8,28 \cdot 10^{-6} p^6 + 8,67 \cdot 10^{-3} p^5 + 5,078 p^4 + 178 p^3 + 862 p^2 + 4138 p + 3,176}$$

ЛАЧХ объекта управления контура давления приведены на рис. ПД.5 (Прил. Д). Определим желаемую частоту среза исходя из желаемого быстродействия при перерегулировании  $\sigma < 20\%$  согласно методике, приведенной в [23]

$$\omega_{с.жже} = \frac{2,5\pi}{t_p} = \frac{2,5\pi}{7} = 1,12 \text{ с}^{-1}.$$

На данной частоте ФЧХ исходной системы имеет достаточный запас устойчивости по фазе, равный  $\Delta\varphi = 80^\circ$ . Для придания системе оптимальных динамических свойств в среднечастотной области в районе частоты среза желаемая ЛАЧХ должна иметь отрицательный наклон – 20 дБ/дек [23]. Частотный диапазон, в котором желаемая ЛАЧХ проходит с наклоном – 20 дБ/дек, определяем согласно  $\sigma < 20\%$  [23],  $\Delta\omega \geq 1$ дек. ЛАЧХ регулятора давления, которому соответствует передаточная функция звена с отставанием по фазе:

$$W_{\text{рег.д}} = K \frac{1+T_2 p}{1+T_1 p}, \quad (4.49)$$

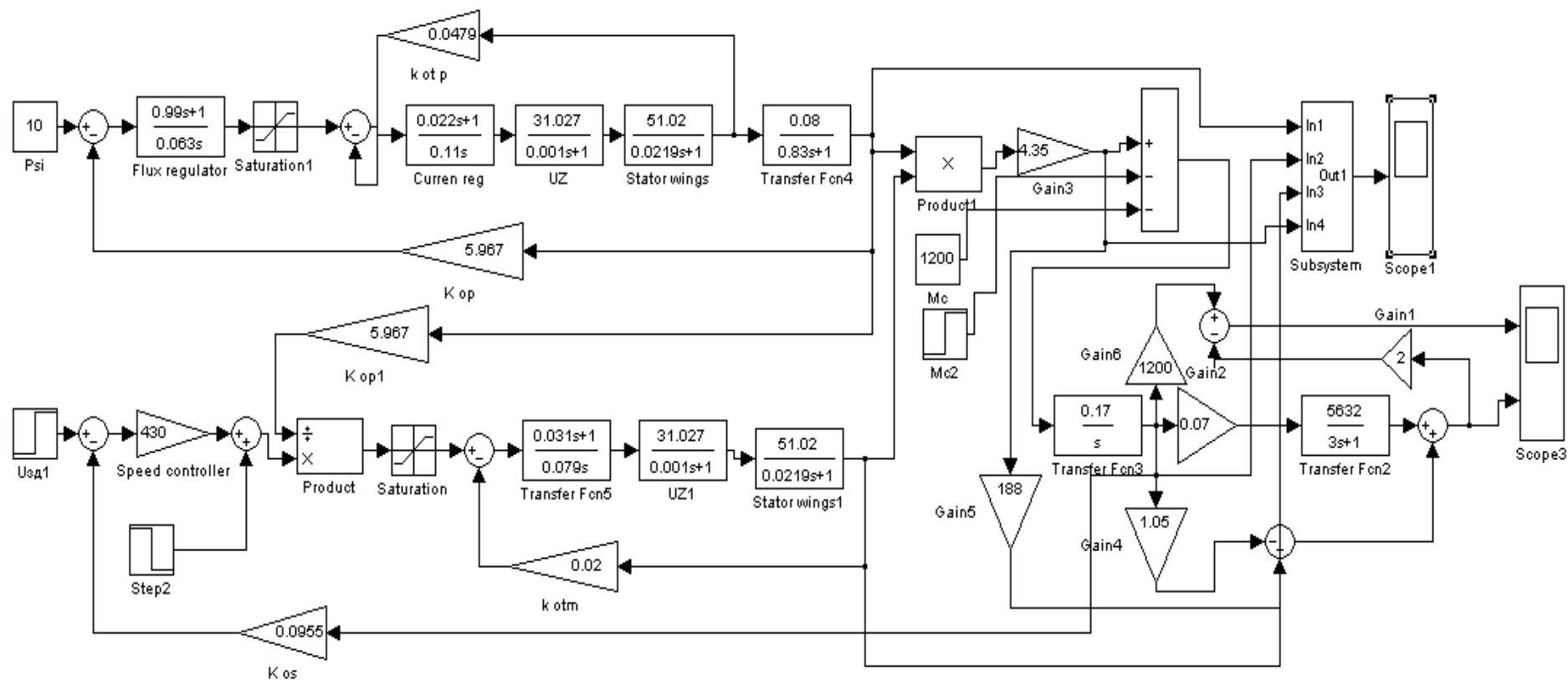
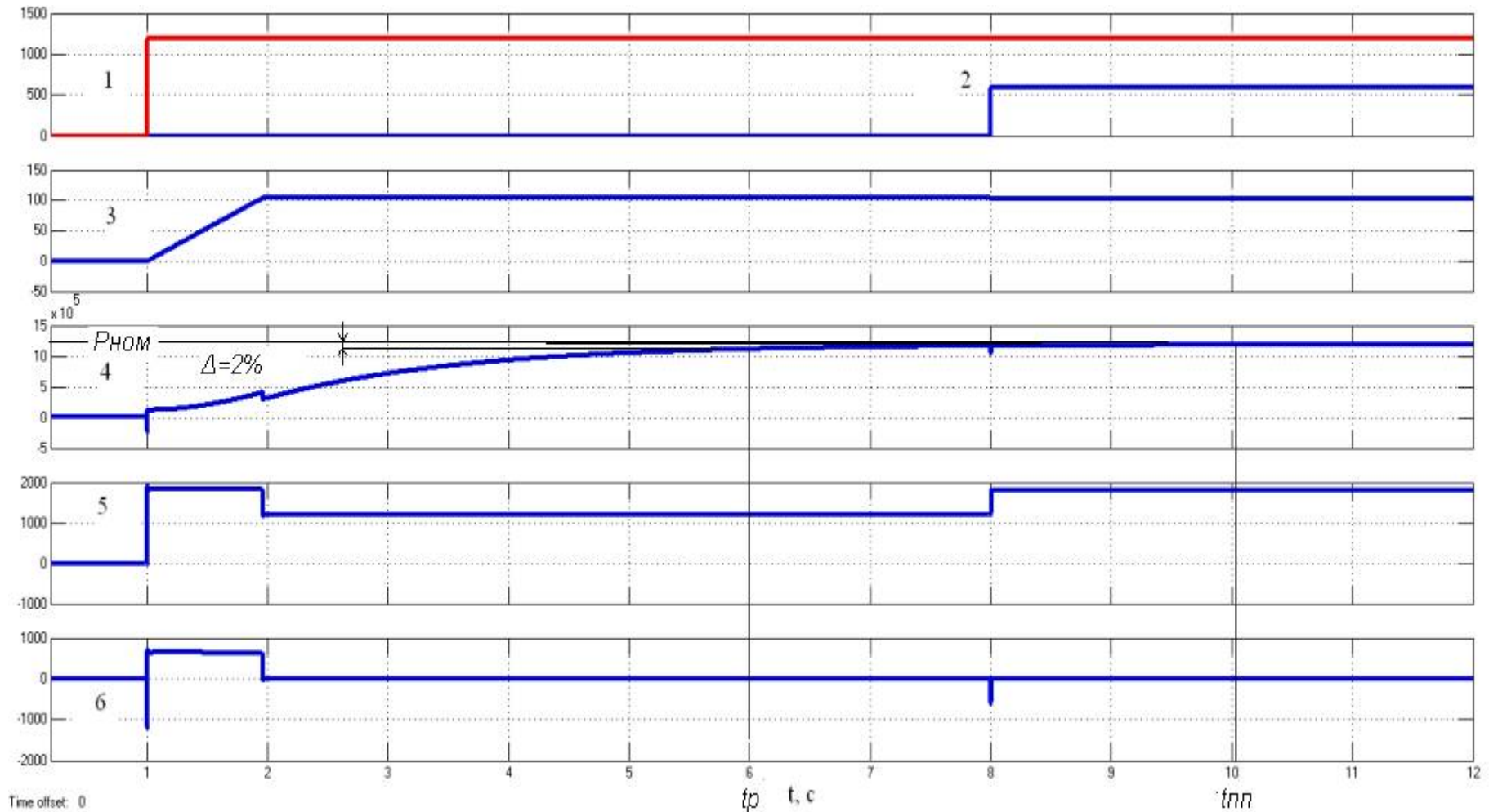


Рис. 4.5. Модель системы «Электропривод-экструдер-продукт» на основе векторного управления электроприводом

[Введите текст]



**Рис. 4.6.** Переходные процессы в системе при пуске под нагрузкой: 1 – номинальный статический момент, 2 –дополнительный статический момент, имитирующий отклонение момента нагрузки ( $0,5 M_{с.НОМ}$ ), 3 – частота вращения червяка, 4 - выходное давление смеси, 5- момент привода, 6 – динамический момент.

[Введите текст]

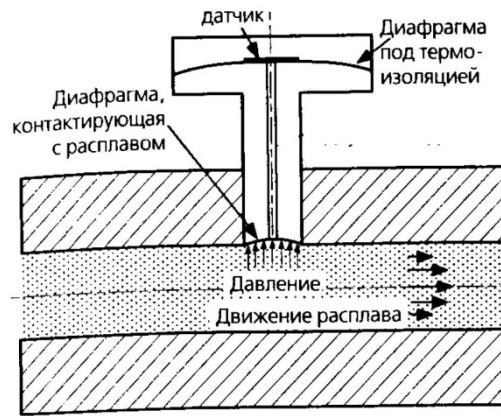


Рис. 4.7. Формующий канал головки со встроенным датчиком давления

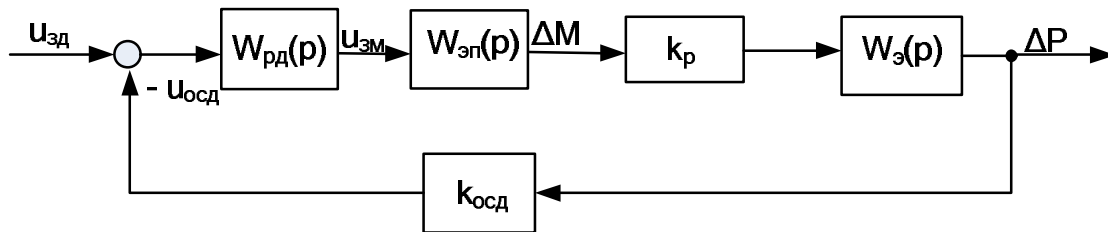


Рис. 4.8. Замкнутая система регулирования давления:  $u_{зд}$  – сигнал задания давления,  $u_{осд}$  – сигнал обратной связи по давлению,  $u_{зм}$  – сигнал задания момента

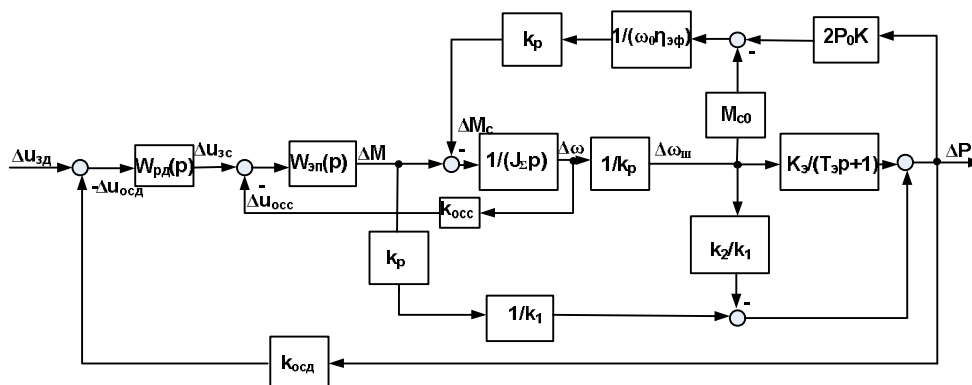


Рис. 4.9. Линеаризованная структурная схема замкнутой системы «электропривод-экструдер-продукт»

где  $T_1$  и  $T_2$  – постоянные времени звена, при этом  $T_2 = 0,8$  с,  $T_1 = 6,3$  с (рис. ПД.5),  $K$  – требуемый коэффициент усиления звена для получения желаемой ЛАЧХ с заданной частотой среза. Требуемое значение  $K = K_{рег}$  определим из выражения для статической ошибки [23]:

$$\frac{1}{1 + K_{раз} K_{рег}} \leq \Delta, \quad (4.50)$$

где  $K_{раз}$  – коэффициент усиления разомкнутой системы без регулятора, в статическом режиме  $K_{дас} = 9,4 \cdot 10^{-3}$ . Отсюда  $K_{рег} \leq \frac{1 - \Delta}{\Delta \cdot K_{раз}} = \frac{1 - 0,02}{0,02 \cdot 9,4 \cdot 10^{-3}} = 5212$  или

$K = 74,3$  дБ

$$W_{рег.д} = 5212 \frac{1 + 0,8p}{1 + 6,3p}$$

[Введите текст]

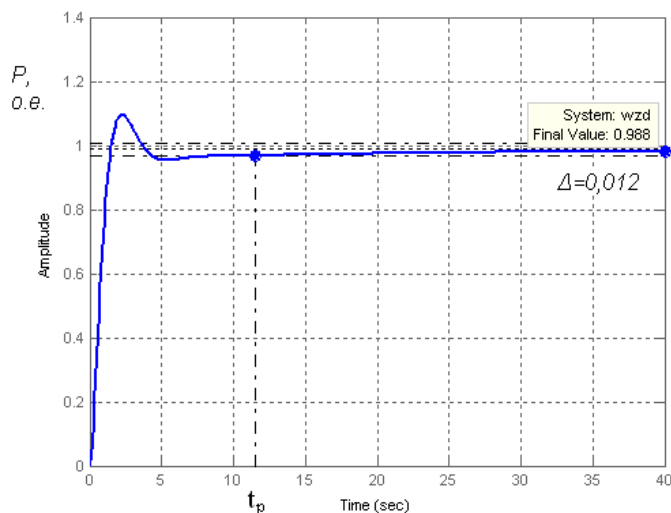
Желаемая передаточная функция разомкнутого контура давления:

$$W_{\text{жел.д}} = W_{\text{рег.о}}(pp \cdot W_{\text{ОУ.д}}(p)). \quad (4.51)$$

Замыкая систему отрицательной единичной обратной связью, получим передаточную функцию замкнутого контура давления:

$$W_{\text{зам.д}}(p) = \frac{W_{\text{рег.д}}(pp \cdot W_{\text{ОУ.д}}(p))}{1 + W_{\text{рег.д}}(pp \cdot W_{\text{ОУ.д}}(p))}. \quad (4.52)$$

Переходный процесс нарастания давления при скачке задающего воздействия, полученный путем моделирования синтезированной замкнутой системы управления ЛТИ-объекта в программе Matlab, изображен на рис.4.24.



**Рис. 4.10.** Переходный процесс нарастания давления в замкнутой системе регулирования с векторной управлением ЭП

Как видно из рис. 4.10, система удовлетворяет приведенным выше требованиям: время регулирования давления  $t_p \approx 11,5$  с, статическая ошибка  $\Delta = 1,12\%$ ; перерегулирование  $\sigma = 10\%$ .

Расчетные операции по выбору двигателя проведены в соответствии с рекомендациями, изложенными в [13, 14, 16, 27, 102, 103, 104] и приведены в приложении Ж. Экспериментальные осциллограммы, снятые в рабочем режиме двигателя на действующей установке, приведены в приложении З.

## **5. Разработка и исследование системы электропривода экструдера с частотно-токовым управлением**

### **5.1. Обоснование применения частотно-токового электропривода для экструдера**

Анализ механических характеристик экструдера показывает, что при выпуске протекторных заготовок переработка высоковязких смесей на основе каучука требует создания высококачественной системы управления моментом приводного двигателя. Такая система реализуется на основе преобразователя, обладающего свойствами источника тока. Применение векторной системы управления, описанной в главе 4, может быть сопряжено с рядом трудностей технического характера. Она содержит большое количество нелинейных блоков, сложна в настройке и весьма чувствительна к изменению параметров системы. Кроме того, применение таких систем, связано с использованием преобразователя частоты со сложной системой управления ключами инвертора, работающего в режиме источника напряжения, необходимостью использования двойного координатного преобразования и применения специальных двигателей с датчиками Холла или создания вычислительного блока на основе математической модели двигателя [88, 96].

Альтернативой сложным приводам с векторным управлением для переработки высоковязких резиновых смесей могут послужить более простые модификации систем автоматического управления (САУ) электроприводом переменного тока, работающие в режиме источника тока, формирующие требуемый момент, при использовании в силовой части ПЧ автономного инвертора тока (АИТ) [32, 34, 86]. При переключениях ключей АИТ в обмотках статора формируются токи, а напряжения формируются при уже сформированной форме фазного тока. Фазовый сдвиг между током и напряжением образуется путем сдвига напряжения относительно тока. В результате исчезают промежутки, в течении которых уже произошло переключение ключей инвертора, а ток имеет прежнее направление из-за индуктивного характера нагрузки [86].

При частотно-токовом управлении, аналогично векторной системе, возможно управление составляющими тока по двум перпендикулярным осям, что дает возможность регулировать момент двигателя и задавать режим работы с желаемым потоком возбуждения.

### **5.2. Математическое описание и структура АД в динамике при питании от источника тока**

Для определения основных возможностей частотно-токового управления электроприводом червячных машин протекторного типа рассмотрим характеристики АД при питании от источника тока (ИТ). Схема замещения АД в установившемся режиме при питании от ИТ представлена на рис. 5.1 [64, 65].

[Введите текст]

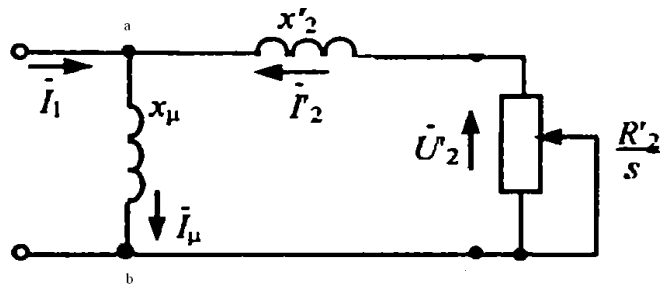


Рис. 5.1. Схема замещения АД при питании от источника тока

Здесь по сравнению со схемой замещения рис. 4.8 за счет бесконечно большого внутреннего сопротивления ИТ сопротивлением обмоток статора пренебрегают. При постоянном значении модуля тока  $I_1$  падение напряжения  $U_{ab}$  будет определяться полным сопротивлением участка a-b схемы замещения. Модуль комплексного сопротивления участка a-b:

$$z_{ab} = x_{\mu} \sqrt{\frac{1 + (s\omega_1 L_{2\sigma}/R_2)^2}{1 + (s\omega_1 L_2/R_2)^2}} = x_{\mu} \xi_{ab} \quad (5.1)$$

$U_{ab}$  можно представить через ток статора  $I_1$  и полное сопротивление  $z_{ab}$  как  $U_{ab} = I_1 z_{ab} = I_1 x_{\mu} \xi_{ab}$ , т.е. характер его изменения полностью соответствует изменению  $\xi_{ab}$ , т.к.  $I_1$  и  $x_{\mu}$  постоянные величины.

Отсюда ток намагничивания

$$I_{\mu} = U_{ab}/x_{\mu} = I_1 \xi_{ab} \xrightarrow{s \rightarrow \infty} I_1 k_{2\sigma} \quad (5.2)$$

где  $k_{2\sigma} = L_{2\sigma}/L_{\mu}$  - коэффициент рассеяния ротора.

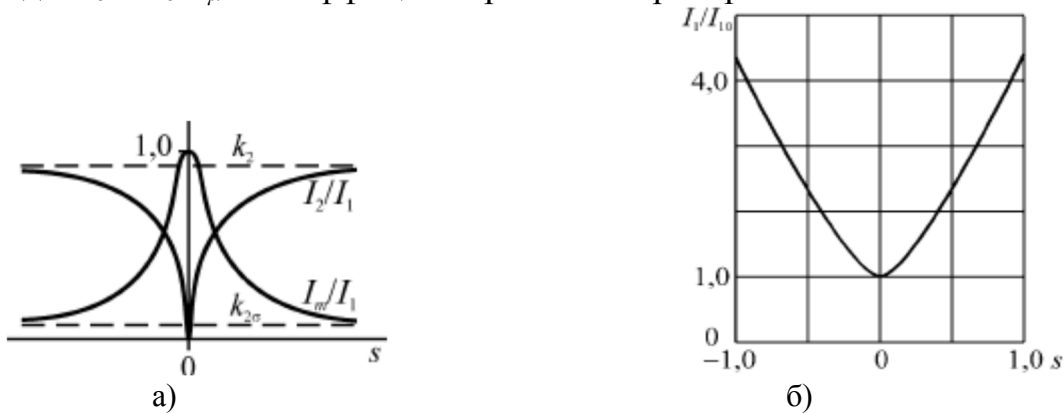


Рис. 5.2. Зависимость токов намагничивания и ротора от скольжения (а), и относительное изменение тока статора, стабилизирующее основной магнитный поток (б)

Изменение тока намагничивания в функции скольжения показано на рис. 5.2, а. Ток статора в процессе работы нужно изменять в зависимости от скольжения обратно пропорционально  $\xi_{ab}(s)$ , т.е.  $I_1(s) = \frac{I_{10}}{\xi_{ab}(s)}$ , где  $I_{10}$  - ток холостого хода (рис. 5.2, б). Тогда:

$$I_{\mu}(s) = I_1(s) \xi_{ab}(s) = \frac{I_{10}}{\xi_{ab}(s)} \xi_{ab}(s) = I_{10} = const \quad (5.3)$$



Этот режим соответствует работе с постоянным магнитным потоком, равным потоку холостого хода [96]. Для общего случая частотного управления функциональную зависимость  $I_1(s)$  можно представить в виде:

$$I_1(s) = I_{10} \sqrt{\frac{1 + (s\omega_1 L_{2\sigma} / R_2)^2}{1 + (s\omega_1 L_2 / R_2)^2}} \quad (5.4)$$

Т.е. в этом случае управление током статора нужно осуществлять в функции частоты ротора  $\omega_2 = s \omega_1$ . Из схемы замещения (рис. 5.1) ток ротора можно определить как

$$I_2 = \frac{U_{ab}}{\sqrt{(R_2/s)^2 + x_{2\sigma}^2}} = \frac{I_1 z_{ab} s}{R_2 \sqrt{1 + (s\omega_1 L_2 / R_2)^2}} = I_1 \frac{s\omega_1 L_\mu}{R_2 \sqrt{1 + (s\omega_1 L_2 / R_2)^2}} \xrightarrow{s \rightarrow \infty} I_1 k_2 \quad (5.5)$$

Характер изменения тока ротора показан на рис. 5.2, а. В режиме холостого хода он равен нулю, а с увеличением скольжения монотонно стремится к значению  $I_1 k_2$ .

Таким образом, при питании АД от источника тока с изменением нагрузки происходит перераспределение тока между ветвями намагничивания и ротора. В отличие от режима питания источником напряжения (ИН), электромеханические характеристики монотонны и симметричны относительно точки холостого хода [96].

На основании табл. 4.2 можно представить электромагнитный момент АД в виде векторного произведения токов ротора и статора:

$$M = \frac{3}{2} Z_p L_\mu [\bar{I}_2 \times \bar{I}_1] = \frac{3}{2} Z_p L_\mu [\bar{I}_2 \times (\bar{I}_\mu - \bar{I}_2)] = \frac{3}{2} Z_p L_\mu [\bar{I}_2 \times \bar{I}_\mu] = \frac{3}{2} Z_p L_\mu I_{2\max} I_{\mu\max} \sin \psi, \quad (5.6)$$

где  $I_{2\max}$  и  $I_{\mu\max}$  - амплитуды или модули векторов тока ротора и намагничивания,  $\sin \psi$  - угол между векторами токов. Согласно векторной диаграмме при токовом управлении АД (рис. 5.3)  $\psi + \varphi_2 = \pi / 2 \Rightarrow \sin \psi = \cos \varphi_2$

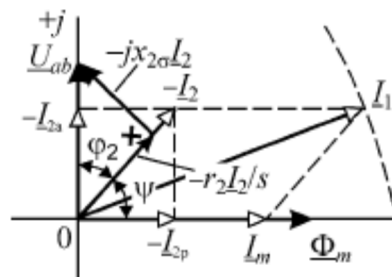


Рис. 5.3. Векторная диаграмма АД при токовом управлении

Учитывая это равенство и переходя к действующим значениям, получим:

$$M = \frac{3}{2} Z_p L_\mu I_{2\max} I_{\mu\max} \cos \varphi_2 = 3 Z_p L_\mu I_{2a} I_{\mu\max}, \quad (5.7)$$

где  $I_{2a}$  активная составляющая тока ротора, определяемая как

$$I_{2a} = \frac{U_{ab} s}{R_2 \sqrt{1 + (s\omega_1 L_2 / R_2)^2}} = I_1 \frac{z_{ab} s}{R_2 \sqrt{1 + (s\omega_1 L_2 / R_2)^2}}$$

Тогда, с учетом (5.2), электромагнитный момент АД будет равен

$$M = \frac{2M_k}{s_k/s + s/s_k}, \quad (5.8)$$

где  $M_k = \frac{3}{2} Z_p \frac{L_\mu^2}{L_2} I_1^2$  - критический момент,  $s_k = \pm \frac{R_2}{x_2}$  - критическое

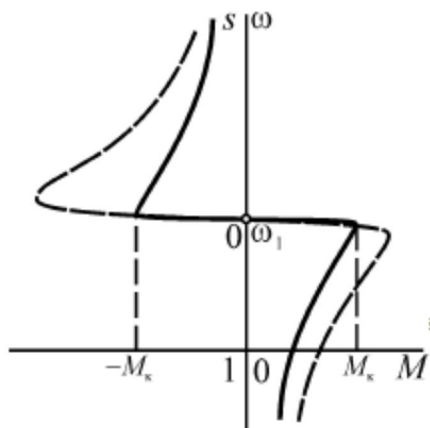
скольжение, при питании от источника тока.

