

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электропривод и автоматика

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Частотно-регулируемый электропривод крановой тележки

УДК 62-83-523:621.873

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5ГЗА1	Маленко Максим Тимофеевич		

Руководитель

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусев Н.В.	к.т.н.		

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова С.Н.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева И.Л.			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель Отделения	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор	Дементьев Ю.Н.	Ph.D, доцент		

Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Инженерная школа энергетики

Отделение Электроэнергетики и электротехники

Направление подготовки 13.03.02 - Электроэнергетика и электротехника (бакалавриат)

Профиль Электропривод и автоматика

УТВЕРЖДАЮ:

Зав. отделением

_____ Ю.Н. Дементьев
(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
3-5ГЗА1	Маленко Максиму Тимофеевичу

Тема работы:

Частотно-регулируемый электропривод крановой тележки	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№ 856/с от 08.02.2018г

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2018г.
--	--------------

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе	Материалы преддипломной практики, техническая литература, техническая документация.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	Введение; описание технологического процесса; Выбор мощности двигателя, расчет параметров элементов и характеристик силовой цепи, расчет и построение механических и электромеханических характеристик системы ПЧ-АД, оптимизация контуров регулирования, тока, потокосцепления и скорости, разработка нелинейной модели САУ РЭП переменного тока с векторным управлением в

	среде Matlab, социальная ответственность проекта; финансовый менеджмент; заключение.
Перечень графического материала	<ul style="list-style-type: none"> - схема кинематическая механизма передвижения; - схема электрическая функциональная; - схема структурная короткозамкнутого асинхронного двигателя в неподвижной системе координат; - схема структурная динамической модели короткозамкнутого асинхронного двигателя во вращающейся системе координат; - схема имитационной модели короткозамкнутого асинхронного двигателя во вращающейся системе координат; - демонстрационный лист; - технико-экономические показатели;
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Попова Светлана Николаевна
Социальная ответственность	Мезенцева Ирина Леонидовна
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	05.04.2018г.
---	--------------

Задание выдал руководитель:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Гусев Н.В.	К.Т.Н.		05.04.2018г.

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5ГЗА1	Маленко Максим Тимофеевич		05.04.2018г.

Реферат

Выпускная квалификационная работа состоит из 128 страниц, 52 рисунка, 26 таблиц, 21 источников.

Ключевые слова: электропривод тележки козлового крана, преобразователь частоты, векторная система управления преобразователем частоты - асинхронный двигатель

В работе произведено описание работы козлового крана. Проведен расчет параметров элементов и характеристик силовой цепи, расчет и построение механических и электромеханических характеристик системы ПЧ-АД, оптимизация контуров регулирования, тока, потокосцепления и скорости, разработка нелинейной модели САУ РЭП переменного тока с векторным управлением в среде Matlab. Методом имитационного моделирования рассчитаны переходные процессы при пуске электропривода на холостом ходу и с максимальной нагрузкой тележки козлового крана.

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010 и представлена на компакт диске (в конверте на обороте обложки). Также при работе использовались программы Matlab Simulink, Microsoft Visio 2010 и MathCAD.

Содержание	
ВВЕДЕНИЕ	7
1 ОПИСАНИЕ КОЗЛОВОГО КРАНА	8
2 ОБЛАСТЬ РАБОТЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА	11
2.1 Выбор электродвигателя. Расчет параметров	12
2.2. Расчёт параметров схемы замещения электродвигателя	15
2.3 Естественные механическая и электромеханическая характеристики двигателя	18
2.4 Определение области допустимой длительной работы двигателя	21
2.5 Построение требуемых областей длительной и кратковременной работы двигателя	24
2.5.1 Построение областей работы в плоскости механических характеристиках двигателя	24
2.5.2 Построение областей работы электропривода в плоскости электромеханических характеристик двигателя	25
2.6 Выбор преобразователя частоты	28
2.7 Структурная схема силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель	33
2.7.1 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода	34
2.7.2 Расчет параметров механической системы	35
3 СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ЛИНЕАРИЗОВАННОЙ САУ	36
3.1 Структурная схема линеаризованной САУ РЭП	36
3.2 Оптимизация контура тока	38
3.3 Оптимизация контура потокосцепления	45
3.4 Оптимизация контура скорости с ПИ– регулятором	51
3.5 Отработка контуром скорости возмущающих воздействий	59
4 НЕЛИНЕЙНАЯ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА	62
4.1 Структурная схема нелинейной САУ РЭП асинхронного электропривода с векторным управлением	62
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»	66
5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ	68
5.1. Инициализация проекта и его технико-экономическое обоснование. Потенциальные потребители НТИ	68
5.1.1 Анализ и оценка научно-технической уровня исследуемого проекта	70
5.1.2 Анализ используемого и проектируемого оборудования	72
5.1.3 Выбор и обоснование принципиальной схемы электропривода	73
5.2. Планирование выполнения проекта	75
5.2.1 Определение трудоемкости работ	75
5.2.2 Планирование пуско-наладочных работ (ПНР)	81
5.2.3 Состав бригады для проведения ПНР	82
5.3. Расчет бюджета проектной работы	85
5.3.1 Расчет бюджета по НИР	85
5.3.2 Расчет бюджета на реализацию проекта	86

5.3.3 Расчет заработной платы исполнителей проекта	87
5.3.4 Расчет отчислений во внебюджетные фонды	90
5.3.5 Расчет накладных расходов	90
5.3.6 Формирование бюджета по монтажу и ПНР лифта	91
5.3.7 Расчет расходов при эксплуатации электропривода	91
5.3.8 Расчет амортизационных отчислений	92
5.3.9 Расчет заработной платы обслуживающего персонала	93
5.3.10 Расчет общей суммы эксплуатационных расходов	94
5.4. Определение ресурсосберегающей и экономической эффективности проекта	94
5.4.1 Расчет интегрального финансового показателя	94
5.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности	94
5.4.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения проекта	95
ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»	98
6. Социальная ответственность	100
6.1 Введение.	100
6.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов	100
6.2.1 Микроклимат рабочей зоны	101
6.2.2 Защита от шума и вибрации	102
6.2.3 Производственное освещение	102
6.3 Электробезопасность	103
6.3.1 Средства защиты от поражения электрическим током.	105
6.3.2 Защитное заземление	105
6.3.3 Расчёт искусственного заземления	106
6.4 Экологическая безопасность	108
6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях	109
6.5.1 Пожарная безопасность	109
6.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности	110
Заключение	112
Conclusion	113
Перечень использованных источников	114
Приложение А	116

ВВЕДЕНИЕ

Подъемно-транспортные машины (ПТМ) являются основным оборудованием для механизации работ в различных отраслях хозяйства: в промышленности, строительстве, на транспорте, в сельскохозяйственном производстве.

Козловой кран представляет собой грузоподъемную конструкцию для выполнения разгрузочных и погрузочных работ. Данный тип кранов используют на открытых площадках промышленных предприятий, грузовых дворов, полигонов по производству железобетонных изделий и контейнерных площадках железнодорожных станций.

Козловые краны получили повсеместное широкое распространение, и их разработка является одной из важнейших в сфере ПТМ. Создание рациональных и оригинальных конструкций в значительной степени зависит от умения сочетать уже известные варианты техники и вводить новые, соответствующие высокому уровню современных требований.

1 ОПИСАНИЕ КОЗЛОВОГО КРАНА

Козловые краны состоят из пролетного строения, опирающегося на опорные ноги, соединенные или непосредственно с ходовыми тележками в самомонтирующихся кранах, или с балками, в которых устанавливаются ходовые колеса крана. Их широко используют для механизации погрузочно-разгрузочных работ на складах и полигонах заводов строительных изделий, на площадках укрупнительной сборки, монтаже строительных конструкций и технологического оборудования, при строительстве главных корпусов тепловых и атомных электростанций, укладке бетона в плотину гидростанций, монтаже оборудования доменных и цементных обжиговых печей и другого тяжелого промышленного оборудования. Козловые краны разделяют на монтажные и общего назначения. Краны общего назначения имеют грузоподъемность до 5 т, монтажные - до 500 т.

Основные параметры этих кранов:

1. Высота подъема - 4-25 м.;
2. Пролет - до 40 м.;
3. Скорость подъема груза - до 32 м/мин.;
4. Скорость передвижения крана - до 100 м/мин.;
5. Скорость передвижения тележки до – 40 м/мин.

Скорости всех механизмов козловых кранов являются рабочими.



Рисунок 1 - Козловой кран

Несущей конструкцией козлового крана является мост с двумя опорами. По мосту крана перемещается грузовая тележка с грузозахватным устройством. Опоры крана устанавливаются на ходовые тележки, каждая из которых перемещается по двурельсовому пути. Мосты кранов малой (до 5 т) грузоподъемности изготавливают в виде пространственной трехпоясной фермы и балки двутаврового профиля, по которой передвигается грузовая тележка. Мосты кранов средней и большой грузоподъемности выполняются в виде четырехпоясной решетчатой фермы прямоугольного или трапециевидального сечения. Грузовая тележка этих кранов может перемещаться по нижнему или верхнему поясу моста. Распространены комбинированные конструкции кранов, у которых по верхнему поясу перемещается грузовая тележка основного, а по нижнему - вспомогательного механизма меньшей грузоподъемности. Мосты кранов выполняются с консолями и без них. Длина консолей достигает 25...30% от длины пролета. В этой случае тележка вспомогательного подъема перемещается по всей длине пролетного строения

При переработке штучных и сыпучих материалов, поступающих на разгрузочную площадку водным путем, автомобильным транспортом или в других случаях, требующих увеличения площади, обслуживаемой краном, пролетное строение козловых кранов выполняется с одной или двумя консолями.

Высота этих кранов выбирается в зависимости от заданной высоты подъема груза, а также с учетом габаритов предметов и сооружений, над которыми надо переместить грузы – эстакады, железнодорожные подъездные пути с транспортом, штабеля материалов и т. д. В зависимости от профиля обслуживаемой площадки ходовые тележки могут быть расположены на одинаковых или разных уровнях. В некоторых случаях одна из ходовых тележек расположена на уровне пролетного строения. Такие краны называются полукозловыми.

Большинство козловых кранов — самомонтирующиеся. Мост крана стреловым краном укладывают на шпальные клетки, одновременно устанавливают на рельсы ходовые тележки, стойки опор соединяют шарнирно с поясом моста и тележками, затем левые и правые стойка стягивают посредством лебедки и устанавливают кран в рабочее положение. Стойки опор внизу соединяют жесткими поперечинами (затяжками опор крана). Пролетное строение такого крана состоит из замкнутой листовой конструкции трапециидальной формы, грузовая тележка передвигается по рельсам, уложенным на боковых плоскостях пролетного строения

В других конструкциях обе опорные ноги козловых кранов с пролетом до 30 м. жестко соединяются с пролетным строением; с увеличением пролета одна нога проектируется пространственно жесткой (левая опора), а другая – плоской гибкой (правая опора). Такая схема исключает влияние на металлоконструкцию крана распора, который может возникнуть при действии повышенной температуры, вызывающей удлинение пролетного строения или при нарушении параллельности подкранового пути.

Механизмы подъема козловых кранов могут быть установлены на грузовой тележке или вынесены с нее. В первом случае грузовая тележка представляет собой обычную крановую тележку, несущую на себе механизм подъема груза и механизм передвижения тележки, или специальную грузовую тележку. Часто для уменьшения

веса и габаритов грузовой тележки механизмы подъема груза и передвижения тележки выносятся с грузовой тележки и устанавливаются над жесткой опорой. В этих случаях грузоподъемная тележка несет на себе блоки полиспаста механизма подъема, а тяговое усилие от механизма передвижения к тележке передается с помощью тягового каната. С уменьшением веса и габарита тележки уменьшается нагрузка на пролетное строение, что позволяет снизить вес крана в целом.

Управление козловыми кранами обычно осуществляется из кабины, которая выполняется стационарной или подвижной. Подвижная кабина обеспечивает лучший обзор места погрузки и разгрузки, но создает дополнительную подвижную нагрузку на пролетное строение, что вызывает необходимость увеличения сечения пролетного строения. Стационарная кабина крепится к пролетному строению около жесткой ноги или непосредственно к опорной ноге, что позволяет уменьшить нагрузку на пролетное строение. Однако при больших пролетах значительно ухудшается обзор из кабины.

2 ОБЛАСТЬ РАБОТЫ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА

Область работы электропривода (рисунок 2) задана в 4-х квадрантах плоскости координат:

Область кратковременной работы ограничена максимальной скоростью электропривода $\omega_{ЭПМАКС} = 136 \text{ рад/с}$ и значением максимального момента электропривода в пуско-тормозных режимах $M_{ЭП МАКС} = 137 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

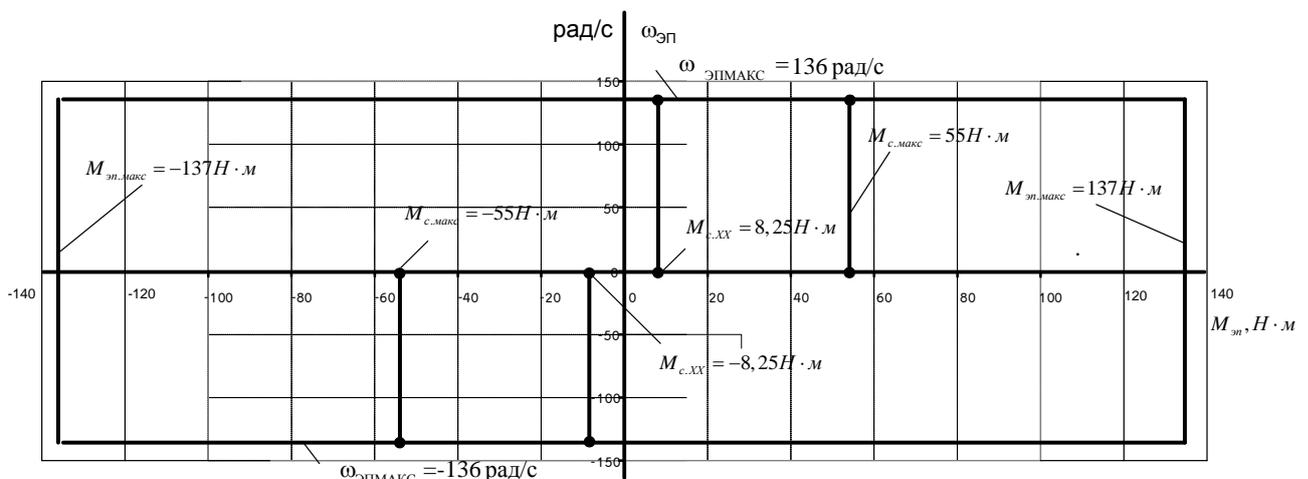


Рисунок 2 – Заданная область работы электропривода

2.1 Выбор электродвигателя. Расчет параметров

Расчет мощности электродвигателя тележки козлового крана производим по формуле [1]

$$P_{\text{дв.н}} \geq \frac{(m + Q) \cdot V \cdot 10^{-3}}{2,2 \cdot \eta} = \frac{(3000 + 30000) \cdot 40 \cdot 10^{-3}}{2,2 \cdot 0,72 \cdot 60} = 13,9 \text{ кВт} ,$$

где $Q = 30000$ кг - расчетная номинальная масса поднимаемого механизмом груза;

$m = 3000$ кг - масса тележки с двигателем и оснасткой;

$V = 40$ м/мин - линейная скорость горизонтального перемещения тележки с грузом;

$\eta = 0,72$ - КПД механизма передвижения тележки.

Номинальная скорость электродвигателя выбирается исходя из условия $\omega_{\text{двном}} < \omega_{\text{элмакс}} = 136 \text{ рад/с}$, что требует регулирования скорости двигателя в первой зоне с постоянным потоком двигателя ($f_{\text{и}} \leq 50$ Гц) .

Мощность электродвигателя выбирается в соответствии с зависимостями длительно допустимого и кратковременно допустимого тока и момента или мощности двигателя в функции скорости.

Номинальная мощность электродвигателя выбирается в режиме длительной работы в соответствии со следующим условием $P_{\text{дв.н}} \geq P_{\text{двпотр}}$:

Выбираем электродвигатель общепромышленного назначения серии 4А160М4УЗ мощностью 18,5 кВт [2].

Технические данные выбранного электродвигателя сведены в таблице 1, параметры схемы замещения – в таблице 1.

Таблица 1 – Технические данные электродвигателя

Типоразмер	$n_0, \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right]$	$U_{\text{ИН}}, [\text{В}]$	$P_{\text{ДВ.Н}}, [\text{кВт}]$	При номинальной нагрузке			$s_{\text{К}}, \%$	$J_{\text{ДВ}}, [\text{кг} \cdot \text{м}^2]$
				$s_{\text{Н}}, \%$	$\cos \varphi_{\text{Н}}$	$\eta_{\text{Н}}, \%$		
4А160М4У3	1500	380	18,5	2,2	0,88	89,5	16	0,13

Продолжение таблицы 1

$m_{\text{П}} = \frac{M_{\text{ПУСК}}}{M_{\text{Н}}}$	$m_{\text{К}} = \frac{M_{\text{МАКС}}}{M_{\text{Н}}}$	$m_{\text{М}} = \frac{M_{\text{МИН}}}{M_{\text{Н}}}$	$k_{\text{ИДВ}} = \frac{I_{\text{ПУСК}}}{I_{\text{Н}}}$	Степень защиты
1,4	2,3	1	7	IP44

Таблица 2 – Параметры схемы замещения электродвигателя

$R_1', \text{о.е.}$	$X_1', \text{о.е.}$	$X_{\mu}', \text{о.е.}$	$R_2'', \text{о.е.}$	$X_2'', \text{о.е.}$
0,042	0.085	4,3	0.024	0,13

Определение дополнительных параметров двигателя

Синхронная угловая частота вращения двигателя

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1500}{30} = 157,08 \text{ рад/с.}$$

Номинальная частота вращения двигателя

$$n_{\text{ДВ.Н}} = (1 - s_{\text{Н}}) \cdot n_0 = (1 - 0,022) \cdot 1500 = 1467 \text{ об/мин.}$$

или

$$\omega_{\text{ДВ.Н}} = (1 - s_{\text{Н}}) \cdot \omega_0 = (1 - 0,022) \cdot 157,08 = 153,6 \text{ рад/с.}$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{ДВ.Н}} = \frac{P_{\text{ДВ.Н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{ДВ.Н}}} = \frac{18,5 \cdot 10^3}{153,6} = 120,4 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Номинальное фазное напряжение и номинальный фазный ток статора. Для определения номинального фазного тока необходимо знать схему соединения

обмоток статора. Если соединение обмоток неизвестно, то при расчете следует принять соединение Y.

$$U_{1\text{фн}} = \frac{U_{1\text{лн}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ В.}$$

Принимаем $U_{1\text{фн}} = 220 \text{ В.}$

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}}} = \frac{18,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,895} = 35,6 \text{ А.}$$

Примечания:

$I_{1\text{лн}}$ – ток, потребляемый двигателем из сети в номинальном режиме работы.

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске

$$I_{1\text{макс}} = k_{\text{идв}} \cdot I_{1\text{лн}} = 7 \cdot 35,6 = 249,2 \text{ А.}$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике

$$M_{\text{к}} = m_{\text{к}} \cdot M_{\text{двн}} = 2,3 \cdot 120,4 = 276,9 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске

$$M_{\text{двпуск}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{двн}} = 1,4 \cdot 120,4 = 168,6 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

2.2. Расчёт параметров схемы замещения электродвигателя

Производитель выбранных приводных двигателей серии 4A160M4УЗ не указывает параметры схемы замещения, поэтому предварительно необходимо произвести расчет данных параметров.

Расчёт параметров схемы замещения в номинальном режиме

Расчёт параметров ведем для Т-образной схемы замещения электродвигателя. Схема замещения приведена на рисунке 3.