Выражение (5.8) представляет формулу Клосса, но в отличие от режима питания ИН, в ней отсутствуют составляющие  $as_\epsilon = R_1 s_\epsilon / R_2$ , т.к. питание от ИТ исключает влияние падения напряжения в цепи статора АД ( $R_1 + jx_{1\sigma}$ ), что эквивалентно условию  $R_1 = x_{1\sigma} = 0$ . Как следствие, критические моменты при токовом питании в двигательном и генераторном режиме одинаковы. Сравнивая критические моменты в двигательном режиме (рис. 5.5) при двух видах питания и полагая, что ток статора равен номинальному, получим для их соотношения [96]:

$$\frac{M_{кU}}{M_{кI}} = \frac{U_{I_{ном}}^2}{I_{I_{ном}}^2} \cdot \frac{L_2}{L_\mu^2 \omega_{I_{ном}}^2 L_k} = \frac{3}{1}$$

Для критических скольжений:

$$\frac{s_{кU}}{s_{кI}} = \frac{x_2}{\sqrt{R_1 + x_k}} = \frac{3}{20}$$



**Рис. 5.4.** Механические характеристики АД при питании от ИН (пунктирная линия), при питании от ИТ (сплошная)

При питании от ИТ АД развивает при прочих равных условиях больший электромагнитный момент, чем в случае питания от источника напряжения, что позволяет избежать «застойных» зон в формирующей головке вследствие затвердевания вязкоупругой смеси при низких скоростях вращения червяка. Для получения представления о количественном соотношении положим  $I_1 = I_{I_{ном}} \approx I_2$ ;  $s = s_{ном}$  и сопоставим критический момент  $M_{кI}$  с  $M_{ном}$ , соответствующим номинальному скольжению при питании от ИН. Тогда

$$\frac{M_{кI}}{M_{ном}} = \frac{s_{ном} \omega_{I_{ном}} L_\mu^2}{R_2 x_2} = \frac{1,3}{4,5}$$

Величина критического момента не зависит от частоты, а критическое скольжение можно представить в виде

$$s_k = \pm \frac{R_2}{x_2} = \frac{R_2}{\omega_1 L_2} = \pm \frac{1}{\omega_1 T_2} \quad (5.9)$$

Скольжение по определению является отношением частоты тока ротора к частоте тока статора, т.е.  $s_{\dot{\epsilon}} = \omega_{2\dot{\epsilon}} / \omega_1$ . Следовательно, частота тока ротора соответствующая критическому скольжению равна  $\omega_{2\dot{\epsilon}} = 1/T_2 = const = \omega_1 - \omega_{\dot{\epsilon}}$ , поэтому при изменении частоты питания  $\omega_1$  частота вращения соответствующая критическому скольжению  $\omega_k$  будет изменяться так, чтобы разность этих частот оставалась постоянной [96].

Таким образом, с изменением частоты питания АД его механические характеристики будут просто смещаться параллельно естественной характеристике (рис. 5.5).

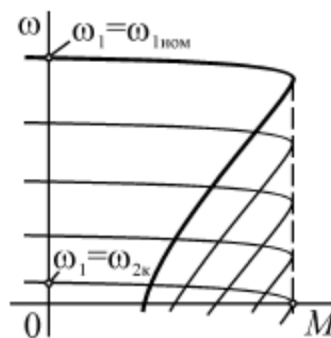


Рис. 5.5. Механические характеристики АД при частотно-токовом управлении

Еще одним важным преимуществом при управлении током статора с помощью ИТ является пониженный порядок исходной системы дифференциальных уравнений (3.16). Анализ динамических свойств АД можно провести на основе векторного уравнения ротора в системе координат  $x, y$ , если в нем ток ротора представить через ток статора  $\bar{I}_2 = (\psi_2 - L_\mu \bar{I}_1) / L_2$ . Записав это выражение в форме Коши

$$\frac{d\psi_2}{dt} = \frac{1}{T_2} (\bar{I}_1 L_\mu - \psi_2 - j\omega_2 T_2 \psi_2)$$

и выделив составляющие векторов при совмещении оси  $x$  с вектором  $I_1$ , с учетом  $I_{1x} = I_{1m}$ ,  $I_{1y} = 0$  ( $I_{1m}$  - амплитудное значение тока статора) и перейдя к операторной форме записи, получим [96]:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{2x} + T_2 p \psi_{2x} - \psi_{2y} \omega_2 T_2 &= I_{1m} L_\mu \\ \psi_{2y} + T_2 p \psi_{2y} - \psi_{2x} \omega_2 T_2 &= 0 \\ M &= \frac{3}{2} z_p \frac{L_\mu}{L_2} (-\psi_{2y} I_{1x}) \\ M - M_c &= J p \omega \end{aligned} \right\} \quad (5.10)$$

Или в форме системы уравнения переменных состояния

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{p}\Psi_2 &= \mathbf{A}\Psi_2 + \mathbf{B}\mathbf{I}; \\ p\omega &= (M - M_c)/J; \\ M &= 3z_p L_m (-\psi_{2Y} i_{1X}) / 2L_2 \end{aligned} \right\}, \quad (5.11)$$

где  $\Psi_2 = \begin{bmatrix} \psi_{2X} \\ \psi_{2Y} \end{bmatrix}$  - матрица проекций потокосцепления ротора;

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1/T_2 & \omega_2 \\ -\omega_2 & -1/T_2 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} L_m/T_2 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} - \text{матрицы коэффициентов};$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_{1X} \\ i_{1Y} \end{bmatrix} - \text{матрица проекций тока статора}.$$

Структурная схема, соответствующая системе (5.10), представлена на рис. 5.6

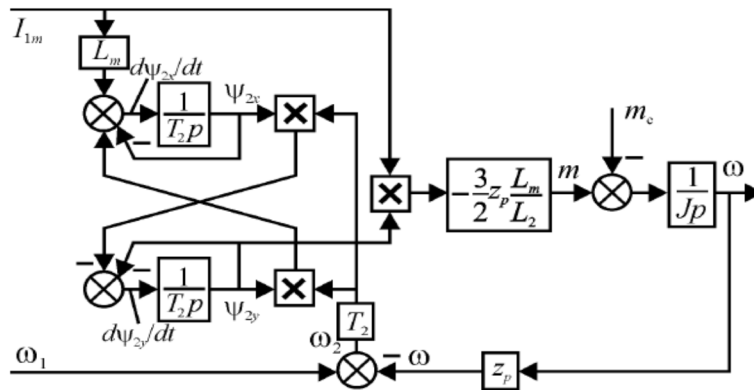


Рис. 5.6. Структурная схема АД при частотно-токовом управлении

Структурная схема имеет два независимых управляющих входа: вход задания тока и частоты статора, но, согласно (5.3) для эффективной работы системы необходимо введение функциональной связи между каналом управления током и скольжением, что, как и в векторной системе, позволяет реализовать раздельное управление моментом и скоростью червяка.

Анализ приведенной структурной схемы затруднителен, так как система (5.10) нелинейна. Для качественного анализа структуры АД и дальнейшего синтеза замкнутой системы управления АД необходимо провести линеаризацию системы (5.10) путем разложения в ряд Тейлора в окрестности точки статического равновесия следующих величин [51, 52]:

$$\begin{aligned} \psi_{2x} &= \psi_{2x0} + \Delta\psi_{2x}, & \omega &= \omega_0 + \Delta\omega, & \omega_2 &= \omega_1 - \omega = \omega_{20} + \Delta\omega_2, & M &= M_0 + \Delta M, \\ \psi_{2y} &= \psi_{2y0} + \Delta\psi_{2y}, & \omega_1 &= \omega_{10} + \Delta\omega_1, & I_{1x} &= I_{1x0} + \Delta I_{1x}, & M_c &= M_{c0} + \Delta M_c. \end{aligned}$$

Здесь  $\omega$  – частота вращения ротора,  $\omega_2$  – частота роторной ЭДС.

Получим систему уравнений относительно малых приращений:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{2x0} + \Delta\psi_{2x0} + T_2 p(\psi_{2x} + \Delta\psi_{2x}) - (\psi_{2y0} + \Delta\psi_{2y})(\omega_{20} + \Delta\omega_2)T_2 &= (I_{1x0} + \Delta I_{1x})L_\mu \\ \psi_{2y0} + \Delta\psi_{2y0} + T_2 p(\psi_{2y} + \Delta\psi_{2y}) - (\psi_{2x0} + \Delta\psi_{2x})(\omega_{20} + \Delta\omega_2)T_2 &= 0 \\ M_0 + \Delta M &= \frac{3}{2} z_p \frac{L_\mu}{L_2} (-\psi_{2y0} - \Delta\psi_{2y})(I_{1x0} + \Delta I_{1x}) \\ M_0 + \Delta M - M_{c0} - \Delta M_c &= Jp(\omega_0 - \Delta\omega) \end{aligned} \right\}$$

Или после преобразований:

$$\left. \begin{aligned} \psi_{2x0} + \Delta\psi_{2x} + T_2 p\psi_{2x0} + T_2 p\Delta\psi_{2x} - (\psi_{2y0}\omega_{20} + \psi_{2y0}\Delta\omega_2 + \Delta\psi_{2y}\omega_{20} + \Delta\psi_{2y}\Delta\omega_2)T_2 &= (I_{1x0} + \Delta I_{1x})L_\mu \\ \psi_{2y0} + \Delta\psi_{2y} + T_2 p\psi_{2y0} + T_2 p\Delta\psi_{2y} - (\psi_{2x0}\omega_{20} + \psi_{2x0}\Delta\omega_2 + \Delta\psi_{2x}\omega_{20} + \Delta\psi_{2x}\Delta\omega_2)T_2 &= 0 \\ M_0 + \Delta M &= \frac{3}{2} z_p \frac{L_\mu}{L_2} (-\psi_{2y0}I_{1x0} - \psi_{2y0}\Delta I_{1x} - \Delta\psi_{2y}I_{1x0} + \Delta\psi_{2y}\Delta I_{1x}) \\ M_0 + \Delta M - M_{c0} - \Delta M_c &= Jp(\omega_0 - \Delta\omega) \end{aligned} \right\}$$

Отбрасывая слагаемые, являющиеся произведениями приращений, а также произведениями установившихся значений, запишем систему уравнений относительно малых приращений. Сделав замену  $\omega_2 = \omega_1 - \omega$ , имеем систему уравнений, в которой можно выделить переменные состояния и управляющие воздействия:

$$\left. \begin{aligned} \Delta\psi_{2x}(1 + T_2 p) - T_2(\psi_{2y0}\Delta\omega_1 + \Delta\psi_{2y}\omega_{10} - \psi_{2y0}\Delta\omega - \Delta\psi_{2y}\omega_0) &= \Delta I_{1x}L_\mu \\ \Delta\psi_{2y}(1 + T_2 p) - T_2(\psi_{2x0}\Delta\omega_1 + \Delta\psi_{2x}\omega_{10} - \psi_{2x0}\Delta\omega - \Delta\psi_{2x}\omega_0) &= 0 \\ \Delta M &= \frac{3}{2} z_p \frac{L_\mu}{L_2} (-\psi_{2y0}\Delta I_{1x} - I_{1x0}\Delta\psi_{2y}) \\ \Delta M - \Delta M_c &= Jp\Delta\omega \end{aligned} \right\}. \quad (5.12)$$

Приведем уравнения к каноническому виду, приняв в качестве переменных состояний системы  $\Delta\psi_{2x}$ ,  $\Delta\psi_{2y}$ ,  $\Delta\omega$ :

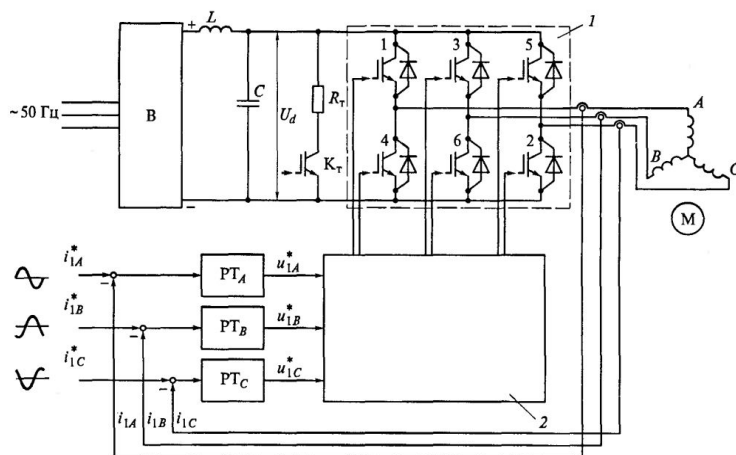
$$\left. \begin{aligned} p\Delta\psi_{2x} &= -\frac{1}{T_2}\Delta\psi_{2x} + \psi_{2y0}\Delta\omega_1 + \Delta\psi_{2y}\omega_{10} - \psi_{2y0}\Delta\omega - \Delta\psi_{2y}\omega_0 + \frac{L_m}{T_2}\Delta I_{1x} \\ p\Delta\psi_{2y} &= -\frac{1}{T_2}\Delta\psi_{2y} + \psi_{2x0}\Delta\omega_1 + \Delta\psi_{2x}\omega_{10} - \psi_{2x0}\Delta\omega - \Delta\psi_{2x}\omega_0 \\ p\Delta\omega &= -\frac{3}{2}z_p \frac{L_\mu}{L_2 J}(\psi_{2y0}\Delta I_{1x}) - \frac{3}{2}z_p \frac{L_\mu}{L_2 J}(I_{1x0}\Delta\psi_{2y}) - \frac{\Delta M_c}{J} \end{aligned} \right\}. \quad (5.13)$$

### 5.3 Функциональная и структурная схема частотного электропривода при питании от источника тока

В настоящее время с развитием современной электронной базы (транзисторов IGBT) принцип частотно-токового управления реализуется с применением преобразователя со звеном постоянного тока при использовании АИН с ШИМ, который охватывается обратной связью непосредственно по току статора двигателя, придавая ПЧ свойство преобразователя, управляемого

[Введите текст]

током. Один из вариантов реализации описанной системы приведен на рис. 5.7 [88, 93].



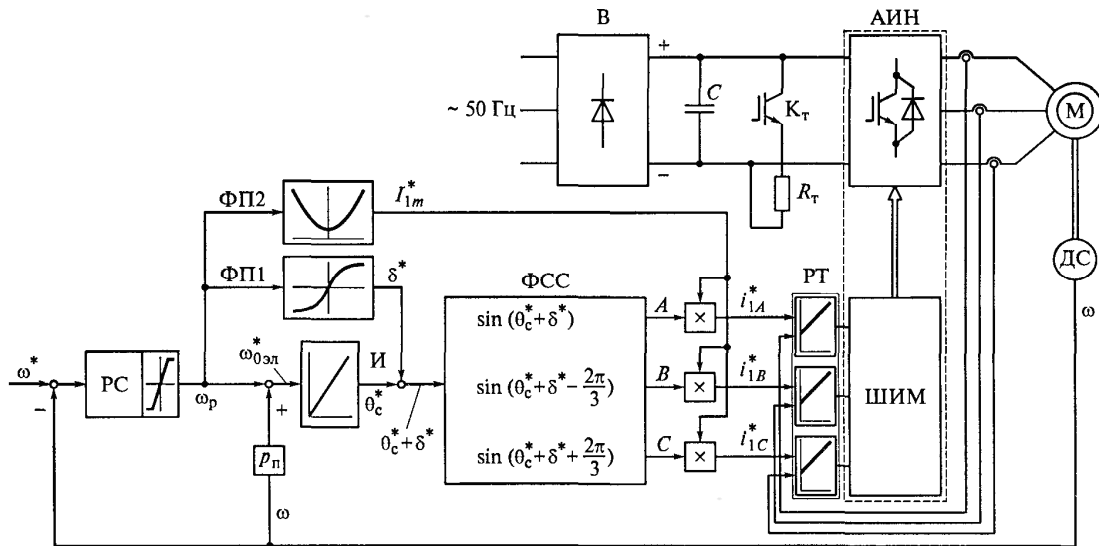
**Рис. 5.7.** ПЧ с АИН, управляемый ток: 1 – автономный инвертор напряжения, 2 – система управления АИН

Для получения жестких механических характеристик привода, подобно приводам постоянного тока, требуется устранение фазового рассогласования между основными гармониками выходного тока и напряжения. Данное обстоятельство приводит к тому, что в системе без принудительной ориентации тока переходные процессы имеют неблагоприятный характер. Момент нарастает медленно и устанавливается с большим числом колебаний. Соответствующие колебания потока приводят к перерегулировкам напряжений на АД и на датчиках тока, что вызывает необходимость увеличения установленной мощности ПЧ [73, 81, 83, 85, 87].

Одним из эффективных вариантов регулирования момента АД, способствующее его нарастанию за минимальное время, может стать формирование тока с принудительной фазовой ориентацией относительно потокоцепления при поддержании постоянства  $\Psi_2$  в установившихся режимах работы машины. Наиболее близкое решение реализации схемы с U/f регулированием при поддержании закона  $\Psi_2 = const$  приведено в [88]. Данная схема выполнена с использованием АИН, управляемого ток, где на входах регуляторов тока формируются сдвинутые на  $120^\circ$  синусоидальные сигналы задания тока статора (рис. 5.8)

Уравнение связи векторов тока статора и потокоцепления ротора в этом случае имеет вид:

$$\bar{I}_1 = (1 + j\omega_2 T_2) \frac{\bar{\Psi}_2}{L_\mu} = \frac{\bar{\Psi}_2}{L_\mu} + j\omega_2 T_2 \frac{\bar{\Psi}_2}{L_\mu} \quad (5.14)$$



**Рис. 5.8** Функциональная схема регулирования скорости АД с поддержанием  $\Psi_2 = \text{const}$  в установившемся режиме

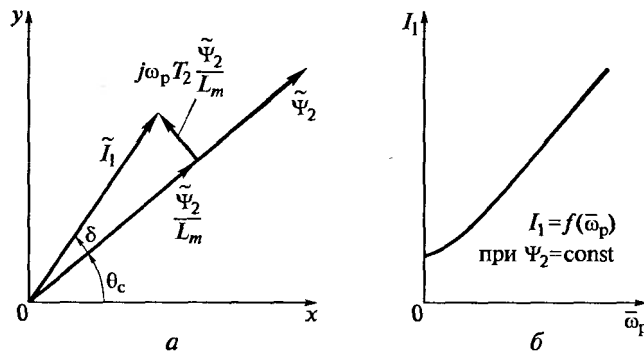
Или относительно модулей:

$$I_1 = \frac{\Psi_2}{L_\mu} \sqrt{(1 + (\omega_2 T_2)^2)}$$

При идеальном холостом ходе, когда ротор вращается с синхронной скоростью  $\omega_0 = \omega_{0\text{вз}} / p_1$ , а частота роторной ЭДС равна нулю, векторы  $I_1$  и  $\Psi_2$  совпадают в пространстве и угол нагрузки  $\delta$  равен нулю. По мере увеличения нагрузки возрастает угол нагрузки, определяемый по формуле:

$$\delta = \arctg(\omega_2 T_2 \frac{\Psi_2}{L_\mu} / \frac{\Psi_2}{L_\mu}) = \arctg(\omega_2 T_2). \quad (5.15)$$

Построенные в соответствии с выражением (5.13) векторы  $I_1$  и  $\Psi_2$  в системе координат  $x, y$  показаны на рис. 5.12, а.



**Рис. 5.9.** Пространственная векторная диаграмма (а) и характеристика функционального преобразователя ФП2

Из вышеизложенного следует, что сдвиг вектора тока  $I_1$  относительно  $\Psi_2$  однозначно определяется значением частоты роторной ЭДС, т.е. значением момента нагрузки АД. Из рис. 5.9 следует, что в каждый момент времени угол [Введите текст]

поворота вектора  $I_1$  относительно системы координат  $x, y$  определяется как сумма углов  $\theta_0 + \delta\theta_0 = \int_0^t \omega_{0_{\text{эп}}} dt$ . Характер зависимости  $I_1 = f(\omega_2)$  показан на рис. 5.9, б.

Представленное на рис. 5.8 схемное решение с помощью обратных связей по выходным токам инвертора неизбежно ведёт к усложнению системы и уменьшению запаса устойчивости всей системы управления экструдером. Это проявляется в противоречии между точностью поддержания постоянства фазового угла и устойчивостью.

Поэтому одним из предпочтительных вариантов может оказаться перевод АИН в режим параметрического источника тока, повторяющего известное свойство автономного инвертора тока (АИТ) задавать фазу выходных токов изменением угла управления вентилями [28,32]. Тогда наличие входной индуктивности и охват выпрямителя обратной связью по выпрямленному току могут рассматриваться в качестве дополнительной меры, ведущей к стабилизации величины тока на выходе преобразователя [86, 105].

Режим параметрического источника тока может быть реализован в частотно-токовом ЭП на основе двухзвенного ПЧ с активным выпрямителем (АВ) и АИН. [86, 95]. Предлагаемая схема реализации приведена на рис. 5.13.

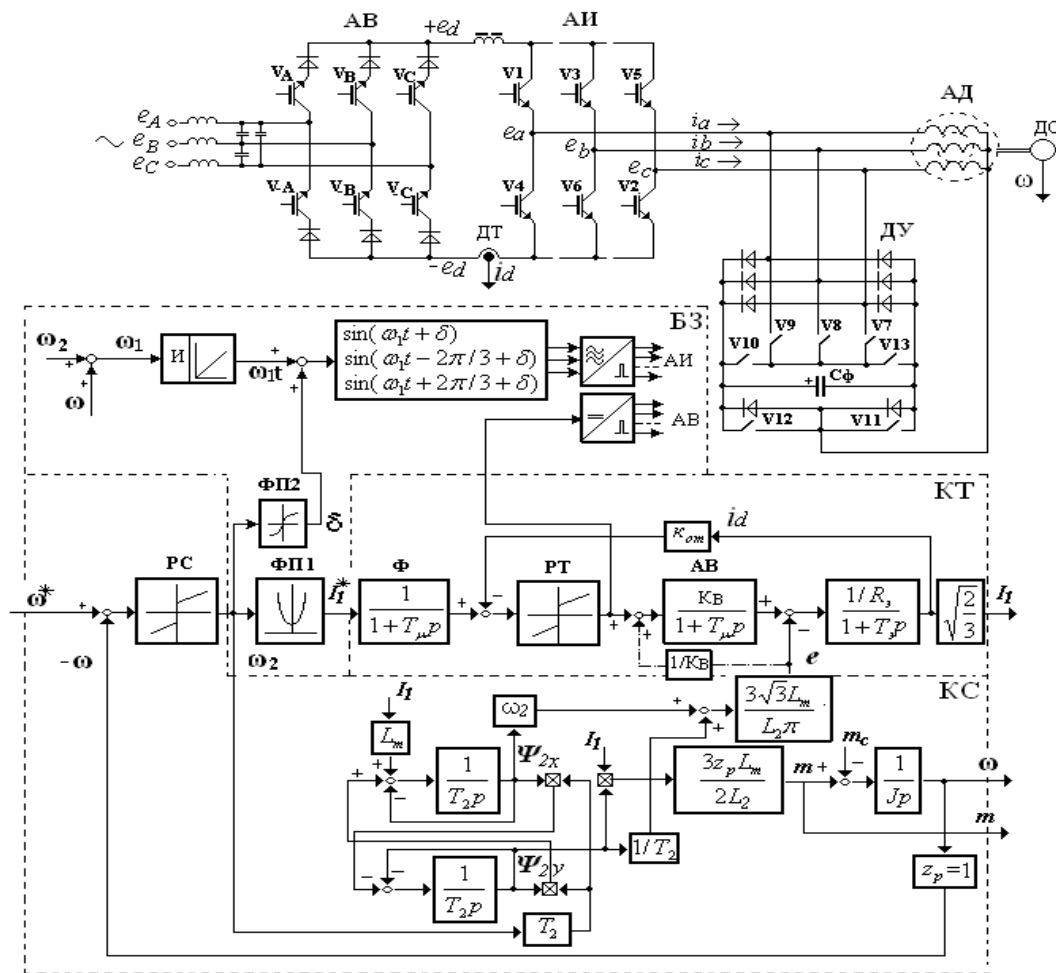
В отличие от традиционной схемы АИН, силовая схема предлагаемого инвертора тока выполняется на ключах с односторонней проводимостью, работа которых происходит в заданные управляющими импульсами промежутки времени длительностью  $\lambda = 2\pi/3$ . С целью контроля за уровнем перенапряжений, эти переключения должны сопровождаться достаточно плавным изменением токов коммутирующих фаз. Можно показать, что основным звеном в осуществлении данного процесса является полярный конденсатор фильтра низких частот, совмещающий функции демпфирования токов и защиты от перенапряжений [86].