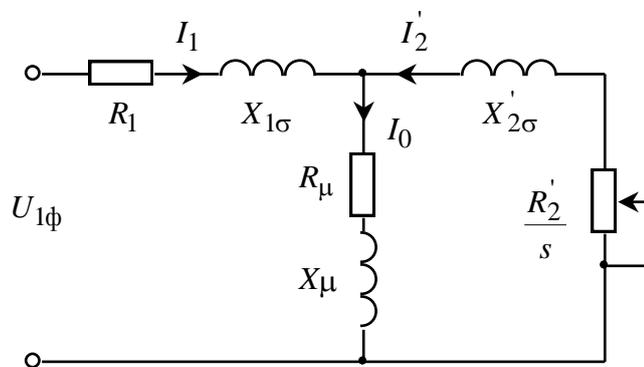


Рисунок 3 – Т – образная схема замещения асинхронного двигателя

Приведённое к обмотке статора сопротивление цепи ротора в номинальном режиме

$$R'_{2н} = \frac{3 \cdot U_{1\phiн}^2 \cdot (1 - s_n)}{2 \cdot m_k \cdot P_n \cdot c_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_k} \right)} = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,022)}{2 \cdot 2,3 \cdot 18500 \cdot 1,023^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{0,108} \right)} = 0,155 \text{ Ом},$$

где

$m_k = 2,3$ – кратность максимального момента;

$$c_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1н}} = 1 + \frac{11,543}{2 \cdot 7 \cdot 35,59} = 1,023$$

– коэффициент, характеризующий соотношение $\frac{X_\mu + X_{1\sigma}}{X_\mu}$;

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{1p^*}^2 - \left[\frac{p^* \cdot (1 - s_n)}{1 - p^* \cdot s_n} \cdot I_{1н} \right]^2}{1 - \left[\frac{p^* \cdot (1 - s_n)}{1 - p^* \cdot s_n} \right]^2}} = \sqrt{\frac{27,634^2 - \left[\frac{0,75 \cdot (1 - 0,022)}{1 - 0,75 \cdot 0,022} \cdot 35,59 \right]^2}{1 - \left[\frac{0,75 \cdot (1 - 0,022)}{1 - 0,75 \cdot 0,022} \right]^2}} = 11,543 \text{ А}$$

– ток холостого хода;

$$I_{1p^*} = \frac{p^* \cdot P_n}{3 \cdot U_{1\phiн} \cdot \cos \varphi_{p^*} \cdot \eta_{p^*}} = \frac{0,75 \cdot 18500}{3 \cdot 220 \cdot 0,88 \cdot 0,895} = 27,634 \text{ А}$$

– ток обмотки статора при частичной загрузке двигателя $p^* = 0,75$;

$$s_k = s_H \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - [1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} =$$

$$= 0,022 \cdot \frac{2,3 + \sqrt{2,3^2 - [1 - 2 \cdot 0,022 \cdot 1 \cdot (2,3 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,022 \cdot 1 \cdot (2,3 - 1)} = 0,108$$

– критическое скольжение двигателя;

$\beta = 1$ – коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора выбирается из диапазона $(0,6 \div 2,5)$.

Активное сопротивление обмотки статора в номинальном режиме работы

$$R_1 = R'_2 \cdot \beta \cdot c_1 = 0,155 \cdot 1 \cdot 1,023 = 0,158 \text{ Ом}.$$

Сопротивление короткого замыкания в номинальном режиме работы

$$X_{кн} = R'_2 \cdot \gamma \cdot c_1 = 0,155 \cdot 9,241 \cdot 1,023 = 0,329 \text{ Ом},$$

где

$$\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_k}\right)^2 - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,108}\right)^2 - 1} = 9,241$$

– коэффициент, характеризующий соотношение индуктивного сопротивления короткого замыкания и приведённого активного сопротивления ротора.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в номинальном режиме работы

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{кн} = 0,42 \cdot 1,464 = 0,615 \text{ Ом}.$$

Индуктивность обмотки статора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме работы

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1н}} = \frac{0,615}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 1,96 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}.$$

Приведённое к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора в номинальном режиме работы

$$X'_{2\sigma} = 0,58 \cdot \frac{X_{кн}}{c_1} = 0,58 \cdot \frac{1,464}{1,023} = 0,83 \text{ Ом}.$$

Приведённая к обмотке статора индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоками рассеяния, в номинальном режиме работы

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{0,83}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,64 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Индуктивное сопротивление цепи намагничивания

$$X_{\mu} = \frac{E_1}{I_0} = \frac{205,318}{11,543} = 17,788 \text{ Ом,}$$

где

$$\begin{aligned} E_1 &= \sqrt{(U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} - I_{1\text{н}} \cdot R_1)^2 + (U_{1\text{фн}} \cdot \sin \varphi_{\text{н}} - I_{1\text{н}} \cdot X_{1\sigma})^2} = \\ &= \sqrt{(220 \cdot 0,88 - 35,59 \cdot 0,158)^2 - (220 \cdot 0,475 - 35,59 \cdot 0,615)^2} = 205,717 \text{ В} \end{aligned}$$

– ЭДС ветви намагничивания, наведённая потоком воздушного зазора, в номинальном режиме;

$$\sin \varphi_{\text{н}} = \sqrt{1 - (\cos \varphi_{\text{н}})^2} = \sqrt{1 - 0,88^2} = 0,475.$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре

$$L_m = \frac{X_{\mu}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{17,788}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 56,65 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

2.3 Естественные механическая и электромеханическая характеристики двигателя

Зная значения параметров схемы замещения и их зависимость от скольжения, можно с достаточной точностью рассчитать и построить механическую и электромеханическую характеристики двигателя.

Механическая характеристика двигателя представляет собой зависимость скорости двигателя от электромагнитного момента на валу двигателя $\omega(M)$. Однако расчетные значения момента двигателя соответствуют электромагнитному моменту. Поэтому расчетные механические характеристики двигателя представляют собой зависимость скорости вращения от электромагнитного момента $\omega(M_{\text{эм}})$. Электромеханическая характеристика двигателя представляет собой зависимость скорости $I_1(\omega)$ или скольжения $I_1(s)$ от величины тока статора. Естественные характеристики строятся при частоте инвертора $f_{\text{и}} = f_{1H} = 50 \text{ Гц}$.

$$M(s) = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R_2'(s)}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[\left[X_{1\sigma}(s) + X_{2\sigma}'(s) \right]^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'(s)}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'(s)}{s \cdot X_{\mu H}} \right)^2 \right]};$$

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s).$$

Естественная электромеханическая характеристика асинхронного двигателя $I_1(\omega)$ с учетом эффекта вытеснения тока ротора и насыщения цепей потоков рассеяния рассчитывается по выражениям:

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2(s) + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0(s) \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)};$$

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s),$$

где

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'(s)}{s} \right)^2 + \left[X_{1\sigma}(s) + X_{2\sigma}'(s) \right]^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'(s)}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2}};$$

$$I_0(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{R_1^2 + \left(X_{1\sigma}(s) + X_{\mu} \right)^2}};$$

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{1\sigma}(s) + X_{2\sigma}'(s)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'(s)}{s} \right)^2 + \left[X_{1\sigma}(s) + X_{2\sigma}'(s) \right]^2}}.$$

Используя приложение MathCAD 14, рассчитываются и строятся естественные характеристики двигателя $\alpha(M_{эм})$ и $I_1(\omega)$. В процессе расчета механической характеристики находятся расчетные значения критического скольжения s_K , электромагнитного номинального $M_{эмH} = M_{эм}(s_H)$, критического $M_{эмK}(s_K) = M_{эмK}$ моментов, соответствующие расчетной естественной механической характеристике двигателя. При расчете электромеханической

характеристики находятся расчетные значения тока холостого хода I_0 , номинального $I_H = I_{1\phi H}$ тока двигателя.

Естественные расчетные механическая и электромеханическая характеристики двигателя приведены, соответственно, на рисунках 4 и 5.

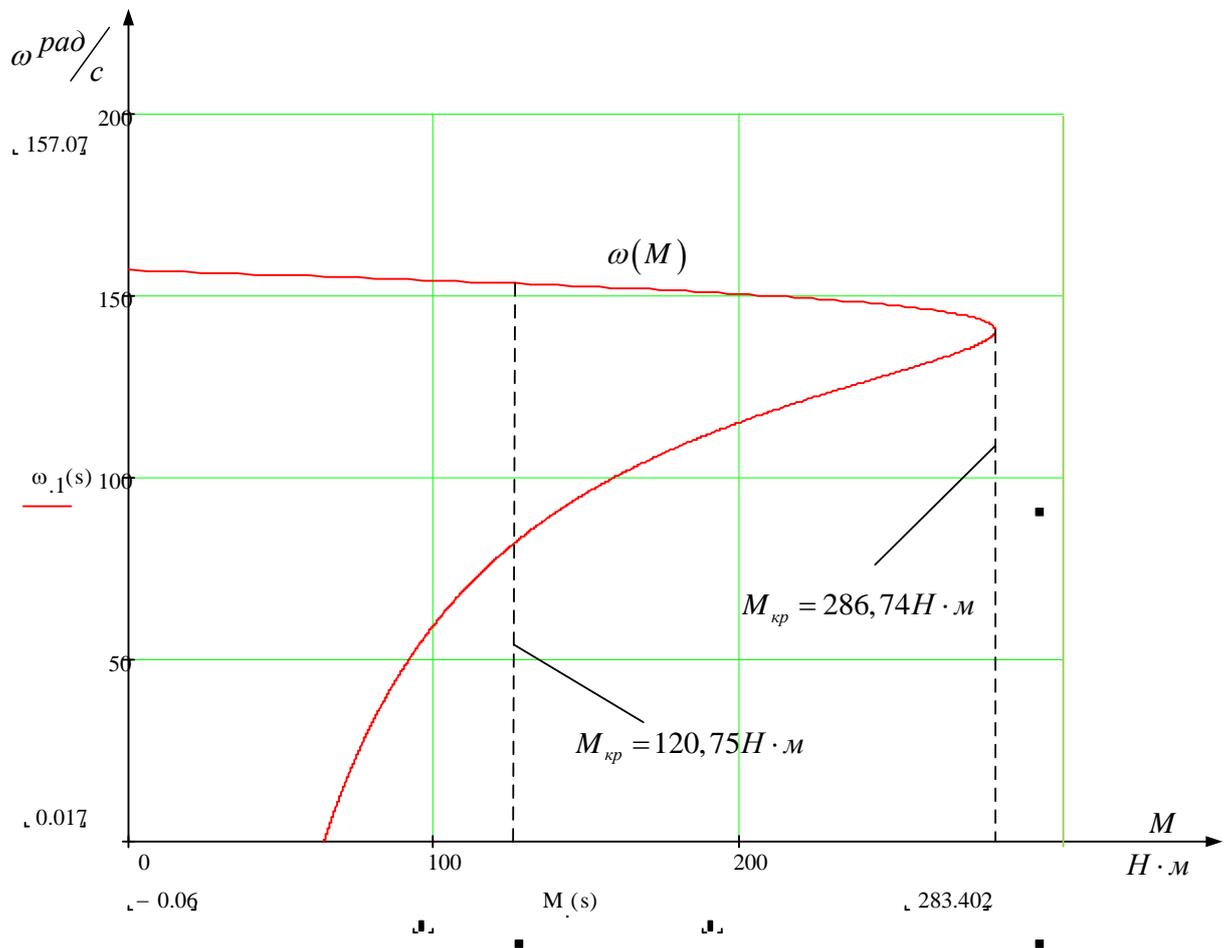


Рисунок 4 – Естественная механическая характеристика двигателя

По результатам расчета механической характеристики найдены значения электромагнитных моментов двигателя: номинального $M_{эмH} = 120,75 \text{ Н} \cdot \text{м}$; критического $M_{эмк} = 286,74 \text{ Н} \cdot \text{м}$ при угловой скорости $\omega_k = 140,11 \text{ рад/с}$.

– кратность максимального (критического) момента

$$m_k = \frac{M_{эмк}}{M_{эмH}} = \frac{286,74}{120,75} = 2,37;$$

– критическое скольжение

$$s_k = \frac{\omega_0 - \omega_k}{\omega_0} = \frac{157,08 - 140,11}{157,08} = 0,108.$$

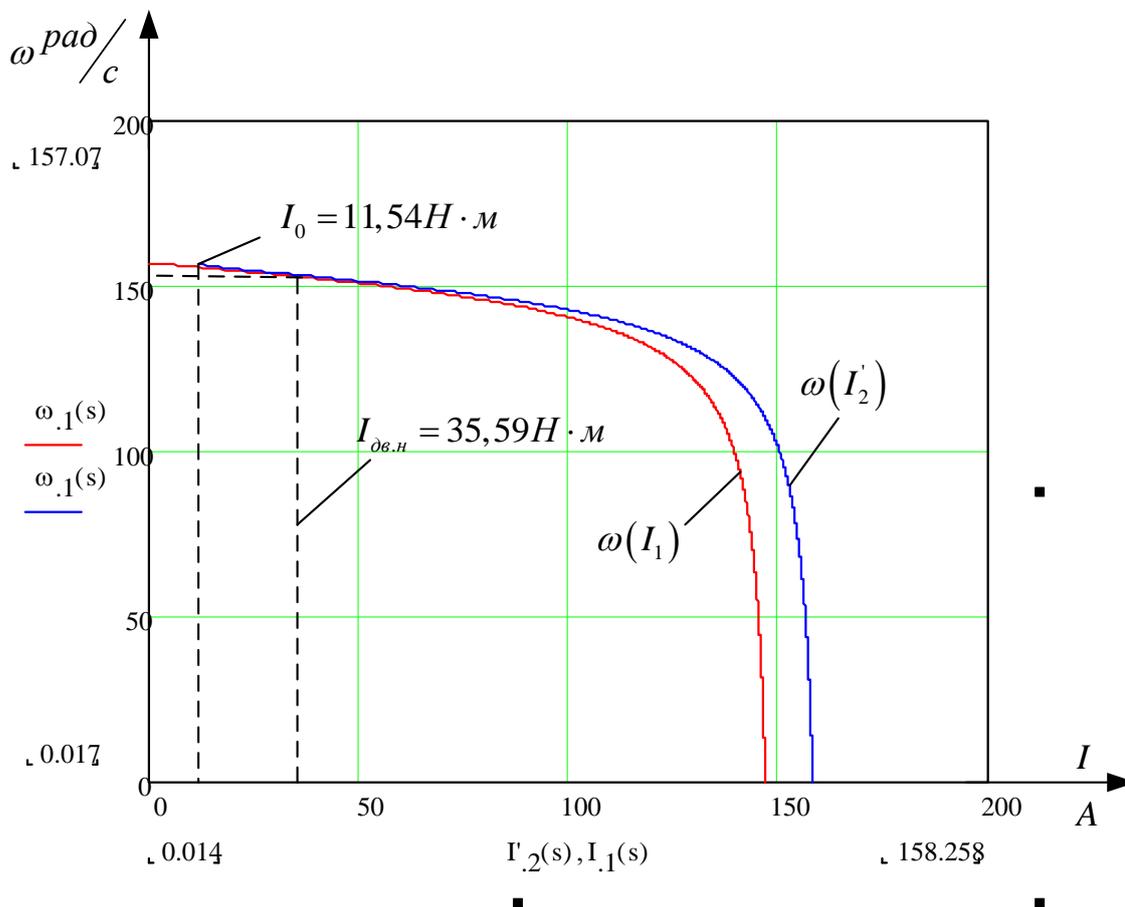


Рисунок 5 – Естественная электромеханическая характеристика двигателя

По результатам расчета электромеханической характеристики найдены значения тока холостого хода $I_0 = 11,54 A$, номинального тока $I_n = 35,59 A$.

Параметры расчетных механической и электромеханической характеристик двигателя оказались близки к приведённым в таблице 1 справочным параметрам двигателя.

2.4 Определение области допустимой длительной работы двигателя

Асинхронный двигатель питается и управляется от преобразователя частоты. При регулировании скорости будет использоваться способ векторного управления, что определяет поддержание постоянного потокосцепления двигателя при регулировании скорости ниже номинальной. В соответствии с этим был выбран

двигатель с независимой вентиляцией, что позволяет ему работать с нагрузками близкими к номинальным при низких скоростях работы электродвигателя.

Таким образом, перед выбором частотного преобразователя необходимо определить зону безопасной работы электродвигателя и задаться максимальными нагрузками.

В соответствии с техническими данными, предоставляемыми производителем, границы режима допустимой длительной работы двигателя при независимой вентиляции, можно представить в виде зависимостей:

– для тока двигателя

$$I_{\text{дв длит доп}}(\omega) = \begin{cases} I_{\text{дв н}} = 35,59 \text{ А, при } \omega \geq 0,5 \cdot \omega_{\text{н}} \\ 0,8 \cdot I_{\text{дв н}} = 0,8 \cdot 35,59 = 28,47 \text{ А, при } \omega = 0; \end{cases}$$

– для момента (электромагнитного) двигателя

$$M_{\text{эм длит доп}}(\omega) = \begin{cases} M_{\text{эм н}} = 120,75 \text{ Н} \cdot \text{м, при } \omega \geq 0,5 \cdot \omega_{\text{н}} \\ 0,8 \cdot M_{\text{эм н}} = 0,8 \cdot 120,75 = 96,6 \text{ Н} \cdot \text{м, при } \omega = 0. \end{cases}$$

В соответствии с приведенными зависимостями на механическую и электромеханическую характеристики наносим границы зон $M_{\text{эм длит доп}}(\omega)$ и $I_{\text{дв длит доп}}(\omega)$ длительной допустимой работы двигателя. Графики зависимостей приведены на рисунках 6 и 7.

Из приведённых на рисунках характеристик следует, что длительно допустимый момент нагрузки, с которым может работать двигатель на минимальной скорости $\omega_{\text{дв мин}} = 6,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ (диапазон регулирования скорости $1 \div 10$), составляет $M_{\text{эм длит доп}} = 98 \text{ Н} \cdot \text{м}$ при длительно допустимом токе статора $I_{\text{дв длит доп}} = 29 \text{ А}$.

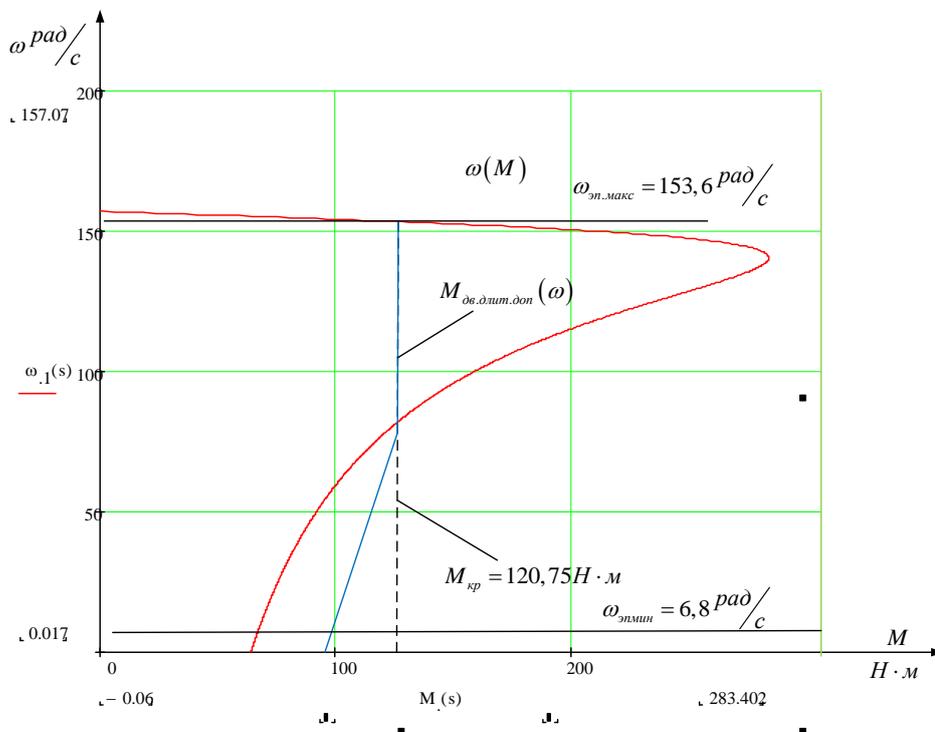


Рисунок 6 – Естественная механическая характеристика и граница области допустимой длительной работы $M_{\text{ЭМ ДЛИТ ДОП}}(\omega)$ двигателя