На рис.5.10 для контроля уровня напряжений на вентилях потребовалось перемещение традиционных для АИН элементов в виде обратных диодов и полярного конденсатора фильтра  $C_\phi$  из звена постоянного тока в параллельно подключенное к статорным обмоткам АД транзисторно-конденсаторное демпфирующее устройство (ДУ).

Указанное изменение конфигурации двухзвенного ПЧ не приводит к прерыванию реактивных токов в обмотках двигателя, а потому с точки зрения защиты от коммутационных перенапряжений является адекватной мерой [86].

Введение в схему ДУ дополнительных коммутирующих ключей  $V7...V13$  оправдывается сравнительно малой мощностью этих элементов, а также необходимостью решения целого ряда задач, связанных с проведением принудительной коммутации знакопеременных токов. Осциллограммы, полученные компьютерным моделированием (рис.5.11) иллюстрируют запуск и работу инвертора  $V1, V2, \dots, V6$  с на активно-индуктивную нагрузку.





**Рис. 5.10.** Функциональная и структурная схемы частотно-токового электропривода на основе двухзвенного ПЧ

Видно, что диоды выпрямительного моста в схеме ДУ на межкоммутационных интервалах оказываются запертыми, в связи с чем уровень напряжения  $U_{cf}$  в установившемся режиме остаётся постоянным. Устранение известного эффекта накапливания заряда на обкладках полярного конденсатора в схеме с диодами достигается чередованием частичного разряда и заряда на каждом интервале коммутации. Для этого проведение каждой коммутации с помощью ДУ осуществляется в два этапа. Замыкание ключей  $V_9, V_{10}, V_{11}$  на первом этапе приводит к согласному подключению конденсатора  $C_f$  в параллель к выходящей из работы фазе нагрузки (рис. 5.15 а). Переход тока этой фазы ( $i_a$ ) в цепь конденсатора сопровождается частичным разрядом последнего и уменьшением тока выходящего из работы силового ключа  $V_1$ . Последующее выключение  $V_1$  при уменьшенной (примерно вдвое) величине тока способствует уменьшению коммутационных потерь мощности и повышению перегрузочной способности привода.

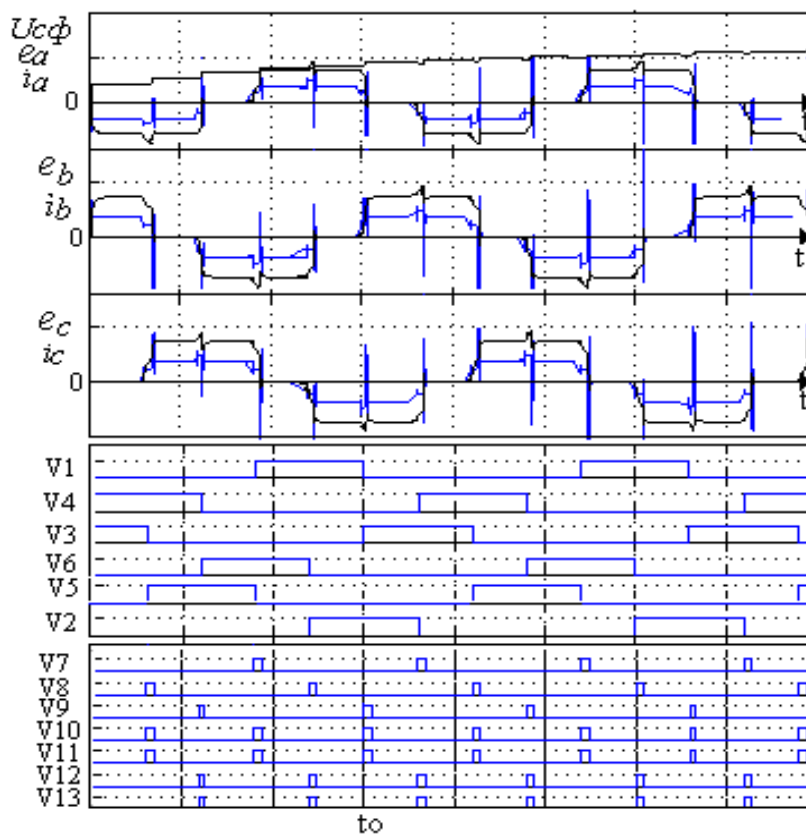


Рис. 5.11. Процессы управления в схеме АИН

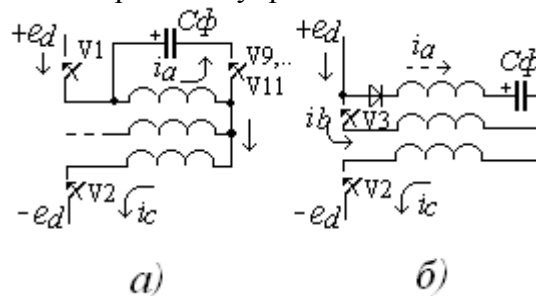


Рис. 5.12. Схемы замещения ДУ на первом и втором этапах коммутации

Как видно из схемы замещения рис.5.12, б, коммутация завершается повторным зарядом конденсатора  $C_\phi$  под воздействием снижающегося до нуля тока фазы  $a$  ( $i_a \rightarrow 0$ ). Так же, как это происходит в схеме АИТ, встречное напряжение конденсатора на втором этапе способствует плавному вытеснению тока  $I_d$  в цепь вступающей в работу фазы  $b$  с очередным ключом  $V3$  ( $i_b \rightarrow I_d$ ). Можно видеть, что результатом служит перевод тока из одной фазы в другую в заданные промежутки времени. Этот процесс происходит с передачей энергии в конденсатор, однако его последующий разряд исключает необходимость введения в схему разрядного сопротивления. В соответствии с представленным на рис.5.9 алгоритмом подачи управляющих импульсов, коммутации тока в других фазах происходят аналогично.

В отличие от АИН, унитарные транзисторы в схеме выпрямителя нуждаются в защите от воздействия обратного напряжения с помощью последовательно включённых диодов. Указанные ключи позволяют решать задачи формирования токов в схемах АВ модуляционными методами. Для

[Введите текст]

рассмотрения этих свойств установим связь входных и выходных напряжений с помощью матричного уравнения

$$\begin{bmatrix} +e_d \\ -e_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_A & s_B & s_C \\ s_{-A} & s_{-B} & s_{-C} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix}. \quad (5.16)$$

Коэффициентами данного уравнения служат логические переменные  $s_A, s_{-A}, s_B, \dots$ , выполняющие роль управляющих импульсов для одноимённых транзисторов в схеме АВ.

Отвечая требованиям электромагнитной совместимости, модуляционные переключения должны приводить к непрерывной квазисинусоидальной форме токов на сетевом входе и достаточно гладкому току на выходе АВ. Диаграммы на рис.5.13, иллюстрируют работу АВ на основе высокочастотного широтно-импульсного регулирования (ШИР) выпрямленного напряжения. Регулирование предполагает выработку первичных импульсов  $f$  при сравнении управляющего  $x$  и опорного  $x_0$  сигналов с последующим их распределением по транзисторам в соответствии с логическим уравнением

$$\begin{bmatrix} s_A \\ s_{-A} \\ s_B \\ s_{-B} \\ s_C \\ s_{-C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (s_{CB2} + s_{BC1}) & (s_{AB1} + s_{AC2}) & (s_{AC1} + s_{AB2}) \\ (s_{BC2} + s_{CB1}) & (s_{BA1} + s_{CA2}) & (s_{CA1} + s_{BA2}) \\ (s_{AC2} + s_{CA1}) & (s_{BC1} + s_{BA2}) & (s_{BA1} + s_{BC2}) \\ (s_{AC1} + s_{CA2}) & (s_{AB2} + s_{CB1}) & (s_{AB1} + s_{CB2}) \\ (s_{AB1} + s_{BA2}) & (s_{CB2} + s_{CA1}) & (s_{CB1} + s_{CA2}) \\ (s_{AB2} + s_{BA1}) & (s_{AC1} + s_{BC2}) & (s_{BC1} + s_{AC2}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f \\ f \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

где  $s_{AB1}, s_{CB2}, \dots, s_{AC2}$  – синхронизирующие импульсы, делящие полупериод сетевого напряжения на шесть равных интервалов.

Согласно (5.15), (5.16), формирование выпрямленного напряжения  $e_d(t)$  происходит чередующимся подключением выходных зажимов АВ к линейным напряжениям сети двух уровней: верхнего уровня относительной величины  $0.86-1.0$  и среднего уровня ( $0.5-0.86$ ). Ограниченный в указанных пределах диапазон регулирования оказывается в большинстве случаев достаточным для поддержания постоянства тока на выходе АВ, в предположении, что функции регулирования выходного напряжения и частоты выполняются с помощью АИ. Положительной особенностью указанного алгоритма является увеличенный интервал активного состояния каждого вентиля на периоде сети, в пределе составляющий  $\lambda = \pi$ , вместо  $\lambda = 2\pi/3$  при обычном способе импульсно-фазового управления [81]. Как видно из диаграмм рис. 5.16, результатом служит устранение в сетевом токе традиционных для трёхфазной мостовой схемы

нулевых пауз. Оценить влияние переключений на форму сетевых токов можно, получив кривые напряжений в цепях протекания этих токов:

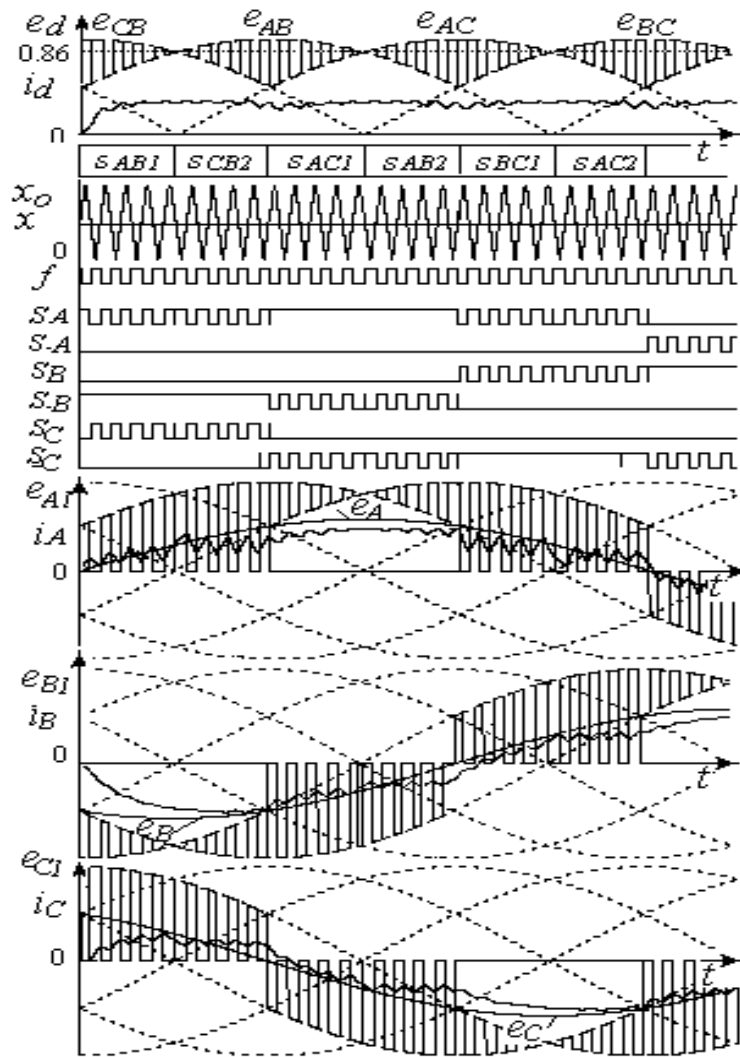


Рис. 5.13. Процессы управления в схеме АВ

$$\begin{aligned}
 e_{A1}(t) &= e_{AB}(t) \cdot (s_A \cdot s_{-B} + s_{-A} \cdot s_B) + e_{AC}(t) \cdot (s_A \cdot s_{-C} + s_{-A} \cdot s_C); \\
 e_{B1}(t) &= e_{BA}(t) \cdot (s_B \cdot s_{-A} + s_{-B} \cdot s_A) + e_{BC}(t) \cdot (s_B \cdot s_{-C} + s_{-B} \cdot s_C); \\
 e_{C1}(t) &= e_{CA}(t) \cdot (s_C \cdot s_{-A} + s_{-C} \cdot s_A) + e_{CB}(t) \cdot (s_C \cdot s_{-B} + s_{-C} \cdot s_B).
 \end{aligned}
 \tag{5.18}$$

Из диаграмм рис.5.15 видно, что формирование этих напряжений происходит под воздействием двух видов модуляции: амплитудной – со стороны питающей сети и широтно-импульсной – со стороны звена постоянного тока. Положительное влияние амплитудной модуляции приводит к тому, что основные гармоники рассматриваемых напряжений совпадают по времени с напряжениями сетевых фаз  $e_A(t), e_B(t), e_C(t)$ . Кривые фазных токов  $i_A(t), i_B(t), i_C(t)$  на рис.5.16 отражают реакцию активно-индуктивной цепи на указанные напряжения, что подтверждает возможность приближения формы

токов к форме сетевых напряжений увеличением частоты переключения вентиляей.

#### 5.4. Синтез регуляторов в системе частотно-токового управления

Синтез регуляторов в частотно-токовом приводе с фазовой ориентацией тока статора по углу поворота ротора осуществляется в системах с подчинённым регулированием координат в контурах тока (КТ) и скорости (КС) [44, 88, 105]. Основной задачей синтеза служит получение регулировочных и нагрузочных свойств асинхронного привода, не уступающих приводам постоянного тока. Система отличается предельной простотой поддержания постоянства магнитного потока ( $\Psi_2 = const$ ) заданием величины ( $I_1^*$ ) и фазы ( $\delta$ ) вектора тока на выходе АИ в функции частоты скольжения ротора ( $\omega_2$ ). Для этого в блоке задания (БЗ) рис. 5.13 используются функциональные построители ФП1, ФП2, реализующие зависимости (5.14, 5.15). Особенность настройки регулятора тока (РТ) в условиях фазового ориентирования состоит в необходимости компенсации влияния противо-эдс вращения, определяемой как [96, 105]

$$e(t) = -3\sqrt{3}L_m(\omega\psi_{2Y} + \psi_{2X}/T_2)/L_2\pi \quad (5.19)$$

Традиционное применение положительной обратной связи, показанной на рис.5.11 штрихпунктирной линией, может усложнить и, тем самым, лишить систему указанного достоинства. Альтернативным решением служит получение компенсирующей составляющей сигнала без использования специального датчика противо-эдс. Как показано в [87], для этого достаточно изменить параметры ПИ-регулятора тока. При этом передаточные функции РТ и установленного на его входе фильтра (Ф) принимают вид

$$W_{РТ}(p) = \frac{(1 + aT_\mu p)R_s T_s}{aT_\mu^2 k_B k_{om} p}; \quad W_\Phi(p) = \frac{1}{1 + aT_\mu p}, \quad (5.20)$$

где  $T_\mu$  - постоянная времени АВ, с,

$T_s = L_s / R_s$  - эквивалентная электромагнитная постоянная времени системы ПЧ-АД, с;

$$R_s = r_d + \frac{3}{2}k_i^2(R_s + R_r \frac{L_\mu^2}{L_2^2}), \quad L_s = L_d + \frac{3}{2}k_i^2(L_s + \frac{L_\mu^2}{L_2}) \quad - \quad \text{соответственно}$$

эквивалентные активное сопротивление и индуктивность цепи выпрямленного тока;

$r_d, L_d$  – активное сопротивление и индуктивность звена постоянного тока;

$k_i$  – модуль коммутационной функции

Для синтеза контура скорости необходимо определить передаточную функцию замкнутого контура тока КТ, входящего в состав контура скорости, приведенного на рис. 5.8.

Передаточная функция разомкнутого контура тока:

$$W_{KTpTp}(p) = \frac{I_d}{I_1^*} = \frac{1 + aT_{\mu p}}{aT_{\mu}^2 \frac{K_{\phi} K_T}{R_{\Sigma} T_{\Sigma}} p} \cdot \frac{K_{\phi}}{1 + T_{\mu} p} \cdot \frac{1/R_{\Sigma}}{1 + T_{\Sigma} p}. \quad (5.21)$$

Замыкая контур через звено обратной связи с передаточным коэффициентом  $K_{от}$ , получим:

$$W_{KTзам}(p) = \frac{W_{раз}}{1 + W_{раз} K_{от}} \quad (5.22)$$

Общая передаточная функция канала управления током с учетом (5.19)

$$W_{KT}(p) = W_{\phi} \cdot \frac{W_{раз}}{1 + W_{раз} K_{от}} \quad (5.23)$$

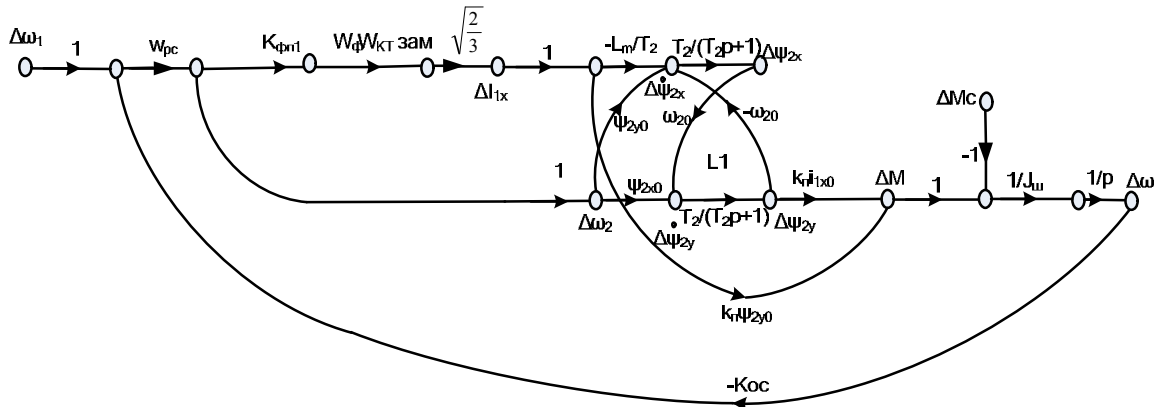
Подставив численные значения (приложение 5), получим ЛЧХ разомкнутого контура тока ( $L_{раз}, \varphi_{раз}$ ), замкнутого контура тока ( $L_{зам}, \varphi_{зам}$ ), канала управления током ( $L_{к}, \varphi_{к}$ ), показанные на рис. ПД.6 (прил. Д). Представим преобразованную структурную схему рис. 5.11 совместно с графом АД (рис. 5.8) в виде сигнального графа всей системы (рис. 5.14). Найдем передаточную функцию разомкнутого контура скорости, согласно методике Мейсона [38].

Определим контуры в графе. Граф содержит один контур

$$l_1 = \left( \frac{T_2}{T_2 p + 1} \right)^2 \omega_{20}^2.$$

Определитель графа, согласно (5.23)

$$\Delta = 1 - l_1.$$



**Рис. 5.14.** Сигнальный граф частотно-токовой системы управления АД

Граф содержит четыре пути:

$$P_1 = K_{\phi n1} \cdot W_{\phi} \cdot W_{кт.зам} \cdot \sqrt{2/3} \left( \frac{-L_m}{T_2} \left( \frac{T_2}{T_2 p + 1} \right)^2 \omega_{20} k_{\phi} I_{1x0} \right) \frac{1}{J_{\Sigma} p};$$

$$P_2 = K_{\phi n1} \cdot W_{\phi} \cdot W_{кт.зам} \cdot \sqrt{2/3} \frac{\Psi_{2y0}}{J_{\Sigma} p};$$

$$P_3 = \psi_{2y0} \omega_{20} k_n I_{1x0} \left( \frac{T_2}{T_2 p + 1} \right)^2 \frac{1}{J_\Sigma p};$$

$$P_4 = \psi_{2x0} \omega_{20} k_n I_{1x0} \frac{T_2}{T_2 p + 1} \frac{1}{J_\Sigma p}.$$

Дополнительные множители для путей:

$$\Delta_1 = 1, \Delta_2 = 1 - l_1, \Delta_3 = 1, \Delta_4 = 1.$$

На основании (5.22) передаточная функция разомкнутого контура скорости:

$$\begin{aligned} W_{разк} (p) &= \frac{\Delta \omega(p)}{\Delta \omega_1^*(p)} = \frac{P_1 \Delta_1 + P_2 \Delta_2 + P_3 \Delta_3 + P_4 \Delta_4}{\Delta} = \\ &= (K_{\phi n1} \cdot W_\phi \cdot W_{кт.зам} \cdot \sqrt{2/3} \left( \frac{-L_m}{T_2} \left( \frac{T_2}{T_2 p + 1} \right)^2 \omega_{20} k_n I_{1x0} \right) \frac{1}{J_\Sigma p} + \\ &+ K_{\phi n1} \cdot W_\phi \cdot W_{кт.зам} \cdot \sqrt{2/3} \frac{\psi_{2y0}}{J_\Sigma p} \left( 1 - \left( \frac{T_2}{T_2 p + 1} \right)^2 \omega_{20}^2 \right) + \psi_{2y0} \omega_{20} k_n I_{1x0} \left( \frac{T_2}{T_2 p + 1} \right)^2 \frac{1}{J_\Sigma p} + \\ &+ \psi_{2x0} \omega_{20} k_n I_{1x0} \frac{T_2}{T_2 p + 1} \frac{1}{J_\Sigma p} \left( 1 - \left( \frac{T_2}{T_2 p + 1} \right)^2 \omega_{20}^2 \right). \end{aligned} \quad (5.25)$$

Для численного расчета передаточной функции (5.25) требуется определить установившиеся значения  $\psi_{2x0}, \psi_{2y0}$ . Их можно получить на основании решения первого уравнения системы (5.10, а), которое в общем виде имеет вид [38,66]:

$$\Psi_2(t) = \Psi_2(0) e^{At} + \int_0^t e^{A(t-\tau)} \mathbf{B} \mathbf{I}(\tau) d\tau \quad (5.26)$$

где  $e^{At}$  - матричная экспоненциальная функция, на основании которой определяется переходная матрица состояний. Используя свойство повторяемости дискретных значений пространственного вектора трёхфазной переменной  $\Psi_2(t + \pi/3) = \Psi_2(t) \cdot e^{\pi/3}$  в диапазоне  $0 \leq t \leq \pi/3$ , при допущении постоянства тока статора  $I_1 = const$  на интервале повторяемости  $\pi/3$ , решение (5.25) на правой границе  $t=0$  этого интервала записывается в виде:

$$\Psi_2(\pi/3) = \Psi_2(0) \cdot e^{A\pi/3} + (e^{(A\pi/3)} - \mathbf{E}) A^{-1} \mathbf{B} \mathbf{I} \quad (5.27)$$

Тогда подстановкой  $\Psi_2(0) = \Psi_2(\pi/3) e^{-j\pi/3}$  в (5.26) можно получить установившиеся значения переменных на левой границе  $t=\pi/3$ , то есть в начале интервала повторяемости [34,86]:

$$\left. \begin{aligned} \Psi_2(0) &= (e^{\pi/3} - e^{(A\pi/3)})^{-1} (e^{(A\pi/3)} - 1) A^{-1} \mathbf{B} \\ \mathbf{I}(0) &= \mathbf{B}^{-1} \mathbf{A} (e^{(A\pi/3)} - 1)^{-1} (e^{\pi/3} - e^{(A\pi/3)}) \Psi_2(0) \end{aligned} \right\} \quad (5.28)$$

а так же текущие значения переменных внутри интервала  $0 \leq t \leq \pi/3$

$$\Psi_2(t) = [e^{At} (e^{\pi/3} - e^{A\pi/3})^{-1} + (e^{A\pi/3} - 1) + (e^{At} - 1)] A^{-1} \mathbf{B} \mathbf{I}(t) \quad (5.29)$$

[Введите текст]

принимая во внимание, что оператор векторного поворота в раскрытом виде имеет вид:

$$\mathbf{e}^{\pi/3} = \begin{bmatrix} \cos(\pi/3) & -\sin(\pi/3) \\ \sin(\pi/3) & \cos(\pi/3) \end{bmatrix}. \quad (5.30)$$

переходную матрицу цепи можно определить по формуле Сильвестра [66]:

$$\mathbf{e}^{\mathbf{A}t} = \sum_{k=1}^n e^{r_k t} \Phi_k, \quad (5.31)$$

где

$$\Phi_k = \frac{\prod_{l \neq k} (\mathbf{A} - r_l \mathbf{E})}{\prod_{l \neq k} (r_k - r_l)}, \quad l = 1, 2, 3, 4 \dots n \quad (5.32)$$

Здесь  $r_k, r_l$  - собственные значения или характеристические числа матрицы  $\mathbf{A}$ , т.е. простые корни характеристического уравнения цепи. Для матрицы  $\mathbf{A}$  из системы (5.11) имеем:

$$r_1(p) = -\frac{1}{T_2} + j\omega_2(p), \quad r_2(p) = -\frac{1}{T_2} - j\omega_2(p).$$

Подставляя данные корни в (5.31), получим выражение для определения принужденной составляющей переходного процесса (5.25):

$$\int_0^t \overline{\mathbf{e}^{\mathbf{A}(t-\tau)}} \overline{\mathbf{B}} \mathbf{I}(\tau) d\tau = \int_0^t \begin{bmatrix} \frac{-\frac{1}{T_2} - r_1(p)}{r_1(p) - r_2(p)} e^{r_1(p)(t-\tau)} + \frac{-\frac{1}{T_2} - r_2(p)}{r_2(p) - r_1(p)} e^{r_2(p)(t-\tau)} & \frac{\omega_2}{r_1(p) - r_2(p)} e^{r_1(p)(t-\tau)} + \frac{\omega_2}{r_2(p) - r_1(p)} e^{r_2(p)(t-\tau)} \\ \frac{\omega_2}{r_1(p) - r_2(p)} e^{r_1(p)(t-\tau)} + \frac{\omega_2}{r_2(p) - r_1(p)} e^{r_2(p)(t-\tau)} & \frac{-\frac{1}{T_2} - r_1(p)}{r_1(p) - r_2(p)} e^{r_1(p)(t-\tau)} + \frac{-\frac{1}{T_2} - r_2(p)}{r_2(p) - r_1(p)} e^{r_2(p)(t-\tau)} \end{bmatrix} \mathbf{B} \mathbf{I} d\tau \quad (5.33)$$