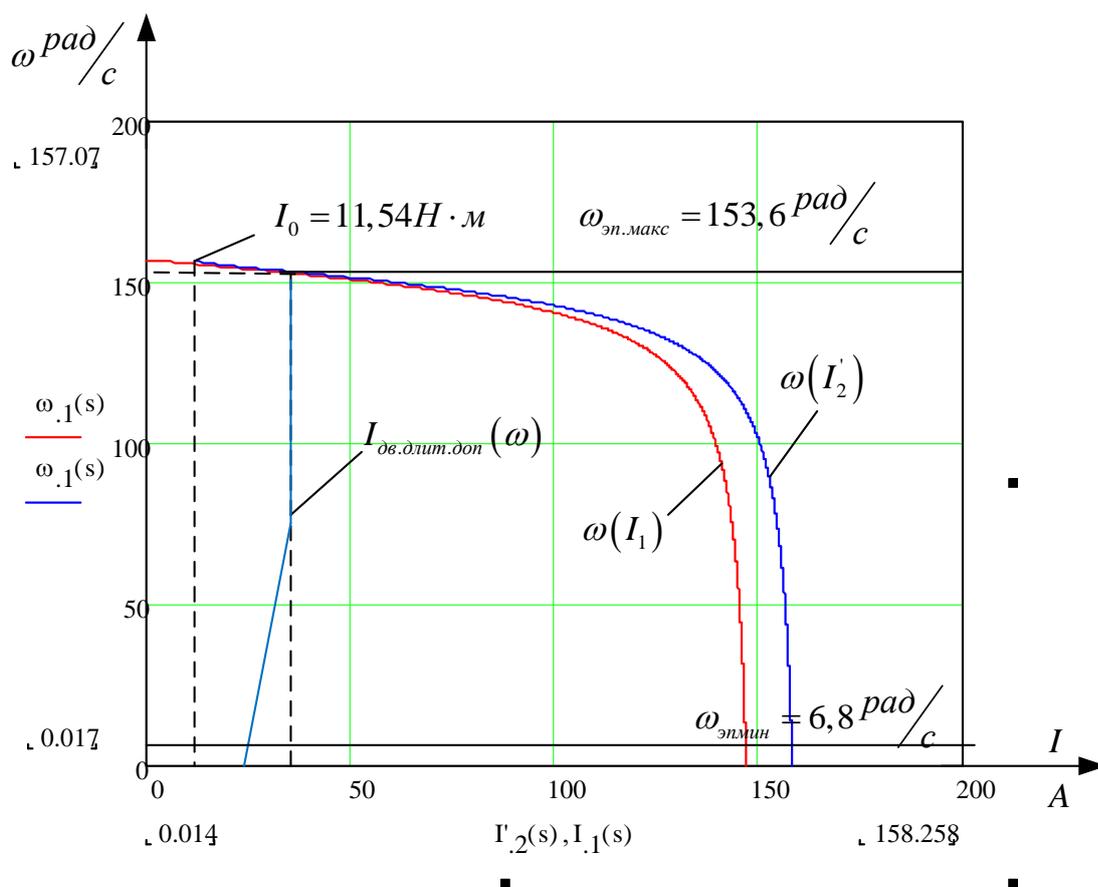


Рисунок 7 – Естественная электромеханическая характеристика и граница области допустимой длительной работы $I_{\text{ДВ ДЛИТ ДОП}}(\omega)$ двигателя

2.5 Построение требуемых областей длительной и кратковременной работы двигателя

2.5.1 Построение областей работы в плоскости механических характеристиках двигателя

Статический момент, приложенный к валу двигателя

$$M_c = 55 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

Максимальный требуемый момент электропривода в пусковом режиме.

$$M_{\text{эл. макс}} = 137 \text{ Н} \cdot \text{м} .$$

Найденные значения моментов нанесены на плоскость механических характеристик электродвигателя (рисунок 8).

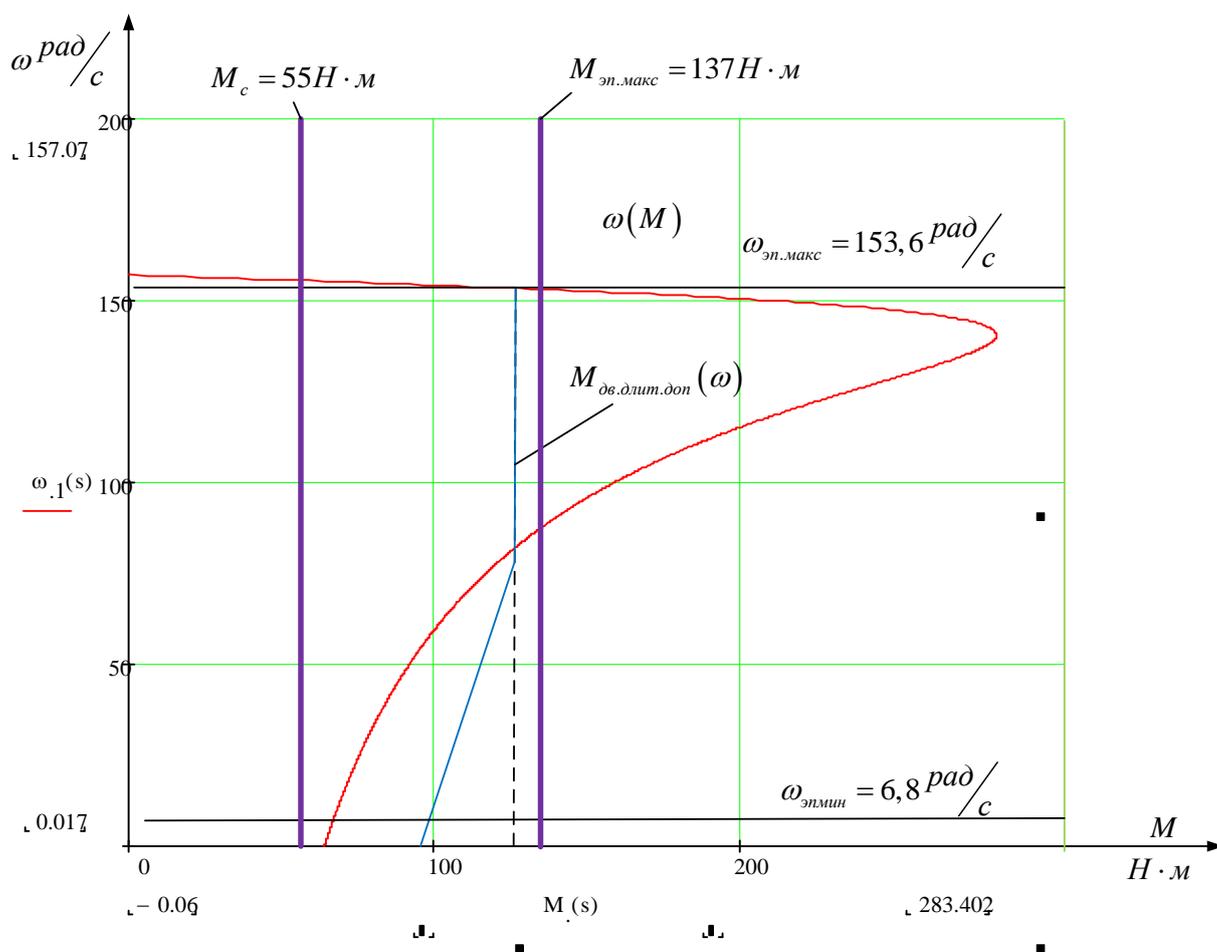


Рисунок 8 – Области работы электропривода в плоскости механических характеристик двигателя

2.5.2 Построение областей работы электропривода в плоскости электромеханических характеристик двигателя

Используя полученные значения моментов, определим соответствующие им значения токов двигателя. Для этого, с помощью процедуры Given в приложении MathCAD, решая уравнение механической характеристики двигателя $M(s)$ при заданном значении момента, определяем соответствующее ему скольжение s . Подставляя полученное значение скольжения в уравнение электромеханической характеристики двигателя $I(s)$, определяем значение тока обмотки статора, соответствующее исходному значению момента.

Например, решая уравнение

$$\frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R_2'(s)}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(X_{1\sigma}(s) + X_{2\sigma}'(s))^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'(s)}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'(s)}{s \cdot X_{\mu H}} \right)^2 \right]} = M_c ,$$

при значении $M_c = 55 \text{ Н} \cdot \text{м}$ находим значение скольжения $s = 0,0095$ и по выражению

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2(s) + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0(s) \cdot I_2'(s) \cdot \sin \varphi_2(s)} ,$$

где

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'(s)}{s} \right)^2 + [X_{1\sigma}(s) + X_{2\sigma}'(s)]^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'(s)}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2}} ;$$

$$I_0(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma}(s) + X_{\mu})^2}} ;$$

$$\sin \varphi_2(s) = \frac{X_{1\sigma}(s) + X_{2\sigma}'(s)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'(s)}{s} \right)^2 + [X_{1\sigma}(s) + X_{2\sigma}'(s)]^2}}$$

значение тока статора $I_{c \text{ макс}} = 18,7 \text{ A}$.

Поступая аналогично, находим:

– для момента $M_{\text{эл макс}} = 137 \text{ Н} \cdot \text{м}$ – $I_{\text{эл макс}} = 38,9 \text{ A}$;

Найденные значения моментов нанесены на плоскость электромеханических характеристик электродвигателя (рисунок 10).

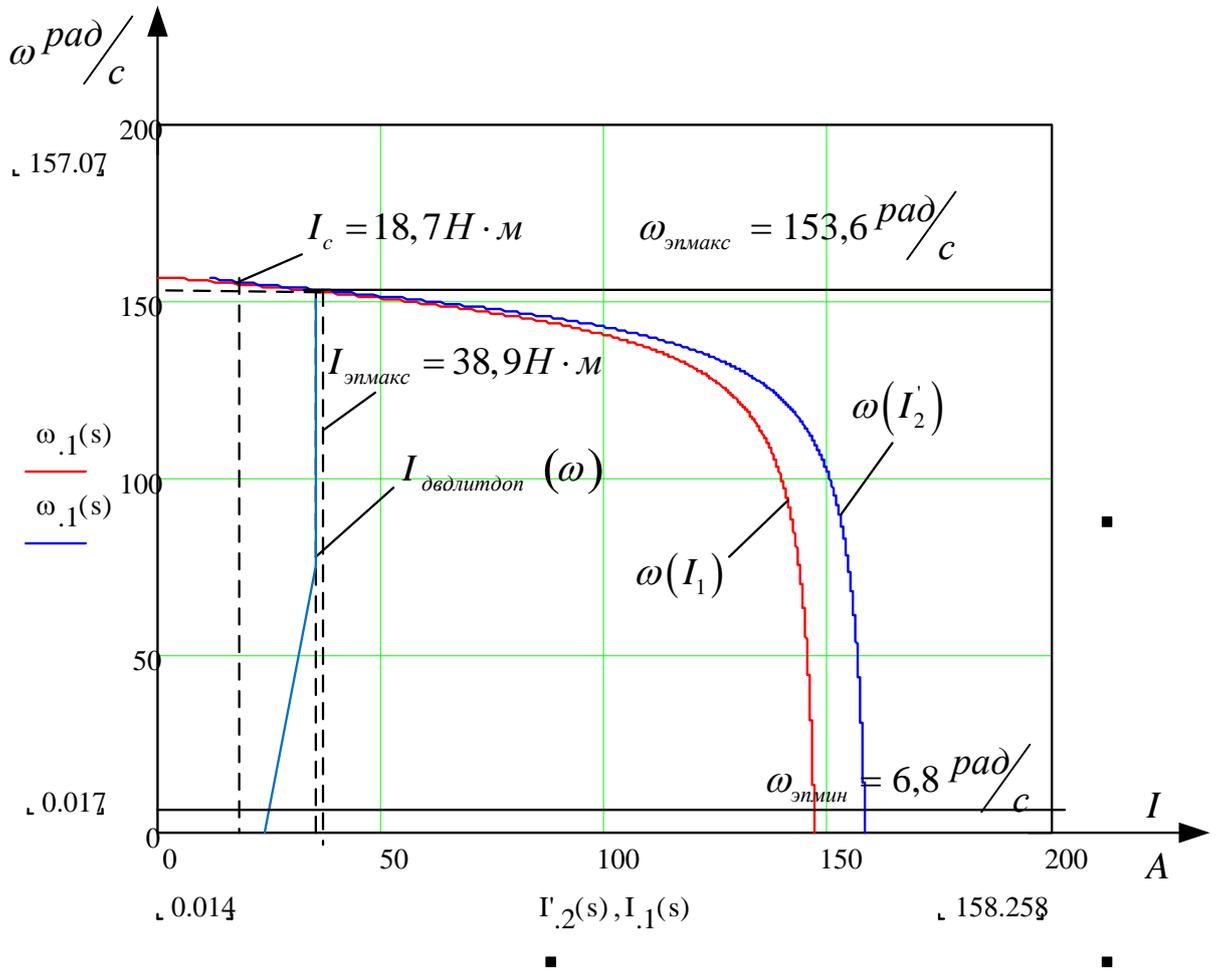


Рисунок 9 – Области работы электропривода в плоскости электромеханических характеристик двигателя

2.6 Выбор преобразователя частоты

Основные способы управления асинхронным частотно-регулируемым электроприводом и их показатели приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Способы управления в системе ПЧ-АД и их показатели

Способ управления	Диапазон регулирования скорости
<p>Скалярное управление, закон управления $U_1 / f_1 = const :$</p> <ul style="list-style-type: none"> - разомкнутая система, в том числе с коррекцией вольт-частотной характеристики; - замкнутая система с обратной связью по току статора и компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении обмоток статора (IR-компенсация или компенсация нагрузки); - замкнутая система с обратной связью по току статора и компенсацией падения напряжения на активном сопротивлении обмоток статора и повышением жесткости статических характеристик (IR-компенсация и компенсация скольжения); - замкнутая система с обратной связью по скорости; 	<p>менее 10</p> <p>10</p> <p>более 10</p> <p>до 120</p>
<p>Векторное управление:</p> <ul style="list-style-type: none"> - без датчика скорости (с внутренней моделью) - с датчиком скорости 	<p>100–120</p> <p>1000</p>

Принимаем способ управления – векторное управление без датчика скорости, диапазон регулирования 20. Согласно выбранному способу управления выбираем преобразователь с возможностью векторного управления.

Тип преобразователя частоты в общем случае выбирается из следующих условий: длительный ток нагрузки, ток кратковременной перегрузки, напряжение питающей сети и двигателя, диапазон регулирования выходной частоты, способы и законы частотного управления, набор комплектующих устройств (дополнительных блоков, расширяющих возможности привода), условия эксплуатации.

Сложность выбора преобразователя частоты для совместной работы с электродвигателем заключается в том, что номинальные режимы работы электродвигателей ($S1 - S8$), основанные на постоянной времени нагрева двигателя (десятками минут), не приемлемы для преобразователей, постоянная времени нагрева которых определяется десятками секунд.

Преобразователи частоты спроектированы для продолжительной работы с номинальным током инвертора $I_{ин}$. Если номинальный ток протекает длительное время (более 60 с), то рабочая температура блока достигает максимально допустимого значения. Выше этого значения срабатывает защита ($I^2 \cdot t$), что не позволяет перегружать преобразователь по току даже кратковременно (рисунок 10).

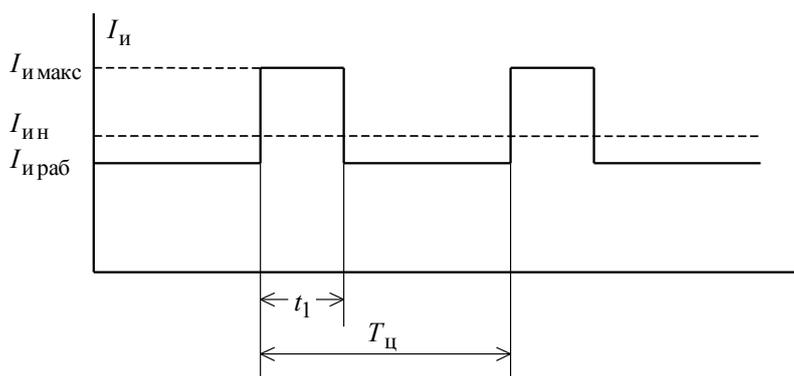


Рисунок 10

По этой причине преобразователи частоты в системах электропривода, имеющих кратковременные перегрузки двигателя, связанные с периодическими

изменениями скорости или технологическими изменениями момента нагрузки, должны работать с эквивалентным за цикл работы током, не превышающим номинальный ток инвертора

$$I_{ин} \geq I_{иэ}.$$

Предварительно преобразователь частоты выбираем исходя из следующих условий.

Питающая сеть: 3-х фазная 380В, 50Гц;

Параметры нагрузки:

- 3-х фазная;
- максимальное выходное линейное напряжение 380В;
- максимальная частота

$$f_{\max} > 50 \cdot \frac{\omega_{\text{эп макс}}}{\omega_0 \cdot (1 - s_k)}, \text{ Гц.}$$

- номинальный ток инвертора должен удовлетворять условию

$$I_{ин} > I_{с макс} = 18,7 \text{ А};$$

- максимальный ток инвертора должен удовлетворять условию

$$I_{и макс} > I_{\text{эп макс}} = 38,9 \text{ А}.$$

Условия выбора преобразователя по току должны быть выполнены с учетом фактических значений высоты над уровнем моря и температуры окружающей среды места установки преобразователя. Длительность перегрузки двигателя не должна превышать значение допустимого времени протекания максимального тока инвертора, а длительность фактического рабочего цикла электропривода не должна быть меньше времени предельного цикла инвертора;

Параметры преобразователя частоты

Параметры выбранного преобразователя частоты сведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры преобразователя частоты

Тип	Параметры питающей сети		Выходное напряжение U_H , В	Выходная частота f_H , Гц	Выходной ток		Рекомендуемая мощность P_2 , Вт
	$U_{LЛ}$, В	f_c , Гц			$I_{VLT.H}$, А	$I_{VLT.макс}$, А	
VLT 5032 “Danfoss”	3×380	50	380	(0-132)	44	70,4	22

Принимаем несущую частоту инвертора $f_{ШИМ} = 6$ кГц.

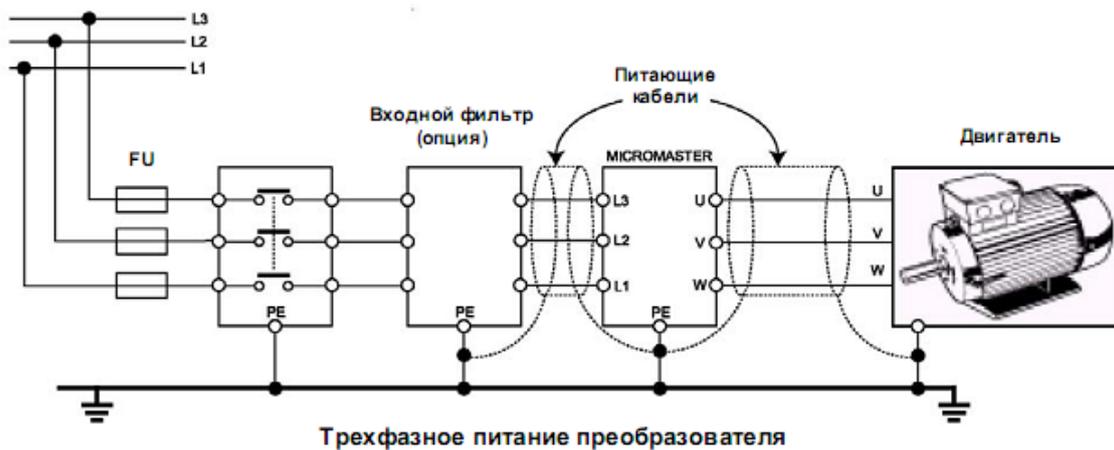


Рисунок 11 Подключение питающей сети и двигателя

Функциональная схема преобразователя представлена на рисунке 12.

2.7 Структурная схема силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель

Структурная схема силового канала системы ПЧ – АД во вращающейся двухфазной системе координат dq , ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора, и компенсацией внутренних обратных связей представлена на рисунке 13.

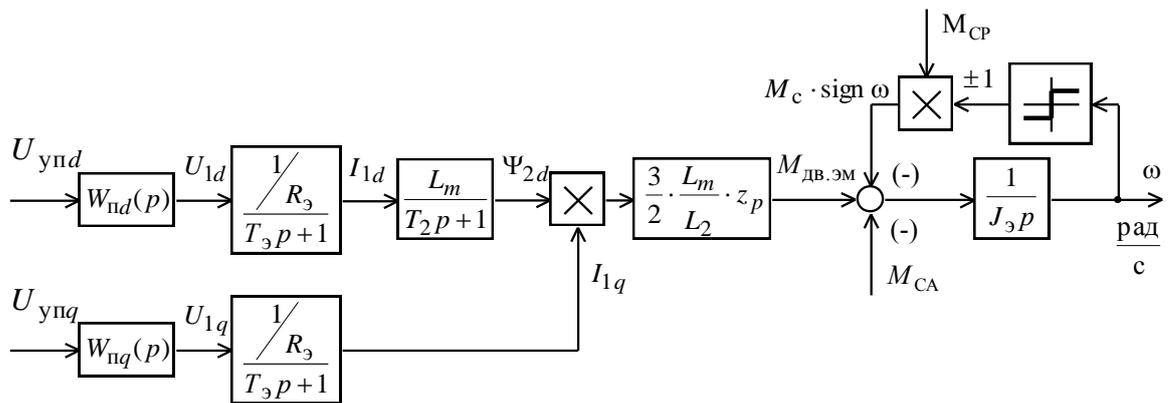


Рисунок 13 – Структурная схема силового канала системы преобразователь частоты – асинхронный электродвигатель во вращающейся двухфазной системе координат, ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора и компенсацией внутренних обратных связей

Управляющими сигналами на входе преобразователя структурной схемы силового канала являются напряжения постоянного тока. Выходные напряжения преобразователя представляют собой составляющие напряжения статора U_{1d} и U_{1q} в ортогональной системе координат d, q , ориентированной по результирующему вектору потокосцепления ротора Ψ_{2d} .

В системе ПЧ – АД предполагается применить частотное векторное управление с обратной связью по скорости (с датчиком или без датчика). Характерной особенностью частотно-регулируемых электроприводов переменного тока является относительно большая инерционность в цепях обратных связей контуров регулирования тока, потокосцепления и скорости. Структурная схема

силового канала асинхронного частотно-регулируемого электропривода с векторным управлением приведена на рисунке 14.