Интегрируя почленно, получим:

$$\begin{aligned} \psi_{2x} &= I_1 \frac{L_\mu}{T_2} \int_0^t \left( \frac{-\frac{1}{T_2} - r_1(p)}{r_1(p) - r_2(p)} e^{r_1(p)(t-\tau)} + \frac{-\frac{1}{T_2} - r_2(p)}{r_2(p) - r_1(p)} e^{r_2(p)(t-\tau)} \right) d\tau = \\ &= I_1 \frac{L_\mu}{T_2} \left[ \frac{\frac{1}{T_2} + r_1(p)}{(r_1(p) - r_2(p))r_1(p)} e^{r_1(p)(t-\tau)} (e^{-r_1(p)} - 1) + \frac{\frac{1}{T_2} + r_2(p)}{(r_2(p) - r_2(p))r_2(p)} e^{r_2(p)(t-\tau)} (e^{-r_2(p)} - 1) \right]. \end{aligned}$$



$$\psi_{2y} = I_1 \frac{L_\mu}{T_2} \int_0^t \left( \frac{-\omega_2(p)}{r_1(p) - r_2(p)} e^{r_1(p)(t-\tau)} + \frac{-\omega_2(p)}{r_2(p) - r_1(p)} e^{r_2(p)(t-\tau)} \right) d\tau =$$

$$= I_1 \frac{L_\mu}{T_2} \left[ \frac{\omega_2(p)}{(r_1(p) - r_2(p))r_1(p)} e^{r_1(p)t} (e^{-r_1(p)t} - 1) + \frac{\omega_2(p)}{(r_2(p) - r_1(p))r_2(p)} e^{r_2(p)t} (e^{-r_2(p)t} - 1) \right].$$

Оператор векторного поворота:

$$e^{A(p,t)} = \begin{bmatrix} \frac{-\frac{1}{T_2} - r_1(p)}{r_1(p) - r_2(p)} e^{r_1(p)t} + \frac{-\frac{1}{T_2} - r_2(p)}{r_2(p) - r_1(p)} e^{r_2(p)t} & \frac{\omega_2(p)}{r_1(p) - r_2(p)} e^{r_1(p)t} + \frac{\omega_2(p)}{r_2(p) - r_1(p)} e^{r_2(p)t} \\ \frac{\omega_2(p)}{r_1(p) - r_2(p)} e^{r_1(p)t} + \frac{\omega_2(p)}{r_2(p) - r_1(p)} e^{r_2(p)t} & \frac{-\frac{1}{T_2} - r_1(p)}{r_1(p) - r_2(p)} e^{r_1(p)t} + \frac{-\frac{1}{T_2} - r_2(p)}{r_2(p) - r_1(p)} e^{r_2(p)t} \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

При подстановке расчетных величин АД из табл. 3.5, получим следующие результаты:

$$e^{At} = \begin{pmatrix} 0,282 & -0,042 \\ 0,042 & 0,282 \end{pmatrix}; \Psi_2(0) = \begin{pmatrix} 0,573 \\ 0,027 \end{pmatrix} \text{Вб}; \Psi_2\left(\frac{k\pi}{3}\right) = \begin{pmatrix} -0,103 \\ -0,478 \end{pmatrix} \text{Вб}, k=1,2,3,5\dots$$

Таким образом, установившиеся значения потокосцеплений:

$$\psi_{2x} = -0,103 \text{ Вб}, \psi_{2y} = -0,478 \text{ Вб} \text{ при условии } I_{1\max(2)} = \sqrt{3}I_{1(3)} = 407 \text{ А, где}$$

$I_{1\max(2)}$  - амплитудное значение тока в двухфазной системе,  $I_{1(3)} = 235 \text{ А}$  - действующее значение тока в трехфазной системе. Перечень необходимых для синтеза РС параметров узлов частотно-токовой системы приведен в табл. 5.1

**Таблица 5.1**

№п/п	Величина	Формула	Значение
1	$K_{\text{фп1}}$	$K_{\text{фп1}} = \omega_{20} / U_3 U_{\text{max}}$	0,1056
2	$K_{\text{п}}$	$K_{\text{п}} = \frac{3}{2} \frac{L_\mu}{L_2} Z_p$	5,22
3	$K_{\text{осс}}$	$K_{\text{осс}} = U_{\text{ос max}} / \omega_{\text{ном}}$	0,0955

Подставив рассчитанные значения коэффициентов в (5.25) и считая в рассматриваемом диапазоне частот ( $0 - 10^3 \text{ с}^{-1}$ ) произведение  $W_\delta \cdot W_{\dot{\omega}, \dot{\varphi}_i} = 1$ , (рис. 5.15), получим:

$$W_{\text{раз кс}}(p) = \frac{\Delta\omega(p)}{\Delta\omega_1^*(p)} = W_{\text{раз.с}} \cdot K_{\text{осс}} = \frac{2,94p^2 + 32,4p + 51}{p(0,69p^2 + 1,66p + 0,25)}$$

ЛЧХ разомкнутого контура скорости приведены на рис. ПД.7 (прил. Д). На частоте среза  $\omega_c = 1,72 \text{ с}^{-1}$   $\Delta\varphi = 26,6^\circ$ , что свидетельствует о недостаточном запасе устойчивости по фазе. Выберем желаемую частоту среза  $\omega_{\text{сжел}} \approx 12,5 \text{ с}^{-1}$ , соответствующую  $\varphi \approx -128^\circ$ , при этом  $\Delta\varphi = 62^\circ$ . ЛАЧХ разомкнутого контура [Введите текст]

скорости имеет двойной наклон в области частот  $\omega_{к1} \dots \omega_{к2}$ . Для получения желаемой ЛАЧХ с наклоном  $-20$  дБ/дек в указанном диапазоне частот целесообразно провести коррекцию системы введением корректирующего звена (регулятора) с опережением по фазе с передаточной функцией [89,97]:

$$W_{рег} = \frac{1 + T_{к2}p}{1 + T_{к1}p}, \quad (5.35)$$

Определяя  $T_{к1} = \frac{1}{\omega_{к1}} = 0.08$  с,  $T_{к2} = \frac{1}{\omega_{к2}} = 10$  с, получим передаточную функцию регулятора скорости:

$$W_{рег} = \frac{1 + 10p}{1 + 0.08p}.$$

Замкнув систему единичной обратной связью, получим передаточную функцию замкнутой по скорости системы электропривода:

$$W_{зам.} = \frac{W_{ppe} \cdot W_{ппраз.к}}{1 + W_{ppe} \cdot W_{ппраз.к}}. \quad (5.36)$$

### 5.5. Моделирование системы электропривода экструдера с частотно-токовым управлением

Система частотно-токового управления АД, смоделированная в *Matlab Simulink*, приведена на рис. 5.15 [86].

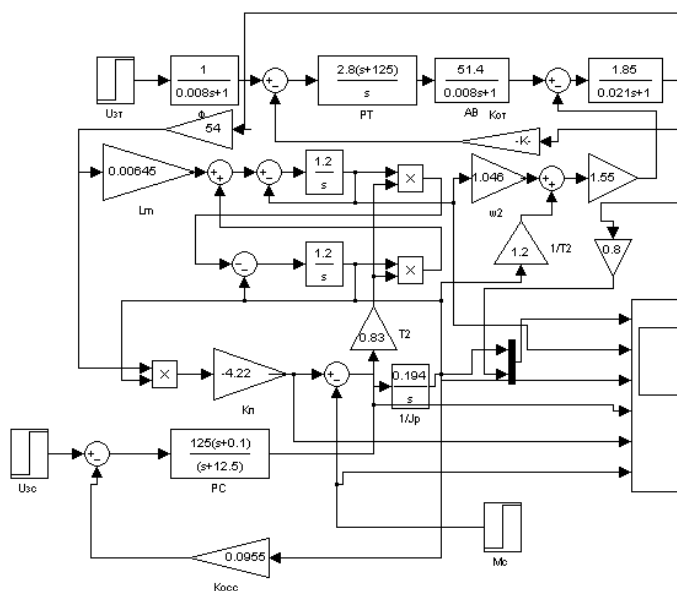


Рис. 5.15. Модель системы частотно-токового управления в *Matlab Simulink*

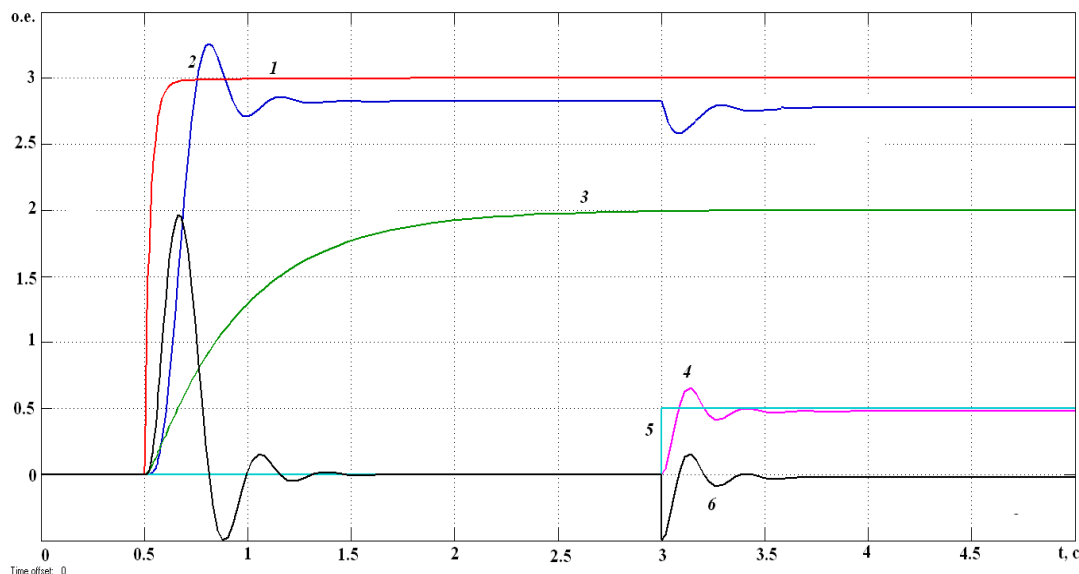
Переходные процессы в системе при отработке скачка заданий по заданию скорости, тока и момента нагрузки, полученные в результате моделирования, приведены на рис. 5.19.

[Введите текст]

Видно, что переходные процессы нарастания скорости и момента АД при пуске и броске нагрузки носят колебательный характер, что обусловлено наличием комплексно-сопряженных корней в характеристическом уравнении объекта управления в контуре скорости. Колебания момента АД не превышают заданных в требовании 25%, точность поддержания момента составляет 0,5%, точность поддержания скорости 0,1 %. Бросок нагрузки в виде номинального статического момента не оказывает значительного влияния на скорость АД в статике, что указывает на абсолютно жесткую механическую характеристику привода в статике.

Ниже приведена модель комплекса «Электропривод-экструдер-продукт», на основе разработанной системы привода, в Matlab Simulink (рис. 5.17). Результаты моделирования представлены на рис. 5.18.

Анализ результатов моделирования показывает, что синтезированная замкнутая система электропривода обеспечивает при переходном процессе допустимое перерегулирование  $\sigma < 10\%$ , давление при пуске скачкообразно нарастает до величины, пропорциональной сумме динамическому моменту и момента на валу АД, что обусловлено практически пропорциональной связью выходного давления с приводным моментом на валу червяка. После спада динамического момента давление растет по экспоненте, ввиду инерционной связи скорости вращения червяка с выходным давлением. В установившемся режиме, вариация технологических параметров, вызывающих колебания статического момента, не влияет на отклонения выходного давления.



**Рис. 5.16.** Переходные процессы в системе частотно-токового управления АД:

1 – ток статора, 2 – скорость ротора, 3 – ортогональная составляющая потокоцепления статора, 4 – электромагнитный момент, 5 – статический момент, 6 – динамический момент.

Передаточная функция частотно-токовой системы, замкнутой по скорости определяется выражением (5.35). Передаточная функция контура давления, определяемая выражением (4.60), при подстановке числовых значений примет вид:

$$W_{\text{оу.д}}(p) = \frac{1,47 \cdot 10^{-4} p^5 + 0,024 p^3 + 0,26 p^2 + 0,06 p + 1,8 \cdot 10^{-3}}{0,051 p^6 + 28,13 p^5 + 320,7 p^4 + 669,1 p^3 + 320,2 p^2 + 27,94 p + 0,23}$$

ЛЧХ объекта управления контура давления приведены на рис. ПД. 8. (прил. Д) Определим желаемую частоту среза исходя из желаемого быстродействия при перерегулировании  $\sigma < 20\%$  согласно методике, приведенной в [23]:

$$\omega_{\text{с.жже}} = \frac{2,5\pi}{t_p} = \frac{2,5\pi}{7} = 1,12 \text{ с}^{-1}.$$

На данной частоте ФЧХ исходной системы имеет достаточный запас устойчивости по фазе, равный  $\Delta\varphi = 100^\circ$ . Требуемое значение коэффициента усиления регулятора  $K_{\text{рег}}$  определим из выражения для статической ошибки (5.5). Коэффициент усиления разомкнутой системы без регулятора определим из передаточной функции объекта управления, положив  $p=0$ , при этом  $K_{\text{раз}} = 0,0078$ . Тогда:

$$K_{\text{рег}} \leq \frac{1 - \Delta}{\Delta \cdot K_{\text{раз}}} = \frac{1 - 0,02}{0,02 \cdot 7,8 \cdot 10^{-3}} = 6282 \text{ или } K_{\text{рег}} = 76 \text{ дБ.}$$

Далее, согласно (4.38), определяем ЛАЧХ регулятора давления, которому соответствует передаточная функция звена с отставанием по фазе:

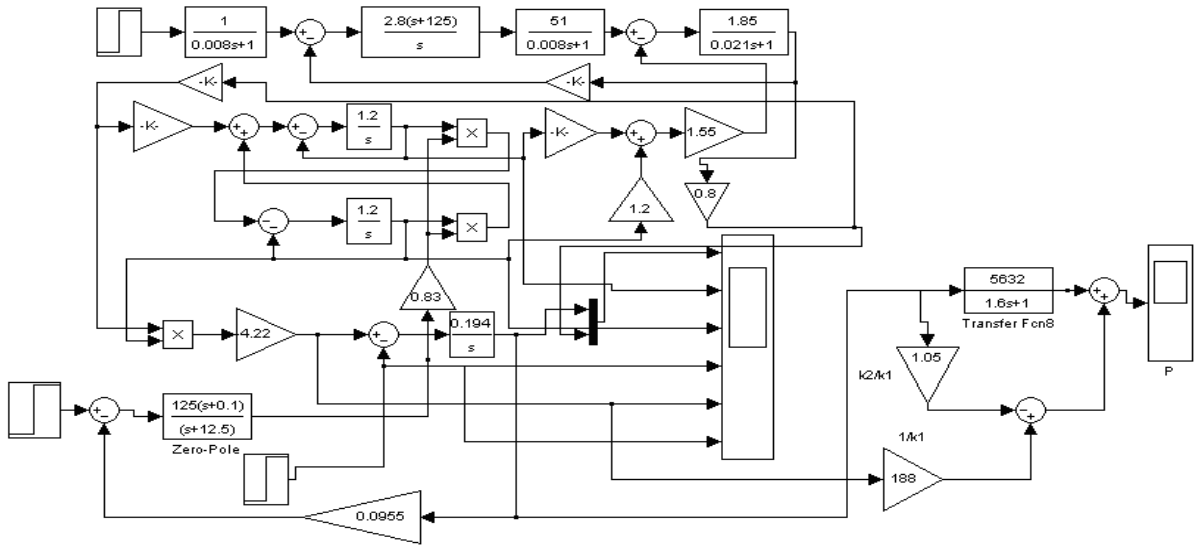
$$W_{\text{рег.д}}(p) = K \frac{1 + T_2 p}{1 + T_1 p},$$

где  $T_1$  и  $T_2$  – постоянные времени звена, при этом  $T_2 = 3,16 \text{ с}$ ,  $T_1 = 10 \text{ с}$  (рис. ПД.8). Подставив численные значения, получим:

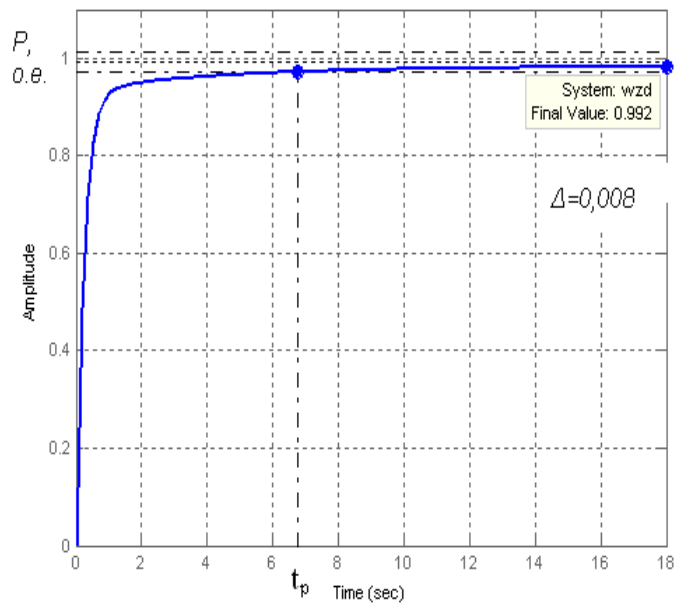
$$W_{\text{рег.д}}(p) = 6282 \frac{1 + 3,16 p}{1 + 10 p}$$

Замыкая систему отрицательной единичной обратной связью, получим передаточную функцию замкнутого контура давления с передаточной функцией вида (4.61). Переходный процесс нарастания давления при скачке задающего воздействия, полученный путем моделирования синтезированной замкнутой системы управления ЛТИ-объекта в программе Matlab, изображен на рис.5.18.

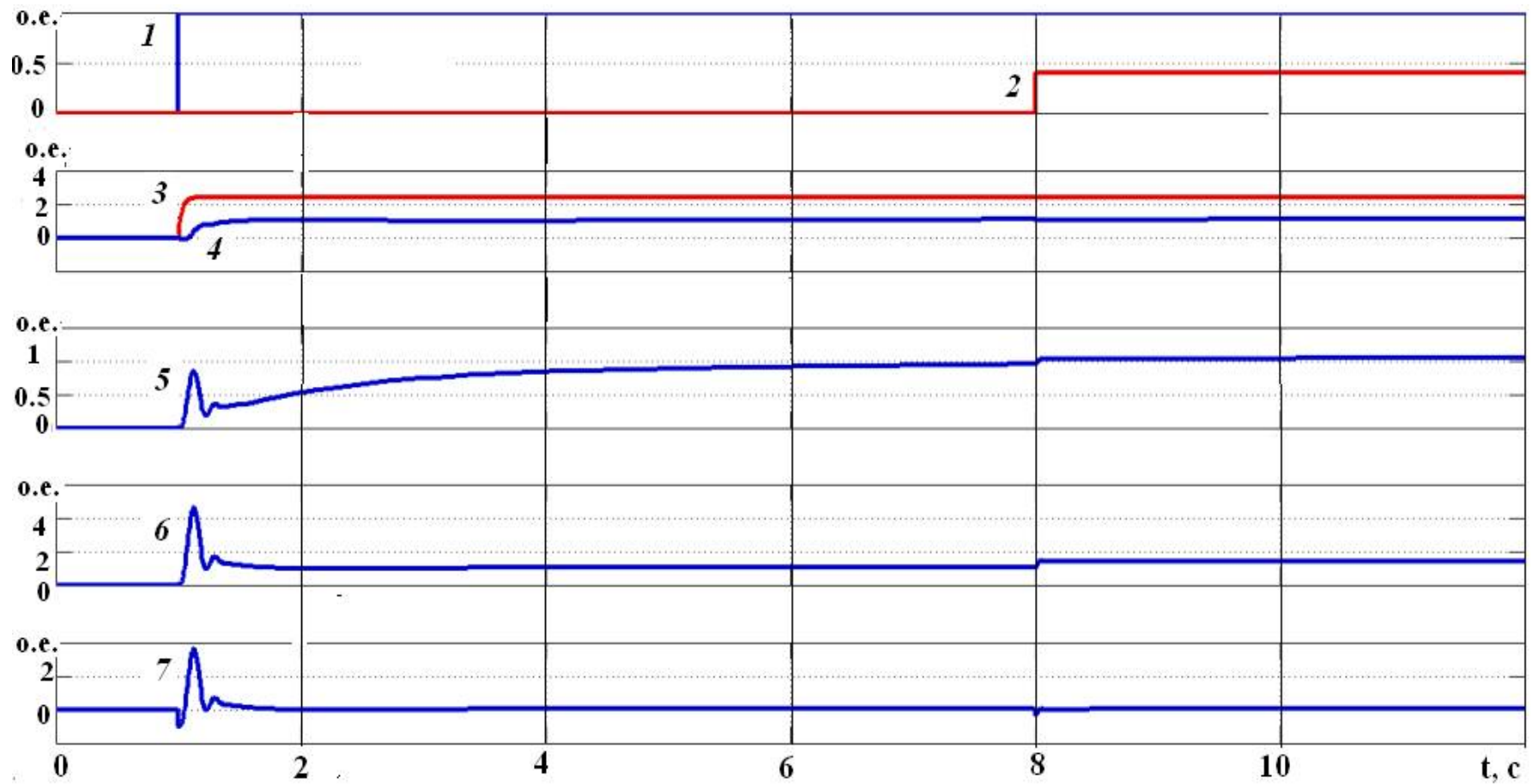
Как видно из рис. 5.19, система удовлетворяет приведенным выше требованиям: время регулирования давления  $t_p \approx 6,7 \text{ с}$ , статическая ошибка  $\Delta = 0,8\%$ ; перерегулирование  $\sigma = 0\%$ . Таким, образом, внешнего контура стабилизации давления способствует повышению быстродействия системы управления экструдером при отсутствии перерегулирования. Представленные результаты моделирования подтверждают целесообразность применения дополнительного контура регулирования давления в составе электропривода экструдера на основе частотно-токового принципа управления приводного АД.



**Рис. 5.17.** Аналоговая модель комплекса «Электродвигатель-экструдер-продукт» на основе частотно-токового электропривода в программе Matlab



**Рис. 5.18** Переходный процесс в замкнутом контуре давления



**Рис. 5.19.** Переходные процессы в системе при пуске под нагрузкой: 1 – номинальный статический момент, 2 –дополнительный статический момент, имитирующий отклонение момента нагрузки ( $0,5 M_{c,ном}$ ), 3 – ток статора, 4 – частота вращения червяка, 5 - выходное давление смеси, 6- момент привода, 7 – динамический момент.

## Заключение

1. На основе гидродинамической теории разработана математическая модель процесса шприцевания. Анализ представленной модели и экспериментальных исследований позволил сформулировать требования к работе экструдера и определить возможности повышения качества деталей шин путем поддержания постоянства давления и производительности машины путем управления скоростью и моментом вращения червяка экструдера.

2. Для отыскания оптимального режима экструзии сформулирована и решена многокритериальная задача параметрической оптимизации процесса шприцевания

3. Разработана структурная схема технологического комплекса «электропривод-экструдер-продукт», с учетом специфики технологии шприцевания.

4. Обоснован выбор электроприводов, в зависимости от эксплуатационных характеристик экструдера и графиков механических нагрузок рабочего органа шприцмашины.

5. Разработаны системы управления электроприводов на основе АИН и АИТ, произведен синтез регуляторов в системе **max** подчиненного регулирования координат трехконтурной САУ экструдера методом логарифмических частотных характеристик. Предложена новая схема частотно-токового электропривода с оригинальным решением силовых цепей на основе преобразователя частоты на запираемых вентилях и транзистроно-конденсаторного демпфирующего устройства. Показано, что разработанная схема позволяет упростить систему частотно-токового управления введением демпфирующего устройства на основе одного полярного конденсатора, а также удовлетворить требованиям электромагнитной совместимости приданием сетевому току квазисинусоидальной формы.

6. По итогам проведенных исследований произведены расчёт, изготовление и настройка регулятора давления в составе обновлённого частотно-регулируемого электропривода червячной машины МЧТ-250 поточной линии ИРУ-16Б. Данный электропривод прошёл опытно-промышленные испытания и принят к эксплуатации, что подтверждается актом о внедрении. Результаты исследований протекторных заготовок после проведенной модернизации электропривода шприцмашины МЧТ-250 подтвердили, что внедрение предложенных разработок позволило стабилизировать производительность экструзии, устранить флуктуации частоты вращения червяка, добиться регламентированных размеров профилированных заготовок, а также исключить появление дефектов продукции, наблюдавшихся до модернизации.

## Список литературы

1. Автоматизированное проектирование и расчет шнековых машин: Монография / М.В. Соколов [и др.] – М.: Машиностроение-1, 2004. – 248 с.
2. Автоматизированный электропривод под общ. ред. Ильинского Н.Ф. - М.: Энергоатомиздат, 1990. – 544 с., ил.
3. Автоматизированный электропривод промышленных установок: учебное пособие для вузов / Г.Б. Онищенко [и др.]; под ред. Г.Б. Онищенко. – М.: РАСХН – 2001. – 520 с.: ил.
4. Автоматизированный электропривод, силовые полупроводниковые приборы, преобразовательная техника. Актуальные проблемы и задачи/ под ред. Н.Ф.Ильинского, И.А. Тепмана, М.Г. Юнькова – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 472 с, ил.
5. Алгоритм Левенберга — Марквардта/ материал из Википедии – свободной энциклопедии [Электронный ресурс]. – режим доступа: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм\\_Левенберга\\_—\\_Марквардта](http://ru.wikipedia.org/wiki/Алгоритм_Левенберга_—_Марквардта).
6. Альбом технологических схем основных производств резиновой промышленности / А.А. Мухутдинов [и др.] . – М. : Химия, 1980.—76 с.
7. Андрашников, Б.И. Интенсификация процессов приготовления и переработки резиновых смесей / Б.И. Андрашников. – М. : Химия, 1986.— 224 с.
8. Андронов, А. А. Теория колебаний/ А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. – М., 1957. – 915 с.
9. Анисимов, В.С. Автоматизированный электропривод в народном хозяйств: в 4 т. Т.4 Автоматизированный электропривод агрегатов для шинной промышленности/ В.С. Анисимов, Ю.В. Смирнов. – М.: Энергия, 1974. – 210 с.
10. А.С. 1692855 СССР, М.Кл. В 29 С 47/00, Н 01 В 13/14 Головка экструдера / Попов Э.Б., Лебедев В.Н., Родионов Е.Ю., № 4637207/07, заяв. 12.01.89., опуб. 23.11.91, бюл. № 43.
11. Асинхронный электропривод с частотным управлением экструдера линии КАМА-8 завода грузовых шин ОАО «Нижекамскшина»: технический проект 70.059.00.00.000 / разработ.ООО «Контакт-М». - Ульяновск, 2006. – 305 с.
12. Басов, Н.И. Расчет и конструирование формующего инструмента для изготовления изделий из полимерных материалов : учеб. для вузов / Н.И. Басов, В.А. Брагинский, Ю.В. Казанков. – М. : Химия, 1991. – 352 с.
13. Башарин, А.В. Примеры расчетов автоматизированного электропривода/ А.В. Башарин. – Л.: Энергия, 1972. – 440 с.
14. Башарин, Л.В., Управление электроприводами: учебное пособие для вузов/ Л.В Башарин, В.Л. Новиков, Г.Г.Соколовский. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 392 с , ил.
15. Бекин, Н.Г. Оборудование для изготовления пневматических шин / Н.Г. Бекин, Б.М. Петров. – Л. : Химия, 1982. – 264 с.



16. Белов, М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: учебник для вузов / М.П. Белов, В.А. Новиков, Л.Н. Рассудов.– М.: Академия, 2004. – 576 с.
17. Бернхардт Э. Переработка термопластических материалов: пер. с англ. Р.В. Торнера и др. под ред. Г.В. Виноградова/ Э. Бернхардт. – М.: Госхимиздат, 1962 г. – 748 с., ил.
18. Бессекерский, В. Л. Теория систем автоматического управления/ В.Л. Бессекерский, Е. П. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Профессия, 2003. – 752 с, ил.
19. Бондарь, А.Г. Математическое моделирование в химической технологии / А.Г. Бондарь. – Киев : 1973.—280 с.
20. Булгаков, А.А. Частотное управление асинхронными двигателями/ А. А. Булгаков. – М.: Энергоиздат, 1982. – 216 с.
21. Васильев Д.В., Системы автоматического управления. Примеры расчета: учебное пособие для втузов/ Д.В. Васильев, В.Г. Чуич. – М.: Высшая школа, 1967. – 418 с, ил.
22. Воронов, А.А. Основы теории автоматического регулирования и управления: учебное пособие для вузов/ А. А. Воронов, В.К. Титов, Н.И. Новогранов. – М.: Высшая школа, 1977. – 519 с., ил.
23. Востриков, А. С. Теория автоматического регулирования: учеб. пособие/ А. С. Востриков, Г. А. Французова. – Новосибирск: НГТУ, 2003. – 364 с.
24. Вострокнутов, Е.Г. Реологические основы переработки эластомеров / Е.Г. Вострокнутов, Г.В. Виноградов. – М. : Химия, 1988.—232с.
25. Вострокнутов, Е.Г. Переработка каучуков и резиновых смесей. Реологические основы, технология, оборудование/ Е.Г. Вострокнутов, М.И. Новиков, В.И. Новиков. – М.: Химия, 1980. – 280 с., ил.
26. Выявление и устранение проблем в экструзии / К Раувендааль [и др.] ; пер. с англ. Под ред. В.П. Володина. – СПб. : Профессия, 2008.—328 с.
27. ВЭМЗ-Спектр / Каталог продукции [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.spectr.ru> – Загл. с экрана
28. Ганиев, Р. Н., Афлятунов И.Ф. Частотно-токовый электропривод экструдера на основе запираемых клапанов // Сб. трудов XVII междунар. науч. практ. конф. «Современная техника и технологии» в 3 т, Т1 / НИТПУ. Томск, 2011. С.427 – 428
29. Ганиев, Р. Н., Гаврилов Е. Н. Особенности выбора электродвигателей при модернизации приводных систем резинотехнической промышленности// Сб. трудов XVI междунар. науч. практ. конф. «Современная техника и технологии» в 3 т, Т1 / НИТПУ. Томск, 2010. С.400 – 401.
30. Ганиев, Р.Н., Горбачевский Н.И., Платов В.Н., Сидоров С.Н. Модернизация электроприводов экструдеров в резинотехнической промышленности // Приводная техника. – 2010. – №6. – С. 8 – 15.
31. Ганиев, Р. Н., Горбачевский Н. И., Платов В. Н. Проблемы модернизации электроприводов технологических установок экструзионного

- типа//Известия Тульского госуд. ун-та. «Технические науки»/ ТулГУ. Тула, 2010. С.16 – 22
32. Ганиев, Р. Н. Частотно-токовый электропривод экструдера/ Р. Н. Ганиев// Материалы IX Всероссийской науч. техн. конф. «Динамика нелинейных дискретных электротехнических и электронных систем – ДНДС-2011». – Чебоксары: ЧГУ им. И. Н. Ульянова, 2011. – С.167 – 169.
  33. Гаврилов, Е. Н., Пути оптимизации процесса резиносмешения с помощью регулируемого электропривода/ Е. Н. Гаврилов, Р. Н. Ганиев, А. К. Сорокин// Сб. материалов Всеросс.науч.-практ.конф. Инновации и высокие технологии XXI века. – Нижнекамск: НХТИ КГТУ, 2009. – С.81-85
  34. Горбачевский, Н. И. Модернизация электроприводов экструдеров в резинотехнической промышленности / Н. И. Горбачевский, Р. Н. Ганиев, В. Н. Платов// Приводная техника. – 2010. – №6. – С.8 – 15.
  35. Герман, Х. Шнековые машины в технологии: пер. с нем. Веденяпиной Л.Г. под ред. М. Фридмана / Х. Герман. – Л.: Химия, 1975. – 228 с , ил.
  36. Гриф А. Тех Технология экструзии пластмасс/ А. Гриф. – М.: Мир, 1965. – 308
  37. Губер, Ф.Е., Проблемы оптимизации процесса шприцевания в промышленности РТИ/ Ф.Е. Губер, Б.Ф. Тамаркин, А.Г. Говша.–М.: ЦИНТИхимнефтемаш, 1981. – 76 с.
  38. Дорф Р. Современные системы управления: пер. с англ Б. И. Копылова/ Р. Дорф, Л. Бишоп. –М.: Лаборатория Базовых знаний, 2002. – 832 с.: ил.
  39. Дмитриев, В. Н. Диссертация доктора наук
  40. Дьяконов, В. П. Mathcad 11,12,13 в математике: справочник/ В. П. Дьяконов. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2007 – 960 с.
  41. Дьяконов, В. П. MATLAB 7.\*/R2006/R2007: Самоучитель/ В. П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 768 с.: ил.
  42. Евсюков, В. Н. Нелинейные системы автоматического управления: учебное пособие для студентов вузов / В.Н. Евсюков. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2007. – 172 с.
  43. Завгородний, В.К. Механизация и автоматизация переработки пластических масс/ В.К. Завгородний. – 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1970. – 596 с.: ил.
  - 44.Зимин, Е.Н.. Автоматическое управление электроприводами: учеб. пособие для студентов вузов/ Е.Н. Зимин, В.И Яковлев. – М.: Высшая школа, 1979. – 317 с , ил.
  - 45.Иванов, Г.М. Автоматизированный электропривод в химической промышленности/ Г. М. Иванов, Г.Б. Онищенко.– М.: Машиностроение, 1975. – 312 с.
  46. Ильинский, Н.Ф., Общий курс электропривода учеб. для вузов/ Н.Ф. Ильинский, В.Ф. Козаченко. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 544 с, ил.
  47. Ким, В.С. Теория и практика экструзии полимеров : учеб. и учеб. пособия для вузов / В.С. Ким. – М. : Химия, Колос, 2005.—568 с.

48. Киреев, В.И. Численные методы в примерах и задачах: учеб. пособие/В.И. Киреев, А.В. Пантелеев. — 3-е изд. стер. — М.: Высш. шк., 2008. — 480 с: ил.
49. Кириллов, Р.С. Моделирование векторной системы управления с ориентацией по потокосцеплению ротора : учебное пособие по курсовому проектированию / Р.С. Кириллов. — Екатеринбург : 2010. — 30 с.
50. Кривицкий, С.О. Динамика частотно-регулируемых электроприводов с автономными инверторами/ С.О. Кривицкий, И.И. Эпштейн. — М.: Энергия, 1970. — 150 с.
51. Ключев, В.Н. Теория электропривода/ В. Н. Ключев. — М.: Энергоиздат, 2001 г. — 697 с.
52. Ковчин, С. А. Теория электропривода: учебник для вузов / С.А Ковчин, Ю.А. Сабинин. — СПб.: Энергоатомиздат, 1994. — 496с.: ил.
53. Корнев, А.Е. Технология эластомерных материалов : учеб. для вузов / А.Е. Корнев, А.М. Буканов, О.Н. Швердяев. — М. : Издат. «Эксим», 2000.— 288с.
54. Куропаткин, П.В. Теория автоматического управления: учебное пособие для вузов/ П.В. Куропаткин. — М.: Высшая школа, 1973. — 528 с, ил.
55. Мак-Келви Д.М. Переработка полимеров/ Д. М. Мак-Келви. — М.: Химия, 1965. — 464 с, ил.
56. Кутузов, А.Г. Основы прикладной реологии и ее применение для решения технологических задач/ А. Г. Кутузов. — Казань: Школа, 2006. — 168 с.
57. Матлаб в инженерных и научных расчетах : монография / А.Ф. Дашенко [и др.]. — Одесса: Астропринт, 2003. — 214 с.
58. Мартыненко, В.Е. Современное состояние и основные тенденции развития экструзионного оборудования/ В.Е. Мартыненко. —М.: ЦИНТИХимнефтемаш, 1977. — 84 с , ил.
59. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник: в 3 т.Т.3 / под. ред. Н.Д. Егупова. — М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. — 758 с.
60. Моделирование и расчет химического оборудования : межвуз. сб. науч. тр. / Яросл. политехн. ин-т. — Ярославль : 1987.—137с.
61. Мощинский, Ю.А. Определение параметров схемы замещения асинхронных машин по каталожным данным/ Ю.А. Мощинский, В. Я. Беспалов, А. А. Кирякин// Электричество. — 1998. — №4. — С. 38 - 42.
62. Оборудование для переработки пластмасс: справочное пособие по расчету и конструированию/ под ред. В.К. Завгороднего. — М.: Машиностроение, 1976. — 406 с.
63. Оборудование и основы проектирования заводов резиновой промышленности : Учеб. пособие для вузов / Бекин Н.Г. [и др.] ; под общ. ред. Н.Д. Захарова. — Л. : Химия, 1985. — 504 с
64. Осипов, О.И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод/ О.И. Осипов. — М.: МЭИ, 2004 г. — 80 с.

65. Осипов, О.И. Частотно-регулируемый асинхронный электропривод : учебное пособие к курсам “Электропривод на основе преобразователей частоты Simovert Master Drives”, “Электропривод на основе преобразователей частоты серий Micromaster”/ О. И. Осипов. – М.: МЭИ, 2004. – 122 с.
66. Основы теории цепей: учебник для вузов/ Г. В. Зевеке [и др.]. – 4-е изд. перераб. – М.: Энергия, 1975. – 752 с.: ил.
67. Основы технологии шинного производства/ Г. Я. Власов [и др.] Воронеж.: Государственная технологическая академия – 2002. – 459 с.
68. Орлов, С. П. Повышение эффективности электрооборудования и системы управления экструзионной линии: дис. канд. техн. наук/ С. П. Орлов. – Краснодар, 2005. – 193 с.
69. Пантелеев, А. В. Методы оптимизации в примерах и задачах: учеб. пособие/ А. В. Пантелеев, Т. А. Летова. – 2-е изд., исправл. – М. Высш. шк., 2005. – 544 с.: ил.
70. Пат. 2142361 Россия, М.Кл В29С 47/12 Головка экструдера с регулируемым профилем формирующего канала / А.П. Остриков, О.В. Абрамов, Р.В. Ненахов; заяв. 08.10.1998, опуб. 10.12.1999 г.
71. Пат. 2161556 Россия, М.Кл. В29С 47/12, В29С 47/16, В29С 47/22 Экструдер для производства профильных изделий с регулируемым сечением формирующего канала / А.Н. Остриков, О.В. Абрамов, Р.В. Ненахов., А.С Рудометкин; заяв. 09.07.1999 г., опуб.10.01.2001 г.
72. Потемкин, В. Г. Введение в Matlab [Электронный ресурс]/ В. Г. Потемкин.–Режим доступа: <http://exponenta.ru/soft/matlab/potemkin/book/>
73. Подлесный, Н.И. Элементы систем автоматического управления и контроля / Н.И. Подлесный, В.Г. Рубанов. – 2-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа, 1982. – 237 с, ил.
74. Проблемы оптимизации процесса шприцевания в промышленности РТИ. Тематический обзор. – М.: ЦНИИТЭНефтехим, 1981. – 87 с.
75. Проведение предремонтных инструментальных испытаний и регламентный контроль электроприводов поточной линии по производству протекторов ИРУ-16Б: отчет о НИР/ Нижнекамский химико-технол. ин-т. – Нижнекамск, 2009. – 142 с.
76. Проектирование экструзионных машин с учетом качества резинотехнических изделий: монография/ М.В.Соколов [и др.]. – М.: Машиностроение. – 2007. – 292 с.
77. Преобразователи частоты FR-A 700: руководство по эксплуатации. – Mitsubishi Electric. – 2005. – 830 с.: ил;
78. Рагулин, В.В. Технология шинного производства / В.В. Рагулин, А.А. Вольнов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Химия, 1981. – 264 с.
79. Раувендааль, К. Экструзия полимеров: пер. с англ.А. Я. Малкина/ К. Раувендааль. – СПб.: Профессия, 2008 – 762 с.: ил.

80. Рудаков, В.В. Асинхронные электроприводы с векторным управлением/ В. В. Рудаков, И.М. Столяров, В.А. Дартау Л.: Энергоатомиздат, 1987. – 136 с.
81. Руденко, В. С. Основы преобразовательной техники. В. С. Руденко, В. И. Сенько, И. М. Чиженко: учебник для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1980. – 424 с.: ил.
82. Сандлер, А.С. Автоматическое частотное управление асинхронными двигателями/ А.С. Сандлер, Р.С. Сарбатов. – М.: Энергия, 1974. – 328 с., ил.
83. Сандлер, А.С. Тиристорные инверторы с широтно-импульсной модуляцией/ А.С Сандлер, Ю.М Гусяцкий. – М.: Энергия, 1968. – 96 с.
84. С.Г. Герман-Галкин. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0: Учебное пособие / Герман-Галкин С.Г. – СПб.: Корона, 2001. – 320 с., ил.
85. Системы управления тиристорными преобразователями частоты / В.А. Бизиков [и др.]. – М.: Энергоиздат, 1981. – 144 с., ил.
86. Сидоров, С. Н. Система частотно-токового управления электроприводом на базе запираемых клапанов/ С. Н. Сидоров, Р. Н. Ганиев// Приводная техника. – 2011. – №1. – С.14 – 19.
87. Справочник по автоматизированному электроприводу. Под ред. Елисеева В.А. и Шинянского А.В. – М.: Энергоатомиздат. 1983. - 616 с.
88. Соколовский, Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Соколовский Г.Г. – М.: Академия, 2006. – 265с.
89. Суворов, Г.В. Частотный анализ замкнутых систем электропривода с применением ЭВМ/ Г.В. Суворов, А.Н. Серебряков, В.Г. Мауэр Челябинск, 1981. – 107 с.
90. Терехов, В.М. Системы управления электроприводов: учебник для вузов/ В. М. Терехов, О. И. Осипов. – М.: Академия. 2005. – 302 с.
91. Техническая кибернетика. Теория автоматического регулирования. Математическое описание, анализ устойчивости и качества систем автоматического регулирования/ под ред. Солодовникова. – Машиностроение, 1967. – 768 с, ил..
92. Технология резиновых изделий: учебное пособие для вузов/ Ю. О. Аверко-Антонович [и др.]; под ред. П. А. Кирпичникова. – Л.: Химия, 1991. – 352 с.: ил.
93. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе / А.Я. Бернштейн [и др.]; общ. ред. Р.С. Сарбатова. – М.: Энергия, 1980 г. – 328 с , ил.
94. Торнер, Р.В. Теоретические основы переработки полимеров (механика процессов) / Р.В. Торнер. – М. : Химия, 1977.—464с.
95. Управляемый выпрямитель в системах автоматического управления / А.Д. Поздеев [и др.]; общ. ред. А.Д. Поздеева. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 206 с, ил.

96. Усольцев, А.А. Векторное управление асинхронными двигателями: учебное пособие по дисциплинам электромех. цикла/ А.А. Усольцев. – СПб.: ИТМО 2002. – 126 с , ил.
97. Усынин, Ю.С. Теория автоматического управления: учебник для вузов/ Ю. С. Усынин. – Челябинск: ЮУрГУ, 2009. – 190 с.
98. Филипс, Ч. Системы управления с обратной связью: пер. с англ. Б. И. Копылова/ Ч. Филипс, Р. Харбор. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с. ил.Чернов, Е.А. Электропривод и электрооборудование в автоматизированном производстве/ Е. А. Чернов. – М.: Машиностроение, 1992. – 304 с.
99. Чанг, Дей Хан Реология в процессах переработки полимеров : пер. с англ. под ред. Г.В. Виноградова, М.Л. Фридмана. – М. : Химия 1979.— 368 с.
100. Чаки Ф. Современная теория управления: нелинейные, оптимальные и адаптивные системы: перев. с англ. В.В. Капитоненко, С.А. Анисимова/ А. Чаки. – М.: издат. Мир, 1975 г. – 424 с., ил.
101. Черных, И.В. Simulink : среда создания инженерных приложений / И.В. Черных ; под общ. ред. В.Г. Потемкина. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003. – 496 с.
102. Чиликин, М.Г., Терехов В.М., Основы автоматизированного электропривода: учебное пособие для вузов/ М.Г. Чиликин , М.М. Соколов, А.В. Шинянский. – М.: Энергия, 1974. – 368 с , ил.
103. Чиликин, М.Г. Теория автоматизированного электропривода: учеб. пособ. для вузов/ М.Г. Чиликин, В.И. Ключев, А.С. Сандлер. – М.: Энергия, 1979. – 615 с , ил.
104. Электротехнический справочник в 4 т. Т.4 / под. ред. В.Г. Герасимова. – 8-е изд., испр. и доп. – М.: МЭИ, 2002. – 489 с., ил.
105. Эпштейн, И.И. Автоматизированный электропривод переменного тока/ И. И. Эпштейн. – М.: Энергоиздат, 1982. – 192 с.
106. Шенкель Г. Шнековые прессы для пластмасс: пер с нем. под ред. Шапиро А.Я./Г. Шенкель. – Л.: Госхимиздат, 1962 г., 467 с , ил.
107. Шины. Некоторые проблемы эксплуатации и производства / Р.С. Ильясов [и др.] ; под ред. В.П. Дорожкина. – Казань : 2000. – 576 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А.

### Результаты исследования покрышек на ОАО «Нижекамскшина»

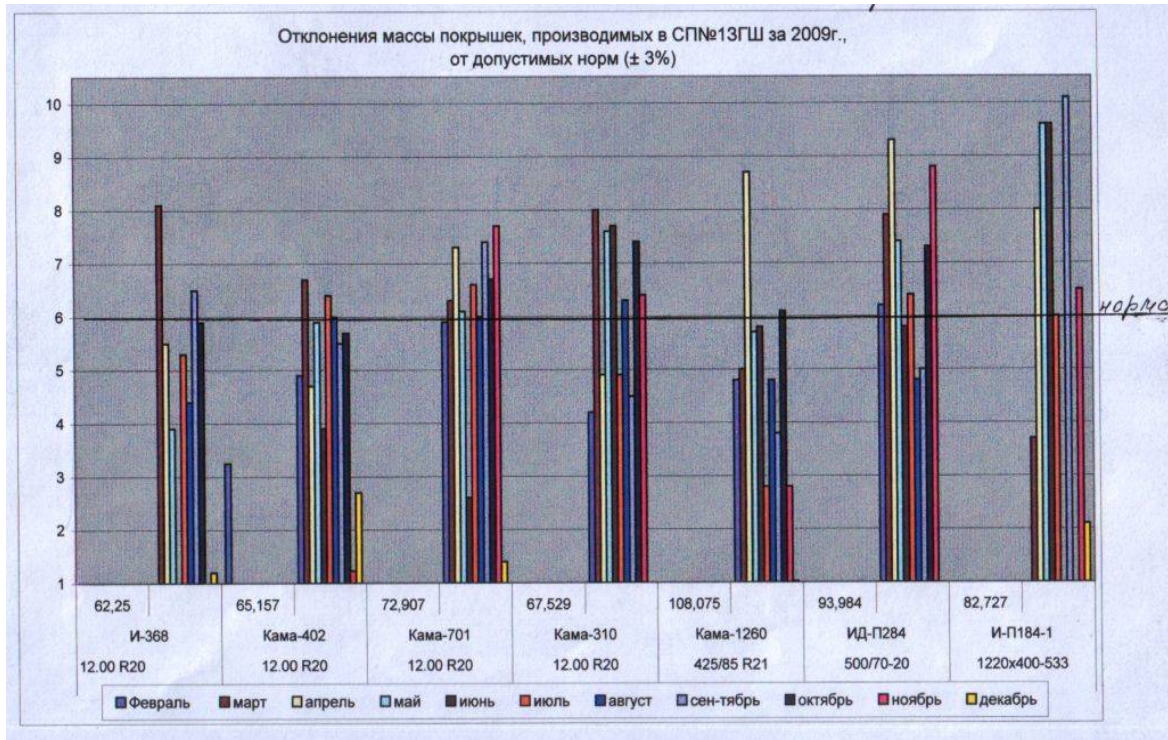
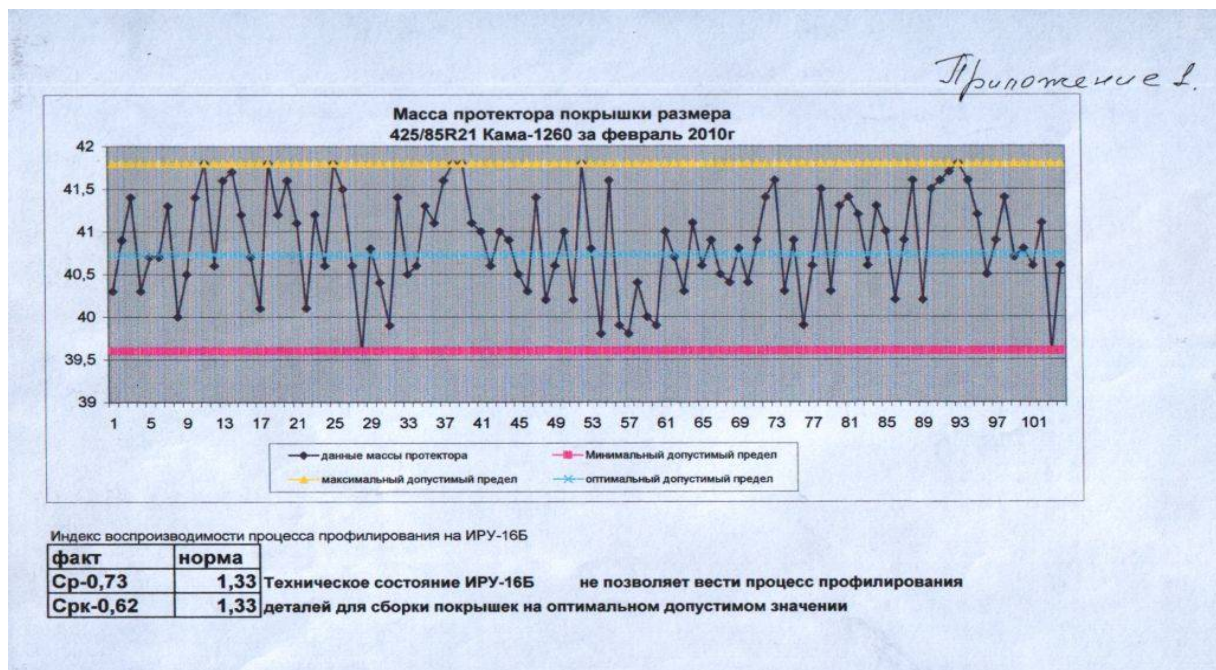