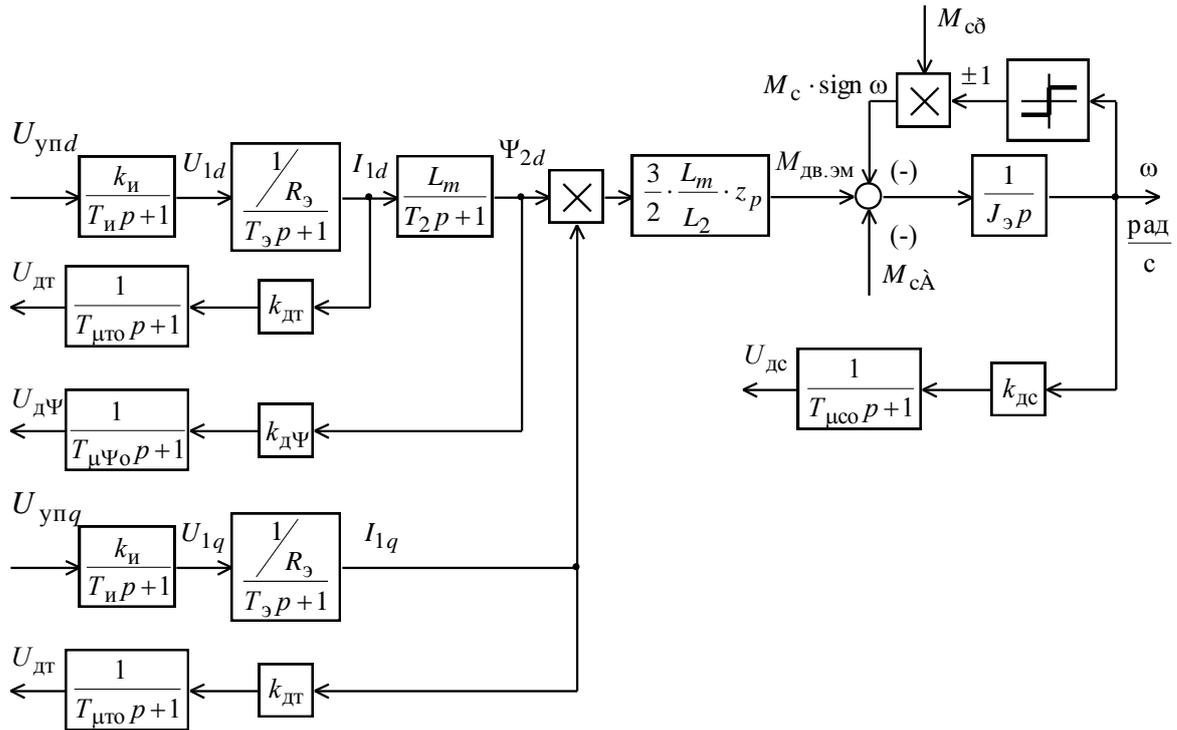


Рисунок 14 – Структурная схема силового канала электропривода подъёмника

2.7.1 Расчет параметров элементов структурной схемы силового канала электропривода

Расчёт параметров преобразователя

Максимальный коэффициент усиления преобразователя

$$k_{и} = \frac{\sqrt{2} \cdot U_{1фн}}{U_{уп макс}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 220}{10} = 31,11,$$

где $U_{уп макс} = 10$ В – принятое максимальное значение напряжения управления.

Эквивалентная постоянная времени преобразователя

$$T_{и} = \frac{0,5}{f_{шим}} = \frac{0,5}{6 \cdot 10^3} = 0,0833 \cdot 10^{-3} \text{ с},$$

где $f_{шим} = 6$ кГц – несущая частота инвертора.

Расчет параметров двигателя

Эквивалентная индуктивность обмотки статора

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 1,96 \cdot 10^{-3} + 56,65 \cdot 10^{-3} = 58,61 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Эквивалентная индуктивность обмотки ротора

$$L_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 2,64 \cdot 10^{-3} + 56,65 \cdot 10^{-3} = 59,29 \cdot 10^{-3} \text{ Гн.}$$

Эквивалентное сопротивление силовой цепи преобразователь-двигатель

$$R_3 = R_1 + R_2' \cdot \frac{L_m^2}{L_2^2} = 0,158 + 0,155 \cdot \frac{(56,65 \cdot 10^{-3})^2}{(59,29 \cdot 10^{-3})^2} = 0,3 \text{ Ом.}$$

Эквивалентная электромагнитная постоянная времени силовой цепи

$$T_3 = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_3} = \frac{0,0765 \cdot 58,61 \cdot 10^{-3}}{0,3} = 14,9 \cdot 10^{-3} \text{ с,}$$

где

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L_2} = 1 - \frac{(56,65 \cdot 10^{-3})^2}{58,61 \cdot 10^{-3} \cdot 59,29 \cdot 10^{-3}} = 0,0765$$

– коэффициент рассеяния.

Электромагнитная постоянная времени цепи ротора

$$T_2 = \frac{L_2}{R_2'} = \frac{59,29 \cdot 10^{-3}}{0,155} = 0,383 \text{ с.}$$

2.7.2 Расчет параметров механической системы

Момент инерции механизма

$$J_M = 0,5 \cdot J_{\text{ДВ}} = 0,5 \cdot 0,13 = 0,065 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

Эквивалентный момент инерции привода

$$J_{\text{Э}} = J_{\text{ДВ}} + J_M = 0,13 + 0,065 = 0,195 \text{ кг} \cdot \text{м}^2 .$$

3 СИНТЕЗ И АНАЛИЗ ЛИНЕРИЗИРОВАННОЙ САУ

3.1 Структурная схема линеаризованной САУ РЭП

Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ частотно - регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением приведена на рисунке 15 [2].

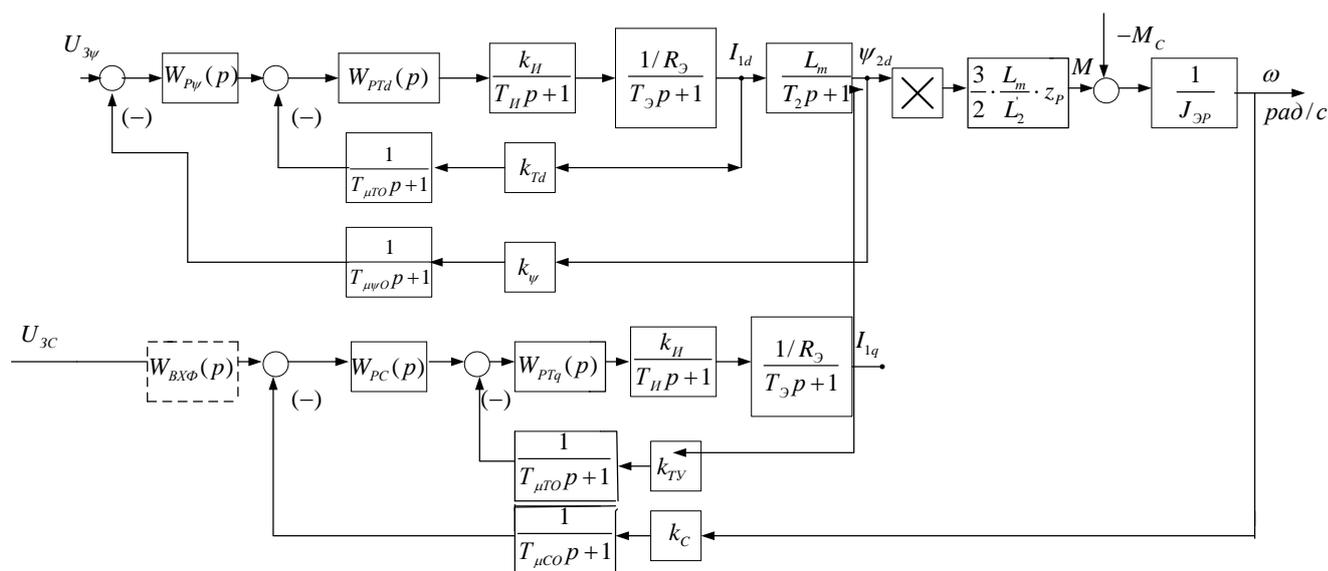


Рисунок 15 – Структурная схема линеаризованной непрерывной САУ РЭП частотно–регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением

На схеме приняты следующие обозначения:

$W(p)_{PT}, W(p)_{P\psi}, W(p)_{PC}$ - передаточные функции регуляторов тока, потокосцепления и скорости соответственно;

Имеем $U_{3TМАКС} = 10$ В.

Коэффициент обратной связи по току

$$k_T = \frac{U_{3TМАКС}}{I_{1YМАКС}} = \frac{10}{52,4} = 0,19 \text{ В/А.}$$

Максимально допустимое значение тока

$$I_{1YМАКС} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{ЭПМАКС}^2 - I_0^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{38,9^2 - 11,954^2} = 52,4 \text{ А}$$

Период сглаживания результатов измерения тока

$$T_{CT} = \frac{1}{f_{ШИМ}} \cdot n_T = \frac{1}{6 \cdot 10^3} \cdot 6 = 0,001 \text{ с},$$

где $n_T = 8$ количество измерений.

Малая постоянная времени цепи обратной связи по току

$$T_{\mu T0} = \frac{T_{CT}}{3} = \frac{0,001}{3} = 0,000333 \text{ с}.$$

Имеем $U_{3\psi\text{МАКС}} = 10 \text{ В}$.

Значение номинального потокосцепления двигателя

$$\psi_{2XH} = \psi_H = \frac{M_{ЭИН}}{\frac{3}{2} \cdot Z_P \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{IH}^2 \cdot I_0^2}} = \frac{120,75}{\frac{3}{2} \cdot 2 \cdot \frac{0,05665}{0,05929} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{35,59^2 - 11,543^2}} = 0,885 \text{ Вб}.$$

Коэффициент обратной связи по потокосцеплению ротора

$$k_\psi = \frac{U_{3\psi\text{МАКС}}}{\psi_{2XH}} = \frac{10}{0,885} = 11,3 \text{ В/Вб}.$$

Период расчета потокосцепления:

имеем $n_\psi \geq 3$;

$$T_{C\psi} = \left(16 \cdot \frac{1}{f_{ШИМ}} \right) \cdot n_\psi = \left(16 \cdot \frac{1}{8 \cdot 10^3} \right) \cdot 3 = 0,006 \text{ с};$$

Малая постоянная времени цепи обратной связи по потокосцеплению

$$T_{\mu\psi0} = \frac{T_{C\psi}}{3} = \frac{0,006}{3} = 0,002 \text{ с}.$$

Имеем $U_{3СМАКС} = 10 \text{ В}$; $f_{ШИМ} = 8 \text{ кГц}$.