Рис.ПА.1. Экспериментальные исследования покрышек



Максимальное отклонение массы составляет  $\pm 1$  кг, при допустимом отклонении  $\pm 0,4$  кг

Рис.ПА.2. Экспериментальные исследования протекторов

[Введите текст]

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

**Технические данные технологического оборудования  
по производству протекторов**

**Таблица Б.1.**

**Технические данные червячной машины МЧТ-250Л**

Конструктивный параметр	Обозначение в тексте	Единицы измерения	Численное значение
Диаметр червяка	D	м	0,25
Отношение рабочей длины червяка к диаметру	L/D	-	6
Число заходов червяка	I	-	2
Угол подъема винтовой линии	Ф	градус	17,6
Величина зазора между червяком и цилиндром корпуса	Δ	мм	0,8
Длина червяка	L	м	1,05
Глубина канала червяка	H	мм	55
Ширина лопасти червяка	B	м	0,104
Толщина гребня червяка	E	мм	13
Максимальная производительность	Q	кг/ч	3000
Размеры попереченого сечения выходной щели головки	W	мм	870
	h <sub>2</sub>	мм	35
Номинальная частота вращения червяка	N	об/мин	82
Температура резиновой смеси на выходе из головки	T	градус	115
Константа формующей головки	K	м <sup>3</sup>	9.87 10 <sup>-7</sup>



**Таблица Б.2.**

Технические данные электродвигателя экструдера АДЧР315МВ6

Параметр	Значение	Ед. изм.
Мощность	132	кВт
Частота вращения	1000	об/мин
Номинальное напряжение	480	В
Номинальный ток	245	А
cos φ при 100% нагрузке	0,9	
cos φ при 50% нагрузке	0,8	
η при 100% нагрузке	0,95	
η при 50% нагрузке	0,9	
Кратность пускового тока	7,4	
Кратность пускового момента	2,5	
Кратность максимального момента	4,4	
Момент инерции двигателя	5,14	кг·м <sup>2</sup>
Номинальный момент	1274	Н·м
Момент инерции механизма	5,854	кг·м <sup>2</sup>

**Таблица Б.3.**

Расчетные величины двигателя АДЧР415МА6

Параметр	Значение	Ед. изм.
Номинальная частота вращения ротора $\omega_H$	103,7	с <sup>-1</sup>
Пусковой момент $M_H$	4182,5	Н·м
Критическое скольжение $s_{кр}$	0,0687	
Сопротивление	активное статора $R_S$	0,01 Ом
	активное ротора $R_R$	0,01 Ом
	реактивное статора $X_S$	0,06 Ом
	реактивное ротора $X_R$	0,085 Ом
Сопротивление взаимной индукции $X_m$	2,52	Ом
Полная индуктивность	статора $L_S$	0,0082 Гн
	ротора $L_R$	0,0084 Гн
Взаимная индуктивность статора $L_m$	0,00804	Гн
Коэффициент магнитной связи	статора $k_S$	0,98
	ротора $k_R$	0,967
Коэффициент рассеяния машины $\sigma$	0,05244	

**ПРИЛОЖЕНИЕ В.**

[Введите текст]

**Расчет схемы замещения АД**  
**В.1. Расчет параметров Т-образной схемы замещения**  
**по методике частичных нагрузок Мощинского**

Коэффициент загрузки:

$$k_{50\%} = 0,5;$$

Мощность при данном коэффициенте загрузки:

$$P_{50\%} = P_H \cdot k_{50\%} = 132000 \cdot 0,5 = 66000 \text{ Вт};$$

Синхронная частота сети:

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_c = 2 \cdot \pi \cdot 50 = 314,1593 \text{ с}^{-1};$$

Номинальная частота вращения ротора при 50Гц:

$$\omega_H = \frac{(1 - S_H) \cdot \omega_0}{p_{II}} = \frac{(1 - 0,01) \cdot 314,1593}{3} = 103,7 \text{ с}^{-1};$$

Пусковой момент двигателя:

$$M_{II} = M_H \cdot k_{II} = 1273 \cdot 2,5 = 3182,5 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Пусковой ток:

$$I_K = I_H \cdot k_i = 235 \cdot 7,4 = 1739 \text{ А};$$

Ток при загрузке двигателя на 50% от номинала:

$$I_{50\%} = \frac{P_{50\%}}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \eta_{50\%H} \cdot \cos \varphi_{50\%H}} = \frac{66000}{3 \cdot 219,39 \cdot 0,8 \cdot 0,9} = 139,275 \text{ А};$$

Расчетные коэффициенты для расчета тока холостого хода:

$$k_{Ibr} = \frac{k_{50\%} \cdot (1 - S_H)}{1 - S_H \cdot k_{50\%}} = \frac{0,5 \cdot (1 - 0,01)}{1 - 0,01 \cdot 0,5} = 0,4975;$$

$$k_{Inum} = I_{50\%}^2 - (k_{Ibr} I_H)^2 = 139,275^2 - (0,4975 \cdot 235)^2 = 5780;$$

$$k_{Iden} = 1 - (k_{Ibr})^2 = 1 - 0,4975^2 = 0,7525;$$

Ток холостого хода:

$$I_0 = \sqrt{\frac{k_{Inum}}{k_{Iden}}} = \sqrt{\frac{5780}{0,7525}} = 87,64 \text{ А};$$

При определении критического скольжения, предварительно зададимся величиной жесткости механической характеристики электродвигателя. Она изменяется в пределах от 0.6 до 2.5. Нужно принимать  $\beta=1.2$ , при этом наблюдаются наименьшие погрешности расчета.

Конструктивный коэффициент:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_H} = 1 + \frac{87,64}{2 \cdot 7,4 \cdot 235} = 1,025$$

Коэффициенты для расчета критического скольжения:

$$k_{sbr} = 1 - 2 \cdot S_H \cdot \beta \cdot (k_{kp} - 1) = 1 - 2 \cdot 0,01 \cdot 1,2 \cdot (3,3 - 1) = 0,94;$$

$$k_{sdrob} = \frac{k_{kp} + \sqrt{k_{kp}^2 - k_{sbr}}}{k_{sbr}} = \frac{3,3 + \sqrt{3,3^2 - 0,94}}{0,94} = 6,87;$$

Критическое скольжение:

$$s_{kp} = S_H \cdot k_{sdrob} = 0,01 \cdot 6,87 = 0,0687;$$

[Введите текст]

Угол между ЭДС и током  $I_0$  при работе на холостом ходу предварительно принимаем равным  $87^\circ$ . Это значение не является константой, т.к. для двигателей разной мощности оно будет меняться. Так, для двигателя 630 кВт значение  $\cos\varphi_0=88^\circ$ . Для двигателя 3 кВт  $\cos\varphi_0=87^\circ$ .

Угол сдвига фаз при х.х.:

$$\varphi_0 = \frac{87^\circ \cdot \pi}{180^\circ} = 1,5359 \text{ рад};$$

Активная составляющая тока статора:

$$I_{Ha} = I_H \cdot \cos\varphi_H = 235 \cdot 0,9 = 211,5 \text{ A};$$

Активная составляющая тока при х.х.:

$$I_{0a} = I_0 \cdot \cos\varphi_0 = 87,64 \cdot 0,052 = 4,6 \text{ A};$$

Расчет коэффициентов для уточнения жесткости механической характеристики:

$$A_0 = \frac{I_{Ha} - I_{0a}}{U_\phi} = \frac{211,5 - 4,6}{219,39} = 0,94;$$

$$A_1 = \frac{3 \cdot U_\phi^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{kp} \cdot P_H} = \frac{3 \cdot 219,39^2 \cdot (1 - 0,01)}{2 \cdot 1,025 \cdot 3,3 \cdot 132000} = 0,16;$$

$$B = \frac{1}{s_H} + \frac{1}{s_k} - \frac{2 \cdot A_0 \cdot A_1}{s_H} = \frac{1}{0,01} + \frac{1}{0,0687} - \frac{2 \cdot 0,94 \cdot 0,16}{0,01} = 84,5;$$

$$C = \frac{1}{s_H \cdot s_k} - A_0 \cdot A_1 \cdot \left( \frac{1}{s_H^2} + \frac{1}{s_k^2} \right) = \frac{1}{0,01 \cdot 0,0687} - 0,94 \cdot 0,16 \times$$

$$\times \left( \frac{1}{0,01^2} + \frac{1}{0,0687^2} \right) = -74,91$$

$$D = \sqrt{B^2 - 4 \cdot C} = \sqrt{84,5^2 + 4 \cdot 74,91} = 86,26$$

$$x_{\beta 1} = \frac{-B + D}{2} = \frac{-84,5 + 86,26}{2} = 0,8773;$$

$$x_{\beta 2} = \frac{-B - D}{2} = \frac{-84,5 - 86,26}{2} = -85,38;$$

Уточненная жесткость механической характеристики АД:

$$\beta = x_{\beta 1} = 0,8773;$$

По известной величине  $\beta$  можем определить активное сопротивление роторной цепи, а через него и активное сопротивление статорной цепи.

Расчет сопротивлений АД Т-образной схемы замещения:

$$R'_R = \frac{A_1}{\left( \beta + \frac{1}{s_k} \right) \cdot C_1} = \frac{0,16}{\left( 0,8773 + \frac{1}{0,0687} \right) \cdot 1,025} = 0,009974 \text{ Ом};$$

$$R_S = C_1 \cdot \beta \cdot R'_R = 1,026 \cdot 0,88 \cdot 0,01 = 0,010346 \text{ Ом};$$

Используя величины активных сопротивлений, найдём полное индуктивное сопротивление двигателя, а затем индуктивные сопротивления статорной и роторной обмоток. Индуктивное сопротивление ветви намагничивания определим через значения ЭДС.

[Введите текст]

$$X_n = \sqrt{\left(\frac{R'_R}{s_\kappa}\right)^2 - R_S^2} = \sqrt{\left(\frac{0,01}{0,0687}\right)^2 - 0,01^2} = 0,147 \text{ Ом};$$

$$X_S = 0,42 \cdot X_n = 0,42 \cdot 0,147 = 0,061174 \text{ Ом};$$

$$X'_R = 0,58 \cdot X_n = 0,58 \cdot 0,147 = 0,084478 \text{ Ом};$$

Расчет ЭДС в машине:

$$e_{11} = U_\phi \cdot \cos \varphi_H - R_S \cdot I_H = 219,39 \cdot 0,9 - 0,010346 \cdot 235 = 195,1 \text{ В};$$

$$e_{12} = U_\phi \cdot 0,54 - X_S \cdot I_H = 219,39 \cdot 0,54 - 0,061174 \cdot 235 = 104,04 \text{ В};$$

$$E_1 = \sqrt{e_{11}^2 + e_{12}^2} = \sqrt{195,1^2 + 104,04^2} = 221,02 \text{ В};$$

Определение сопротивления взаимоиндукции:

$$X_m = \frac{E_1}{I_0} = \frac{223,02}{87,64} = 2,522645 \text{ Ом};$$

Переходные индуктивности статора и ротора:

$$L_{1s} = \frac{X_S}{\omega_0} = \frac{0,061174}{314,1593} = 0,00019472 \text{ Гн};$$

$$L_{rs} = \frac{X'_R}{\omega_0} = \frac{0,084478}{314,1593} = 0,0002689 \text{ Гн};$$

Взаимная индуктивность статора:

$$L_m = \frac{X_m}{\omega_0} = \frac{2,522645}{314,1593} = 0,00803 \text{ Гн};$$

Индуктивность статора и ротора:

$$L_s = \frac{X_m + X_S}{\omega_0} = \frac{2,522645 + 0,061174}{314,1593} = 0,0082 \text{ Гн};$$

$$L_r = \frac{X_m + X'_R}{\omega_0} = \frac{2,522645 + 0,084478}{314,1593} = 0,0083 \text{ Гн};$$

Коэффициент магнитной связи статора и ротора:

$$k_s = \frac{L_m}{L_s} = \frac{0,00803}{0,0082} = 0,98;$$

$$k_r = \frac{L_m}{L_r} = \frac{0,00803}{0,0083} = 0,967;$$

Коэффициент рассеяния машины:

$$\sigma = 1 - k_s \cdot k_r = 1 - 0,9824 \cdot 0,9753 = 0,05234$$

## В.2 Расчет базисных значений

$U_\phi = \sqrt{2} U_\phi = \sqrt{2} \frac{U_H}{\sqrt{3}}$  – амплитудное значение номинального фазного напряжения обмотки статора, В;

$$U_\phi = \sqrt{2} \frac{380}{\sqrt{3}} = 310,3 \text{ В};$$

$I_\phi = \sqrt{2} I_H$  – амплитудное значение номинального тока обмотки статора, А;

$$I_\phi = \sqrt{2} \cdot 235 = 332,34 \text{ А};$$

[Введите текст]

$\omega_{r.6} = \frac{\omega_0}{p_n}$  – угловая частота вращения ротора, с<sup>-1</sup>;

$$\omega_{r.6} = \frac{314,159}{3} = 104,72 \text{ с}^{-1};$$

$M_6 = K_{кр} \frac{P_H}{\omega_{r.6}}$  – электромагнитный момент, Н·м;

$$M_6 = 3,3 \frac{132000}{104,72} = 4159,664 \text{ Н·м};$$

$$\sin\varphi = \sqrt{1 - \cos\varphi^2} = \sqrt{1 - 0,9^2} = 0,436.$$

Расчет проекции токов:

$$I_{1\alpha 6} = I_{1\alpha} = I_6 \sqrt{\left(\frac{-R_s \sin\varphi - X_s \cos\varphi}{X_m}\right)^2 + \left(\frac{X_s \sin\varphi + R_s \cos\varphi - \frac{U_H}{I_H}}{X_m}\right)^2};$$

$$I_{1\alpha 6} = I_{1\alpha} = 332,34 \sqrt{\left(\frac{-0,01 \cdot 0,436 - 0,06 \cdot 0,9}{2,52}\right)^2 + \left(\frac{0,06 \cdot 0,436 + 0,01 \cdot 0,9 - \frac{380}{235}}{2,52}\right)^2} ==$$

208,759 А;

$$I_{1\beta} = I_6 \sqrt{\left(\cos\varphi - \frac{-R_s \sin\varphi - X_s \cos\varphi}{X_m}\right)^2 + \left(-\sin\varphi - \frac{X_s \sin\varphi + R_s \cos\varphi - \frac{U_H}{I_H}}{X_m}\right)^2};$$

$$I_{1\beta} = 332,34 \sqrt{\left(0,9 - \frac{-0,01 \cdot 0,436 - 0,06 \cdot 0,9}{2,52}\right)^2 + \left(-0,436 - \frac{0,06 \cdot 0,436 + 0,01 \cdot 0,9 - \frac{380}{235}}{2,52}\right)^2} ==$$

489,0279 А;

$I_{1\alpha 6} = I_{1\alpha}$  – ток в канале потокосцепления двигателя, А;

$I_{1\beta 6} = K_{кр} \cdot I_{1\beta}$  – ток в канале скорости двигателя, А;

где  $K_{кр}$  – отношение критического момента к номинальному моменту.

$$I_{1\beta 6} = 3,3 \cdot 489,0279 = 1613,792 \text{ А};$$

$\psi_{26} = \psi_2 = L_m I_{1\alpha}$  – потокосцепление ротора, Вб;

$$\psi_{26} = \psi_2 = 0,00803 \cdot 208,759 = 1,676 \text{ Вб};$$

Таблица В.1.

Базисные значения координат электропривода

Параметр	Значение
$U_6, \text{ В}$	410,4
$I_6, \text{ А}$	442,43
$\omega_{r.6}, \text{ с}^{-1}$	104,72
$M_6, \text{ Нм}$	4159,66
$I_{1\alpha 6}$	208,7
$I_{1\beta 6}$	1614,8
$\Psi_{26}$	1,676

Логарифмические частотные характеристики систем управления экструдером

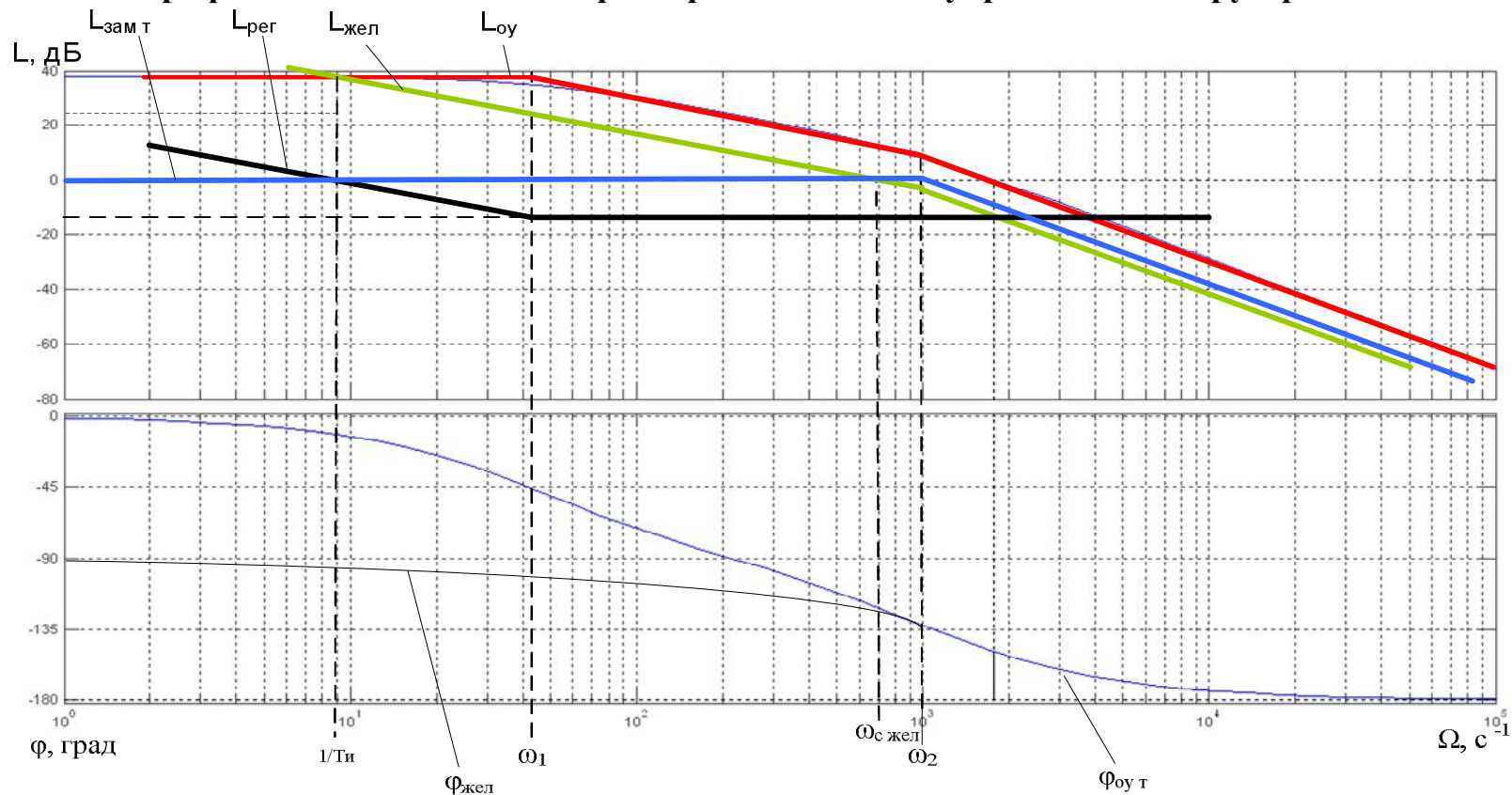
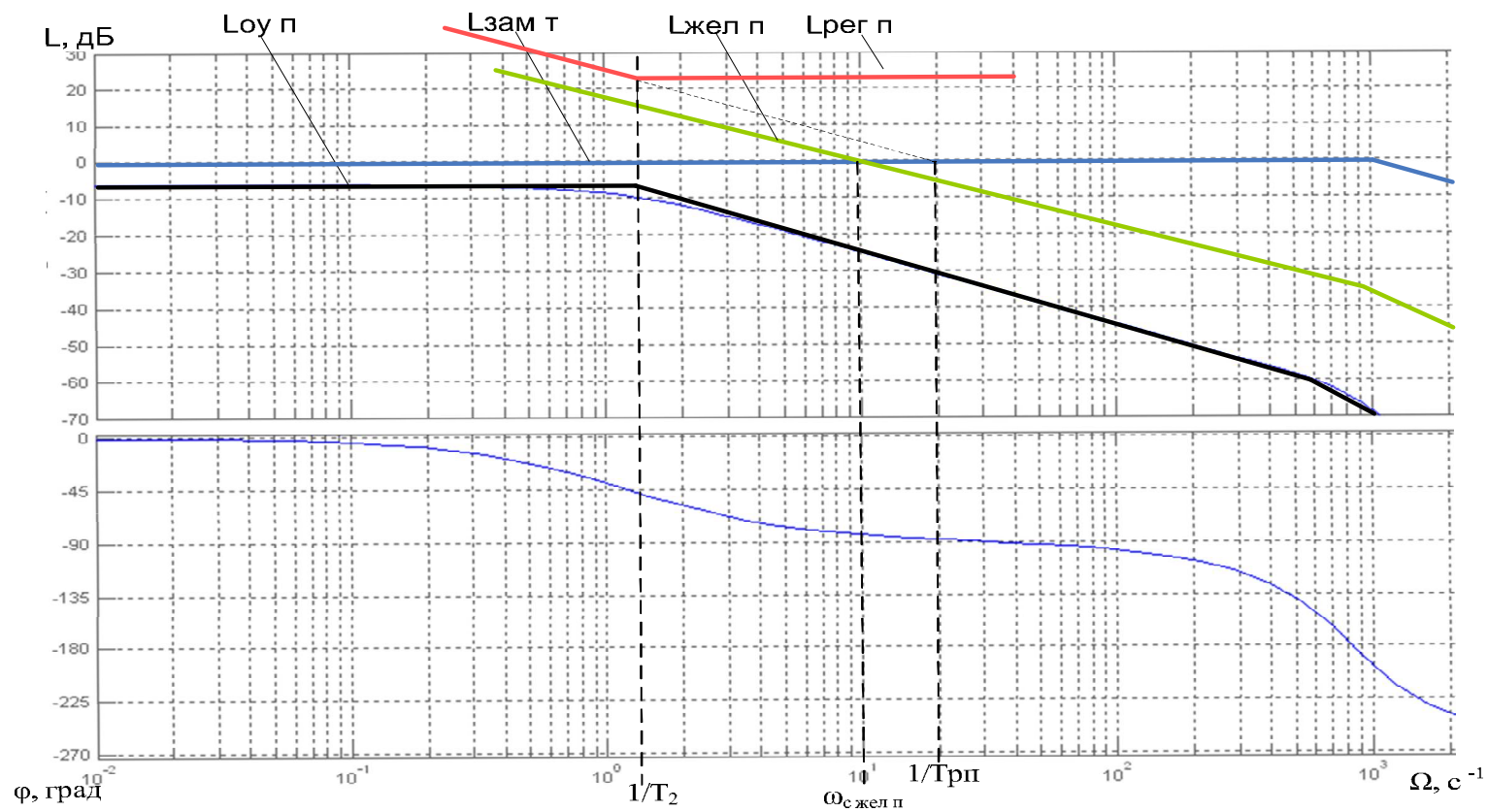
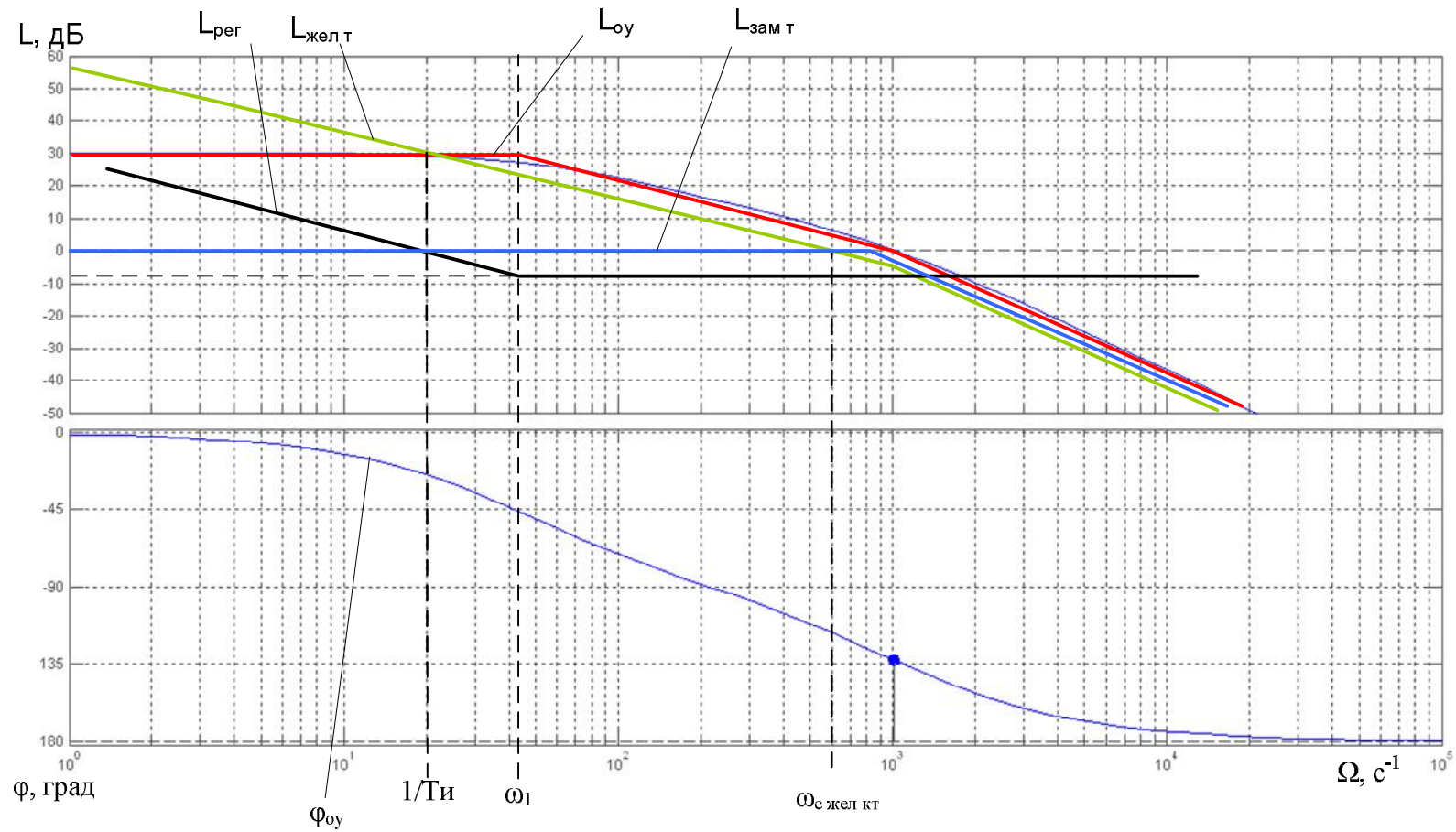


Рис. ПГ.1 ЛЧХ контура тока  $I_{1x}$  в системе векторного управления АД:

$L_{\text{оу.т}}$  – ЛАЧХ объекта управления в контуре тока (нескорректированной системы),  $L_{\text{жел.т}}$  – желаемая ЛАЧХ разомкнутой системы регулирования тока,  $L_{\text{рег.т}}$  – ЛАЧХ регулятора тока,  $\phi_{\text{оу.т}}$  – ФЧХ нескорректированной системы



**Рис. ПГ.2.** ЛЧХ контура потокосцепления:  
 $L_{\text{оу.п}}$  – ЛАЧХ объекта управления в контуре потока (нескорректированной системы),  $L_{\text{жел.п}}$  – желаемая ЛАЧХ разомкнутой системы регулирования потока,  $L_{\text{рег.п}}$  – ЛАЧХ регулятора потока,  $\phi_{\text{оу.п}}$  – ФЧХ нескорректированной системы

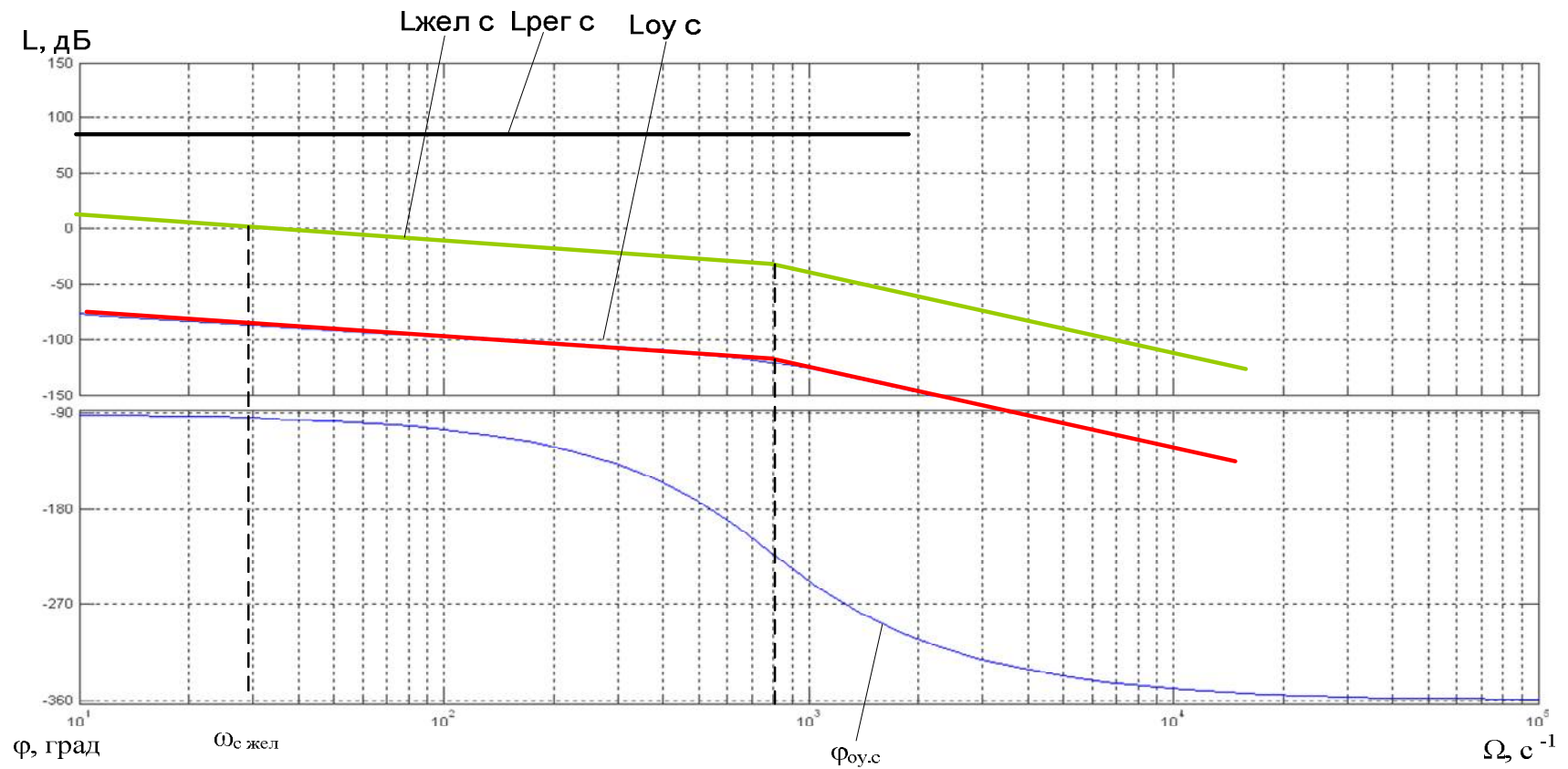


**Рис. ПГ.3.** ЛЧХ контура тока  $I_{1y}$  :

$L_{\text{оу.т}}$  – ЛАЧХ объекта управления в контуре тока (нескорректированной системы),  $L_{\text{жел.т}}$  – желаемая ЛАЧХ разомкнутой системы регулирования тока,  $L_{\text{рег.т}}$  – ЛАЧХ регулятора тока,  $\varphi_{\text{оу.т}}$  – ФЧХ нескорректированной системы

[Введите текст]

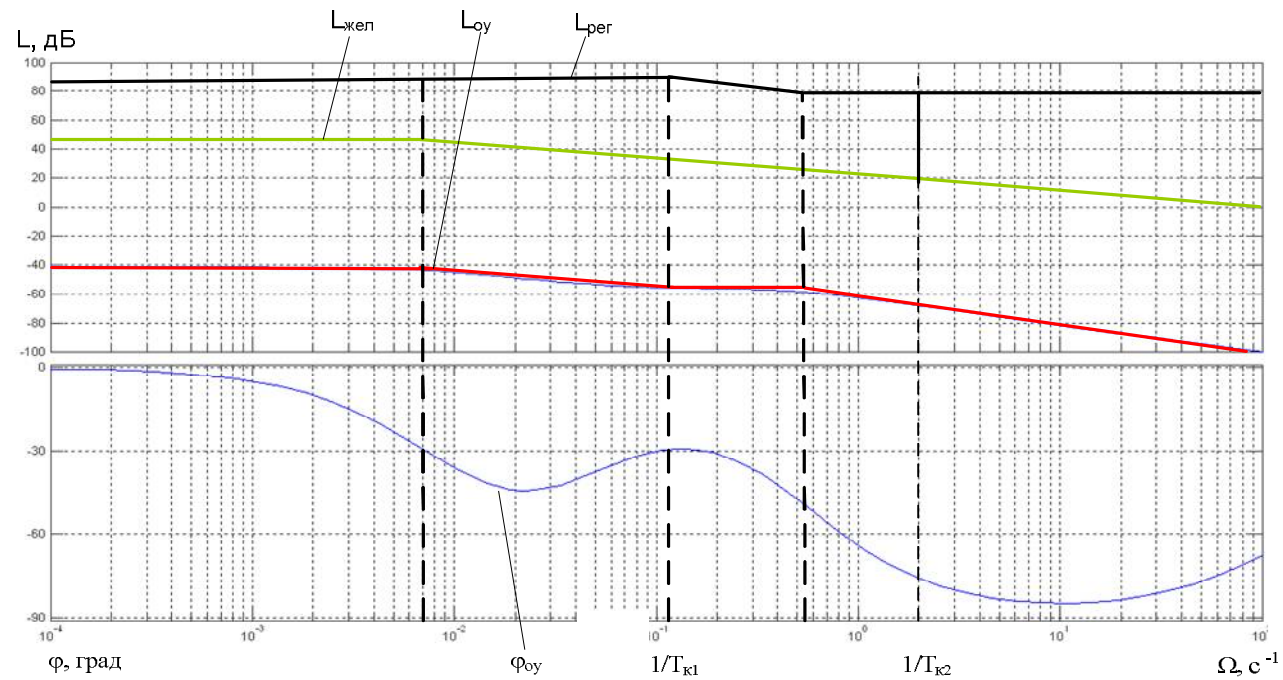




**Рис. ПГ.4.** ЛЧХ контура регулирования скорости:

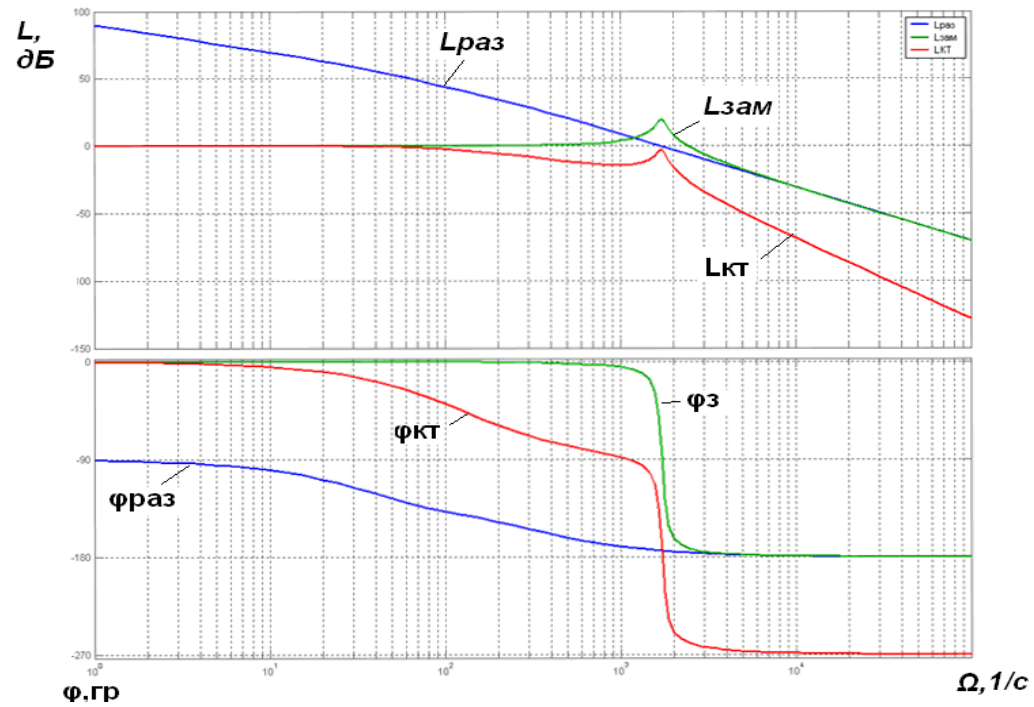
$L_{\text{об.с}}$  – ЛАЧХ объекта управления в контуре скорости (нескорректированной системы),  $L_{\text{жел.с}}$  – желаемая ЛАЧХ разомкнутой системы регулирования скорости,  $L_{\text{рег.с}}$  – ЛАЧХ регулятора скорости,  $\varphi_{\text{об.с}}$  – ФЧХ нескорректированной системы

[Введите текст]



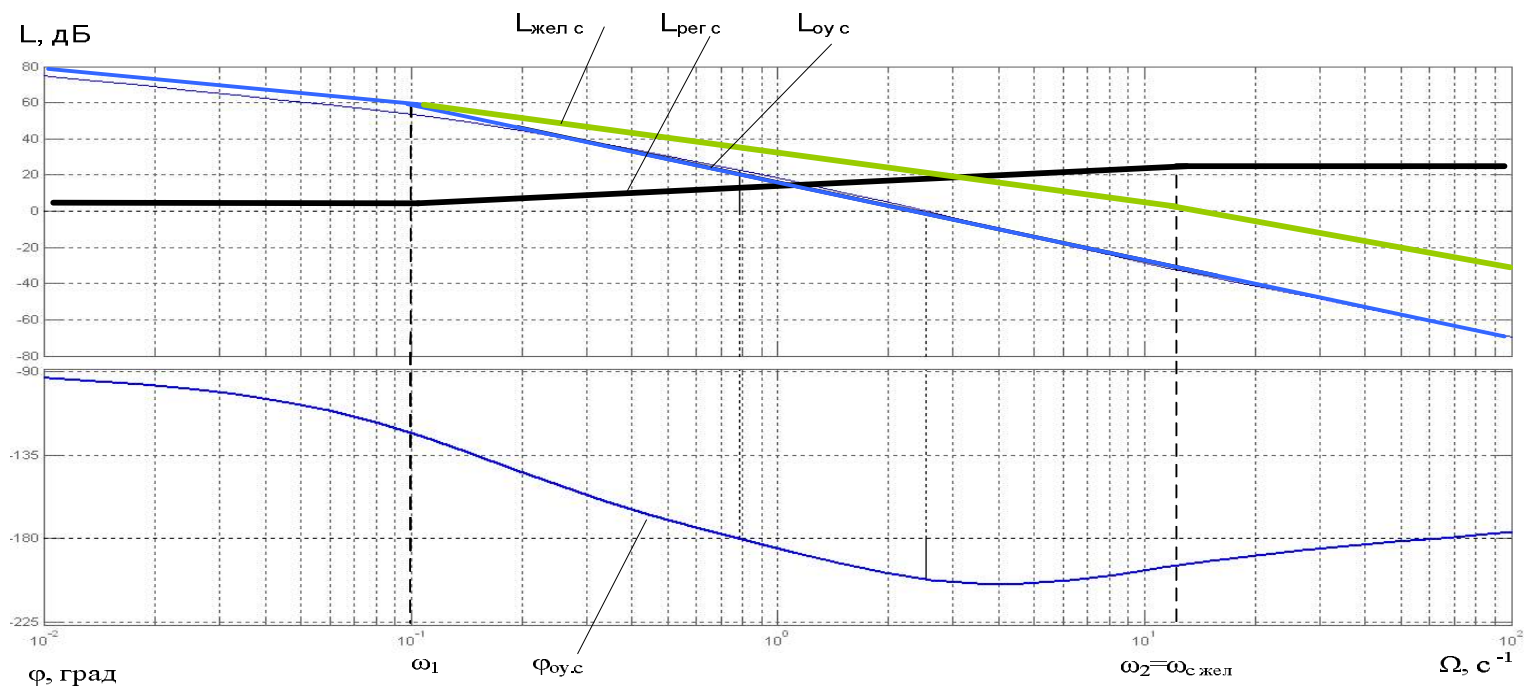
**Рис. ПГ.5.** ЛЧХ разомкнутого контура давления с системы с векторным управлением АД ( $L_{\text{об}}$  – ЛАЧХ объекта управления,  $\varphi_{\text{об}}$  – ФЧХ объекта управления), желаемая ЛАЧХ контура ( $L_{\text{жел}}$ ), ЛАЧХ регулятора давления ( $L_{\text{рег.д}}$ )

[Введите текст]



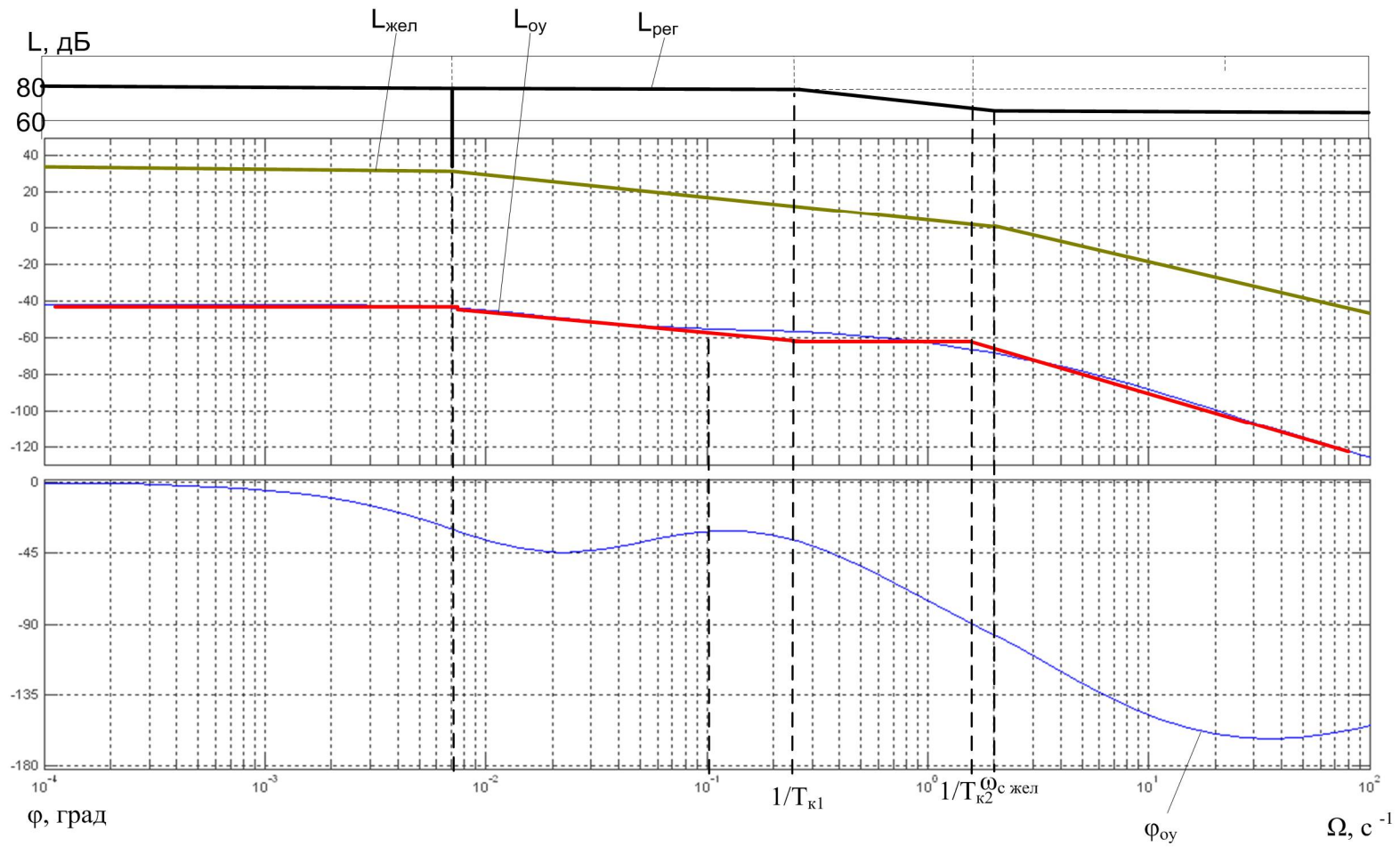
**Рис. ПГ.6.** ЛАЧХ контура тока в системе частотно-токового управления АД:

$L_{раз}$  – желаемая ЛАЧХ разомкнутой системы регулирования тока,  $L_{КТ}$ – ЛАЧХ контура тока,  $L_{зам}$  – ЛАЧХ замкнутой системы,  $\Phi_{раз}$  – ФЧХ разомкнутой системы,  $\Phi_{КТ}$  – ФЧХ контура тока,  $\Phi_{зам}$  – ФЧХ замкнутого контура тока



**Рис. ПГ.7** ЛАЧХ контура скорости в системе частотно-токового управления:

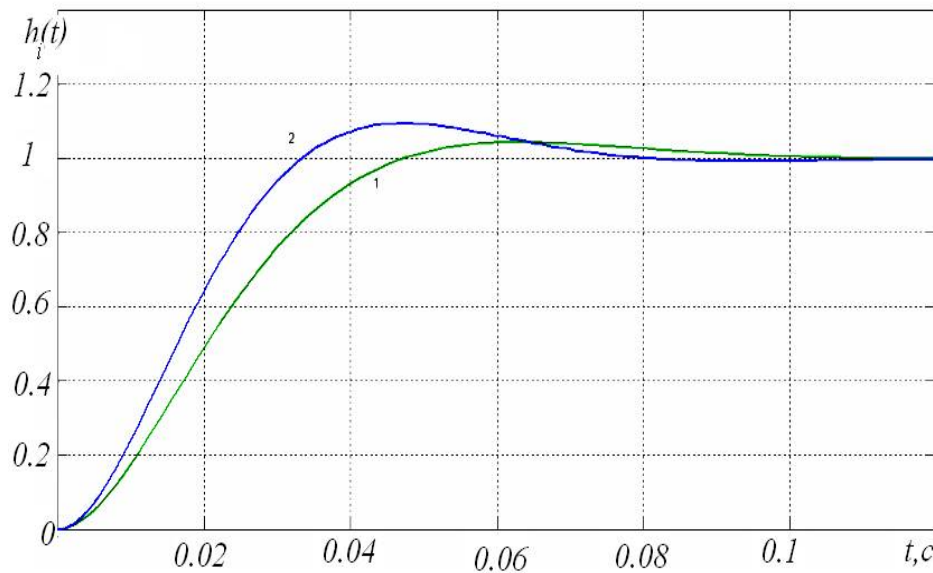
$L_{\text{жел.с}}$  – желаемая ЛАЧХ разомкнутой системы регулирования скорости,  $L_{\text{рег.с}}$  – ЛАЧХ регулятора скорости,  $\varphi_{\text{оу.с}}$  – ФЧХ нескорректированной системы,  $L_{\text{раз.с}}$  – ЛАЧХ разомкнутой системы



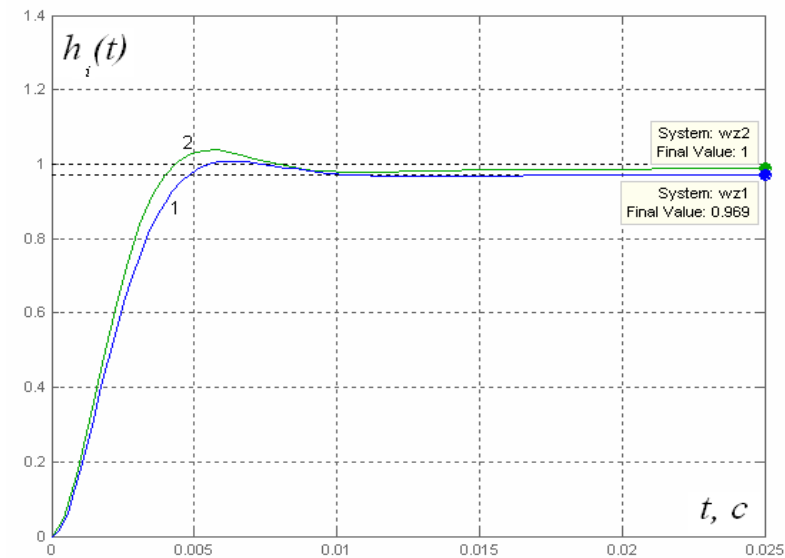
**Рис. ПГ.8.** ЛЧХ контура давления в частотно-токовой системе ( $L_{\text{оу}}$  – ЛАЧХ объекта управления,  $\phi_{\text{оу}}$  – ФЧХ объекта управления), желаемая ЛАЧХ контура ( $L_{\text{жел}}$ ), ЛАЧХ регулятора давления ( $L_{\text{рег.д}}$ )

[Введите текст]

Графики переходных процессов в разработанных системах электропривода экструдера

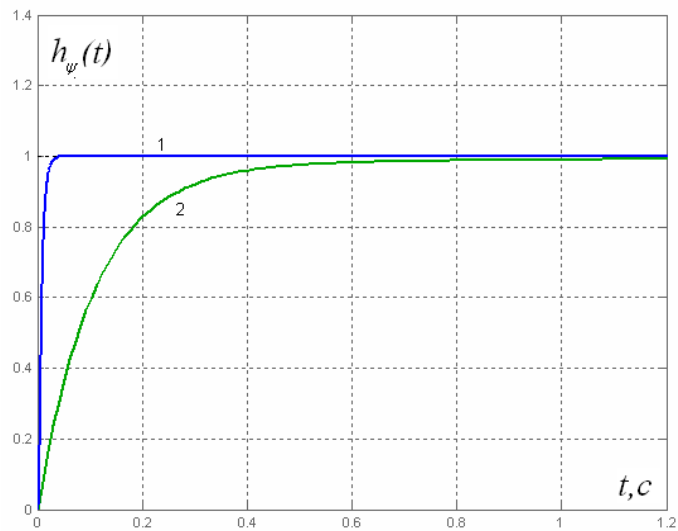


б

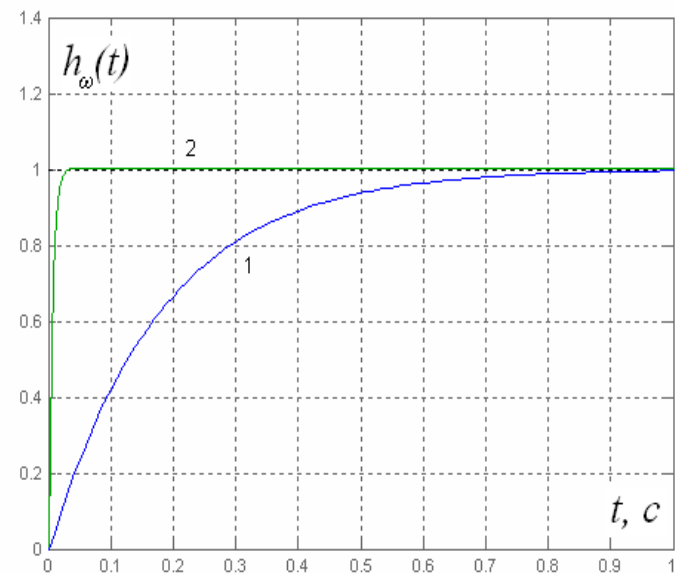


а

**Рис. ПД1.** Переходные процессы при отработке скачка задания по току в контуре потокосцепления: а) 1 – график получен при синтезе РТ методом стандартных настроек, 2 – частотном методе синтеза; б) переходные процессы при отработке скачка задания по току в контуре скорости: 1 – синтез РТ методом стандартных настроек, 2 – частотный метод синтеза



а



б

**Рис. ПД.2.** Переходные процессы при отработке скачка задания: а) в контуре потокосцепления: 1 – синтез РП методом стандартных настроек, 2 – частотный метод синтеза; б) в контуре скорости: 1 – синтез РС методом стандартных настроек, 2 – частотный метод синтеза

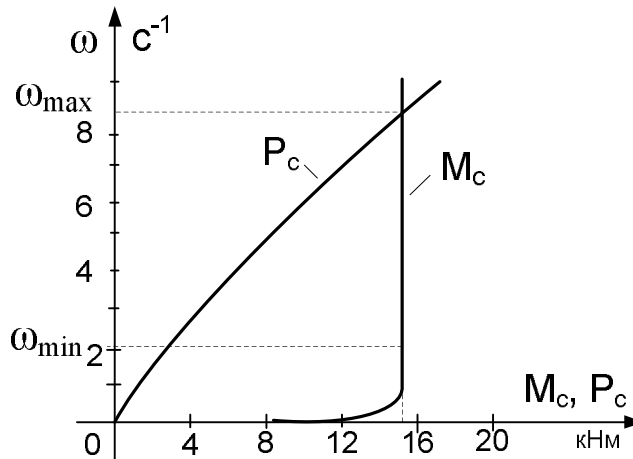
## ПРИЛОЖЕНИЕ Е.

### Расчет и выбор электродвигателя для экструдеров

Экспериментальные механические характеристики шприцмашины МЧТ-250 для производства протекторов приведены на рис. 1. Согласно техническим данным (см. табл.П.2.1) экструдер имеет следующие характеристики: Максимальная частота вращения червяка  $N_{max}=81$  об/мин (или  $\omega_{max}=8,5$  с<sup>-1</sup>), статический момент для экструдеров данного типа остается постоянным в рабочем диапазоне частот и составляет  $M_c=15270$  Нм. Мощность на валу червяка изменяется практически линейно с увеличением скорости (см.гл. 2, рис. 2.10, 2.11). На любой скорости двигатель должен работать не перегреваясь, сколь угодно долгое время. При этом способе регулирования максимальная мощность двигателя будет при скорости  $\omega=\omega_{max}$ . Таким образом, максимальная мощность двигателя должна быть равна максимальной мощности на валу червяка:

$$P_{c,max} = \omega_{max} M_c .$$

Для заданного графика нагрузки целесообразно вести регулирование вниз от основной скорости при постоянстве приводного момента.



**Рис. ПЕ1.** Экспериментальные характеристики экструдера МЧТ-250 в составе поточной линии ИРУ-16Б

Очевидно, что при этом способе регулирования номинальная мощность двигателя определяется из следующих соотношений:

$$M_n = M_c ; \omega_n = \omega_{max} .$$

Последнее выражение следует из того, что при рассматриваемом способе регулирования ведется вниз от номинальной скорости [102].

$$P_n = M_n \cdot \omega_n = M_c \cdot \omega_{max} = P_{c,max} .$$

[Введите текст]



Выбранный по указанным величинам двигатель работает во всем диапазоне с постоянным магнитным потоком. Так как момент на валу постоянен и равен номинальному, то ток нагрузки во всем диапазоне остается равным номинальному [102]. Подставив численные значения из графика (рис. ПЖ1), получим значение номинальной мощности двигателя:

$$D_i = 15270 \cdot 8,5 = 129795 \text{ Вт.}$$

Однако, развить указанный момент нагрузки  $M_c$  с частотой вращения  $\omega_{max}=8,5 \text{ с}^{-1}$  при данной расчетной мощности двигателя технически невозможно. Для этого потребовалось бы увеличить мощность двигателя в несколько раз. Отсюда следует целесообразность применения редуктора. Редуктор позволяет сместить точку номинального режима в сторону больших моментов и меньших скоростей.

Как правило, при модернизации систем электроприводов, техническую компоновку механических соединений стремятся оставить без изменений ввиду больших капитальных затрат на ее реконструкцию. Поэтому целесообразным является применение имеющегося редуктора (технические данные  $i=12$ ,  $\eta=0,98$ ), в составе привода машин МЧТ-250.

Таким образом, для привода с имеющимся редуктором имеем следующие данные двигателя:

$$P_n = \frac{P_{c,max}}{\eta} = \frac{129795}{0,98} = 132443 \text{ Вт,}$$

$$M_n = \frac{M_c}{i} = \frac{15270}{12} = 1272,5 \text{ Нм,}$$

$$\omega_n = \omega_{max} \cdot i = 8,5 \cdot 12 = 102 \text{ с}^{-1}$$

Полученным расчетным данным удовлетворяет двигатель АДЧР315МА6 со след. техническими данными  $D_i = 132 \text{ кВт}$ ,  $i_i = 1273 \text{ Нм}$ ,  $n_{ном}=990 \text{ об/мин}$  или  $\omega_i = 104,62 \text{ с}^{-1}$ .

Рассмотрим методику выбора электродвигателя для двухзонного электропривода экструдера.

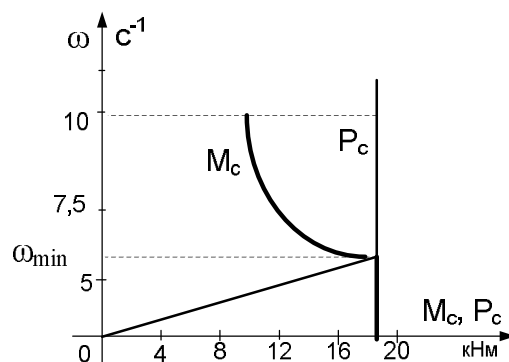


Рис. ПЕ.2. Экспериментальные характеристики экструдера МЧХ-250 в составе поточной линии КАМА-8.

Экспериментальные механические характеристики шприцмашины МЧХ-250 (машина червячная холодного питания  $D=250 \text{ мм}$ ) приведены на рис. 2. В [Введите текст]

первой зоне ( $0 - \omega_{\min}$ ) при выпуске протекторных заготовок данная поточная линия работает со скоростью движения 6 м/мин, что соответствует скорости вращения червяка  $N_{\min} = 75$  об/мин ( $\omega_{\min} = 6,5$  рад/с), машина работает с постоянным моментом сопротивления  $M_c = 18,2$  кНм = const.

При этом средняя потребляемая мощность согласно экспериментальным данным, приведенным в [30], составляет около 120 кВт (рис. ПЖ3).



**Рис. ПЕ.3.** Экспериментальная кривая потребляемой мощности двигателя МЧХ-250.

Согласно технологическим требованиям при выпуске боковых лент и подбрескерных заготовок, максимальная скорость движения поточной линии должна составлять 16 м/мин, что соответствует скорости вращения червяка  $N_{\max} = 98$  об/мин ( $\omega_{\max} = 10,25$  с<sup>-1</sup>).

В этом случае, как показано в [102] за номинальную скорость двигателя должна быть принята  $\omega_{\min}$ , так как регулирование скорости ведется вверх от номинальной  $\omega_i = \omega_{\min}$ . Номинальный момент соответственно равен:

$$M_n = \frac{P_c}{\omega_{\min}} \quad (4)$$

Подставив, численные значения, учитывая потери в двигателе (КПД приводного двигателя пост. тока  $\eta = 0,93$ ), имеем:

$$M_n = \frac{P_c \eta_o}{\omega_{\min}} = \frac{12000 \cdot 0,93}{6,5} = 17169 \text{ Нм}$$

Следовательно:

$$P_n = M_n \cdot \omega_n = P_c \quad (5)$$

Подставив численные значения из графика (рис. ПЖ.2), получим значение номинальной мощности двигателя:

$$P_n = 17169 \cdot 6,5 = 111600 \text{ Вт.}$$

Однако, не существует двигателей, способных при указанной мощности развить момент 10,8 кНм. В случае применения имеющегося редуктора (технические данные  $i=16$ ,  $\eta=0,98$ ), имеем

$$P_n = \frac{P_c}{\eta} = \frac{111600}{0,98} = 113877 \text{ Вт}$$

$$M_n = \frac{Mc}{i} = \frac{17169}{16} = 1073 \text{ Нм}$$

$$\omega_n = \omega_{\min} \cdot i = 6,5 \cdot 16 = 104 \text{ с}^{-1}$$

. Полученным расчетным данным удовлетворяет двигатель АДЧР315МА6 со след. техническими данными  $P_i = 132 \text{ кВт}$ ,  $M_i = 1273 \text{ Нм}$ ,  $n_{\text{НОМ}} = 990 \text{ об/мин}$  или  $\omega_i = 104,62 \text{ с}^{-1}$ , максимальная частота вращения  $\omega_{\max} = 314 \text{ рад}^{-1}$ . Характеристики указанного двигателя приведены на рис. ПЕ.4

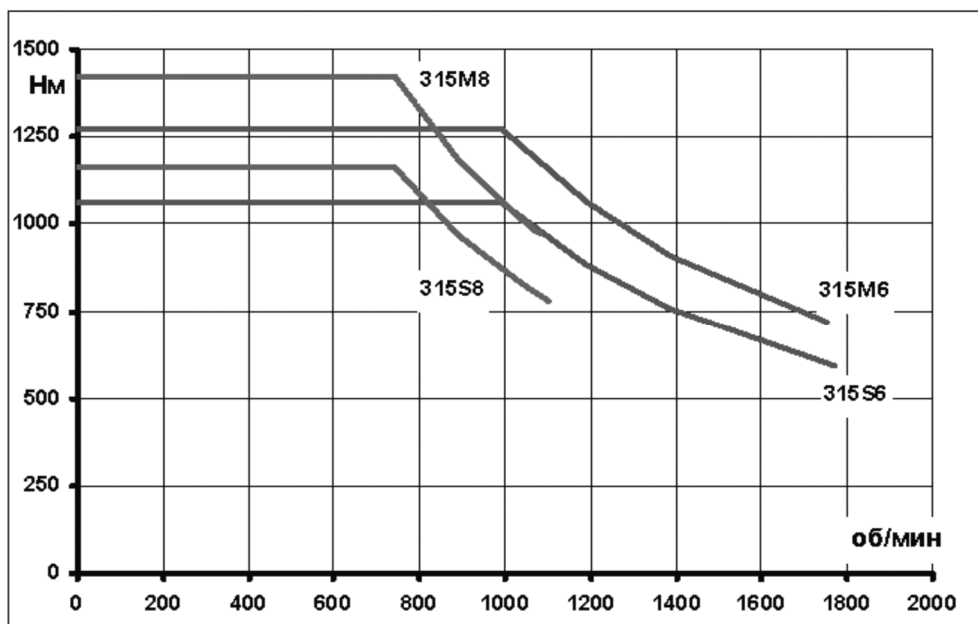


Рис. ПЕ.4. Моментные характеристики двигателей АДЧР 315 (приведены для 1 и 2 зоны регулирования)

## ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.

### Результаты исследований электропривода и готовой продукции после внедрения системы управления экструдером частотно-регулируемого ЭП экструдера

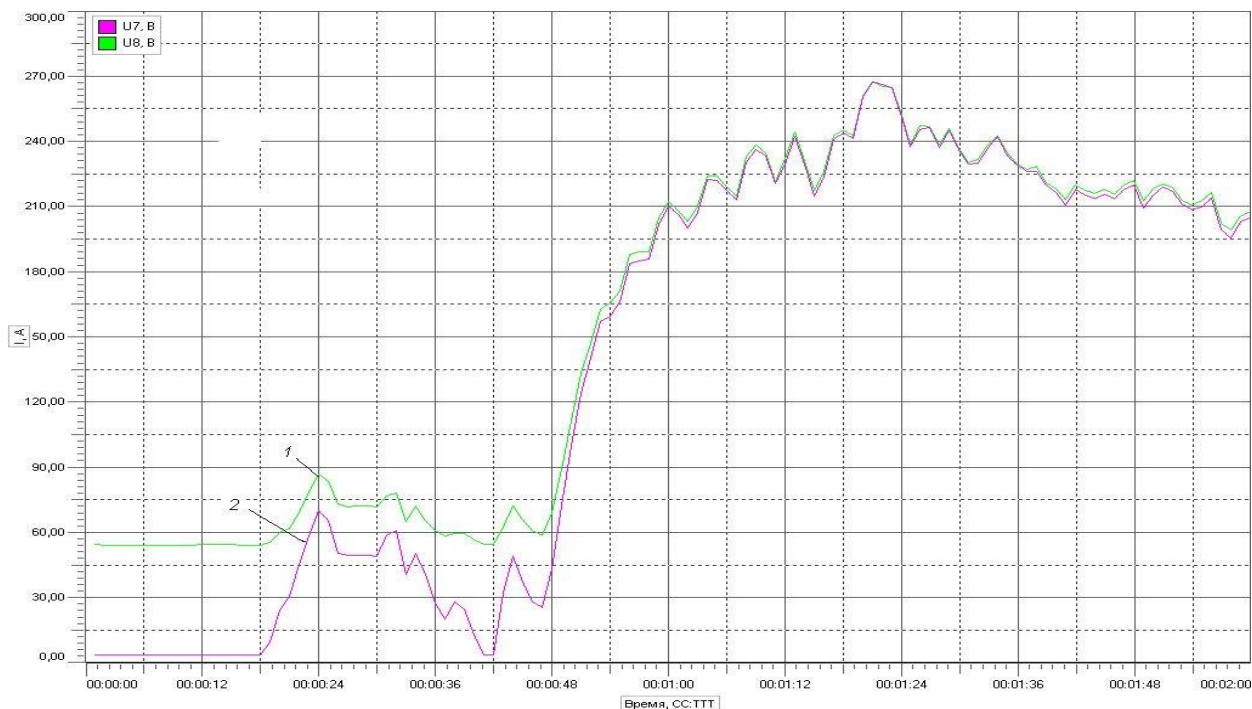


Рис. ПЖ.1. Кривые тока в момент пуска электропривода: 1 - эксперимент, 2 - расчет на ЭВМ

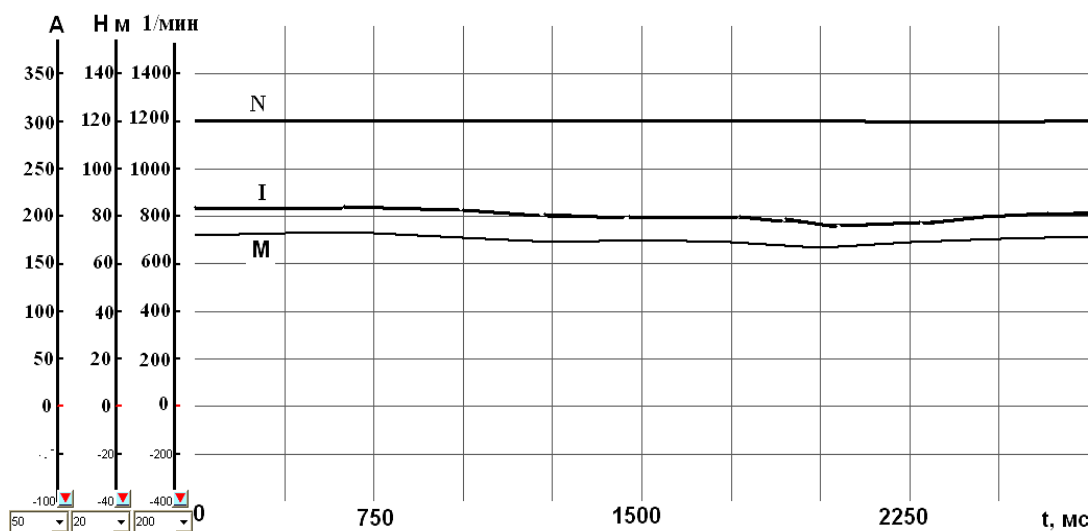
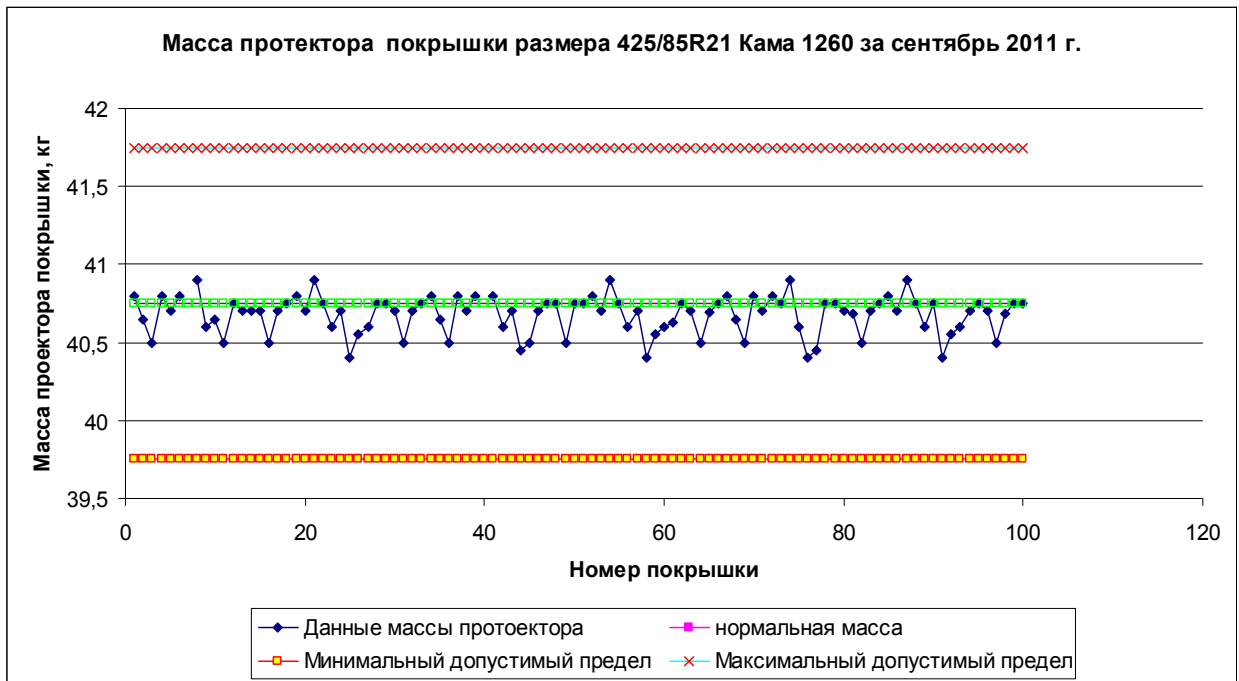


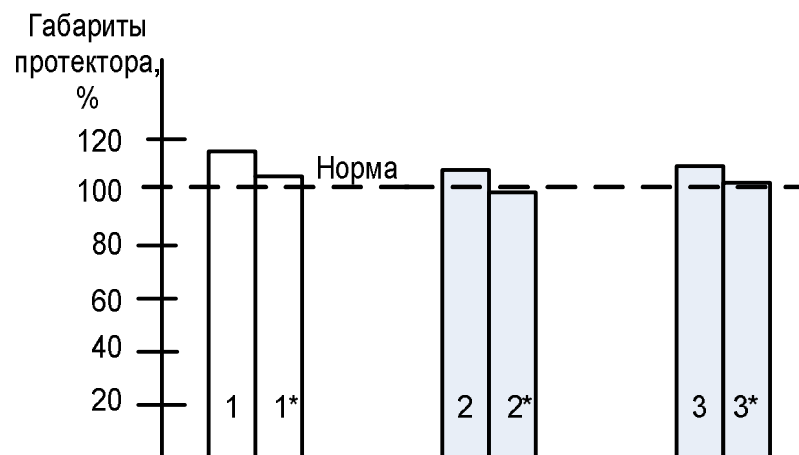
Рис. ПЖ.2. Экспериментальные графики электромагнитного момента ( $M$ ), частоты вращения ротора ( $N$ ), действующего значения тока ( $I$ ) приводного двигателя экструдера МЧТ-250

[Введите текст]



Максимальное отклонение массы составляет  $\pm 0,06$  кг, при допустимом отклонении  $\pm 0,4$  кг

**Рис. ПЖ.3.** Результаты измерений массы протектора



**Рис. ПЖ.4.** Сравнительная гистограмма габаритных размеров протектора 425/85 R21 Кама 1260 до и после внедрения ЧРП экструдера:  
 длина протектора до внедрения 1, после внедрения 1\*;  
 ширина протектора до внедрения 2, после – 2\*;  
 толщина протектора до внедрения 3, после – 3\*

[Введите текст]

Таблица ПЖ.1. Результаты измерения габаритных размеров заготовок до и после (в скобках) внедрения ЧРП экструдера МЧТ-250

Исследуемый образец	Кол-во измеренных образцов	Шифр р/см	Значение	Фактическая толщина образца после 2-х часовой отлежки, мм			Регламентное значение толщины после 2-х часовой отлежки, мм			Фактическая длина образца после 2-х часовой отлежки, мм	Регламентное значение длины после 2-х часовой отлежки, мм	Фактическая ширина образца после 2-х часовой отлежки, мм	Регламентное значение ширины после 2-х часовой отлежки, мм
				По центру	По углу	По кромке	По центру	По углу	По кромке				
500/70-20 (1200x500-508) мод. ИД – П284 (протек-тор)	5	4нк 961-020	Макс. Сред. Мин.	28,5 (29,8) 28,3 (29,35) 28,1 (28,9)	34,8 (33,3) 33,95 (33,05) 33,1 (32,8)	3,1 (3,24) 3,075 (3,215) 3,05 (3,19)	28±1	34±1	3	2610 (2617) 2605,5 (2615) 2601 (2613)	2600±15	505(507) 504(506.5) 503(506)	500±5
425/85 P21 Мод. КАМА 1260 (протек-тор)	5	4нк 961-120	Макс. Сред. Мин.	19,8 (21,4) 19,65 (21,25) 19,5 (21,1)	37 (37,7) 36,45 (37,45) 35,9 (37,2)	2,1 (2,28) 2,15 (2,22) 2 (2,16)	19±1	36±1	2	3646 (3659) 3641,5 (3656,5) 3637 (3654)	3640±15	432(435) 431(434) 430(433)	430±5
530/70-21(1300x530-533) Мод. КАМА-410 (протек-тор)	5	4нк 961-120	Макс. Сред. Мин.	23,7 (24,9) 23,25 (24,6) 23,2 (24,3)	35,9 (37,4) 35,5 (37,15) 35,1 (36,9)	2,3 (2,6) 2,15 (2,35) 2 (2,1)	23±1	35±1	2	2630 (2644) 2625 (2641) 2620 (2638)	2625±15	634(632,4) 632(632) 630(631,6)	630±5
14.00-20 Мод. ОИ-25 (протек-тор)	5	4нк 961-020	Макс. Сред. Мин.	32,8 (34,7) 32,25 (34,45) 31,7 (34,2)	35,8 (38,3) 35,3 (38,05) 34,8 (37,8)	3,1 (2,9) 3 (2,75) 2,9 (2,6)	32±1	35±1	3	2610 (2620) 2604 (2617) 2598 (2614)	2600±15	444(446,5) 442(446) 440(445,5)	440±5

[Введите текст]

**Учебное издание**

**Ганиев Ришат Наильевич**

кандидат технических наук

**ОПТИМИЗАЦИЯ ЭКСТРУЗИОННОГО ПРОЦЕССА  
ШИНОПРОИЗВОДСТВА ПРИМЕНЕНИЕМ ЧАСТОТНО-  
РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА**

**МОНОГРАФИЯ**

Корректор Белова И.М.

Худ. редактор Федорова Л.Г.

**Сдано в набор**

**Подписано в печать**

**Бумага писчая. Гарнитура Таймс.**

**Усл.печ.л. 7,25. Тираж 50 экз.**

**Заказ № .**

НХТИ (филиал) ФГБОУ ВПО «КНИТУ»,  
г. Нижнекамск, 423570, ул. 30 лет Победы, д. 5а.