Коэффициент обратной связи по скорости

$$k_c = \frac{U_{3СМАКС}}{\omega_{ЭПМАКС}} = \frac{10}{153,6} = 0,065 \text{ В} \cdot \text{с/рад}.$$

Период расчета скорости:

Имеем $n_c \geq 3$;

$$T_{CC} = \left(16 \cdot \frac{1}{f_{ШИМ}} \right) \cdot n_c = \left(16 \cdot \frac{1}{8 \cdot 10^3} \right) \cdot 3 = 0,006 \text{ с}.$$

Малая постоянная времени цепи обратной связи по скорости

$$T_{\mu c0} = \frac{T_{CC}}{3} = \frac{0,006}{3} = 0,002 \text{ с}.$$

3.2 Оптимизация контура тока

Контур регулирования тока имеет относительно большую инерционность в цепи обратной связи [2].

Структурная схема контура тока с инерционной обратной связью и полной компенсацией внутренней отрицательной обратной связи по ЭДС двигателя приведена на рисунке 16 контуры токов I_{1x} и I_{1y} идентичные.

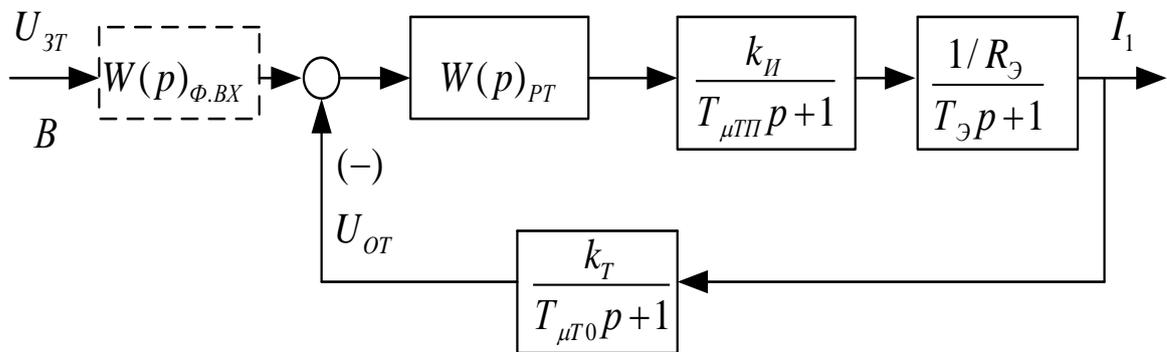


Рисунок 16 – Структурная схема контура тока

На схеме рисунке 16 приняты следующие обозначения:

U_{3T} – напряжение задания на ток, В;

$T_{\mu\Pi\Pi}$ – малая постоянная времени в прямом канале, с;

$$T_{\mu\Pi\Pi} = T_{\text{И}} = 6,25 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

$T_{\mu\text{Т}0}$ – малая постоянная времени в цепи обратной связи, с.

Передаточная функция ПИ-регулятора тока

$$W_{\text{РТ}}(p) = k_{\text{РТ}} \cdot \frac{T_{\text{РТ}} \cdot p + 1}{T_{\text{РТ}} \cdot p} = 0,951 \cdot \frac{0,0149 \cdot p + 1}{0,0149 \cdot p}.$$

Коэффициент усиления регулятора тока

$$k_{\text{РТ}} = \frac{T_{\text{э}} \cdot R_{\text{э}}}{k_{\text{И}} \cdot k_{\text{Т}} \cdot a_{\text{Т}} \cdot (T_{\mu\Pi\Pi} + T_{\mu\text{Т}0})} = \frac{0,0149 \cdot 0,3}{31,113 \cdot 0,19 \cdot 2 \cdot (0,0000625 + 0,000333)} = 0,951, \text{ где}$$

$$k_T = \frac{U_{3T\text{МАКС}}}{I_{1Y\text{МАКС}}} = \frac{10}{52,4} = 0,19 \text{ В/А};$$

$$U_{3T\text{МАКС}} = 10 \text{ В};$$

$a_T = 2$ – коэффициент оптимизации.

Постоянная времени регулятора тока

$$T_{PT} = T_{\Sigma} = 0,0149 \text{ с};$$

Контур тока имеет следующие передаточные функции:

- разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{РАЗ.Т}} = \frac{1}{a_T \cdot T_{\mu\text{ТП}} \cdot T_{\mu\text{ТО}} \cdot T_{\mu\text{ТЭ}} \cdot p^3 + a_T \cdot T_{\mu\text{ТЭ}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{ТЭ}} \cdot p} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 0,0000625 \cdot 0,000333 \cdot 0,000396 \cdot p^3 + 2 \cdot 0,000396^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,000396 \cdot p};$$

- замкнутого контура

$$W(p)_{\text{ЗАМ.Т}} = \frac{\frac{1}{k_T} \cdot (T_{\mu\text{ТО}} \cdot p + 1)}{a_T \cdot T_{\mu\text{ТП}} \cdot T_{\mu\text{ТО}} \cdot T_{\mu\text{ТЭ}} \cdot p^3 + a_T \cdot T_{\mu\text{ТЭ}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{ТЭ}} \cdot p + 1} \approx$$

$$\approx \frac{\frac{1}{k_T} \cdot (T_{\mu\text{ТО}} \cdot p + 1)}{a_T \cdot T_{\mu\text{ТЭ}}^2 \cdot p^2 + a_T \cdot T_{\mu\text{ТЭ}} \cdot p + 1} \approx \frac{\frac{1}{0,19} \cdot (0,000333 \cdot p + 1)}{2 \cdot 0,000396^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,000396 \cdot p + 1};$$

где $T_{\mu\text{ТЭ}} = T_{\mu\text{ТП}} + T_{\mu\text{ТО}} = 0,0000625 + 0,000333 = 0,000396 \text{ с}$ - эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

Настройка контура близка к настройке на модульный оптимум (МО) системы 2-го порядка. Контур является астатической системой 1-го порядка по управлению.

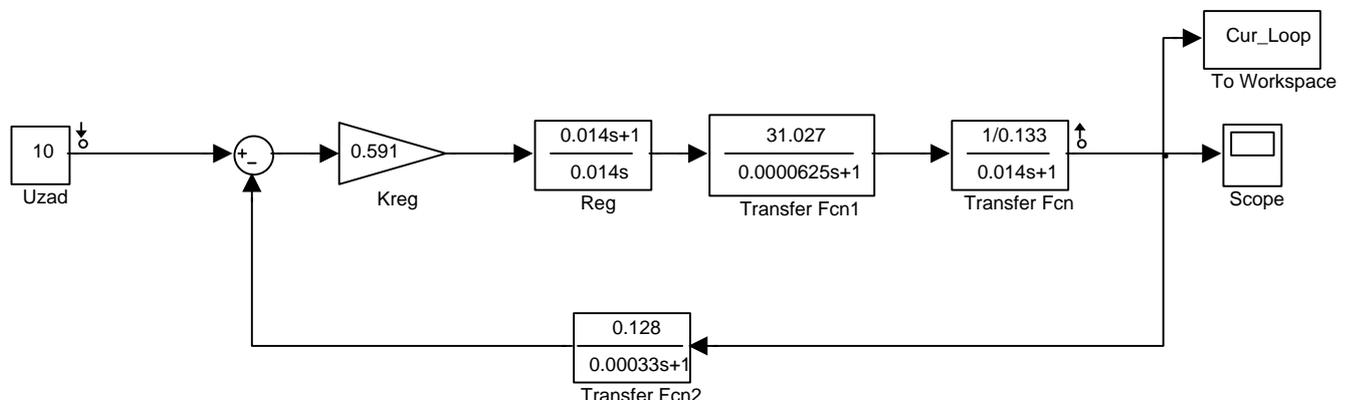


Рисунок 17 – Имитационная модель контура тока в среде Simulink (без фильтра на входе)

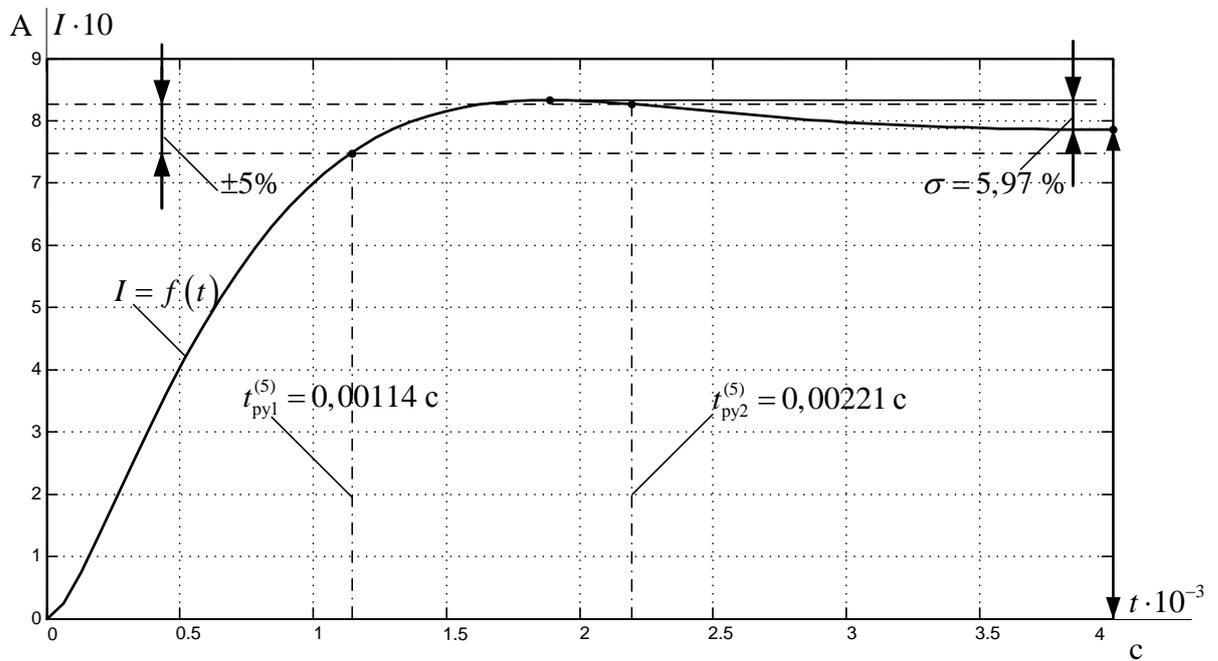


Рисунок 18– Переходная характеристика $i(t)$ контура тока

по имитационной модели рисунка 17

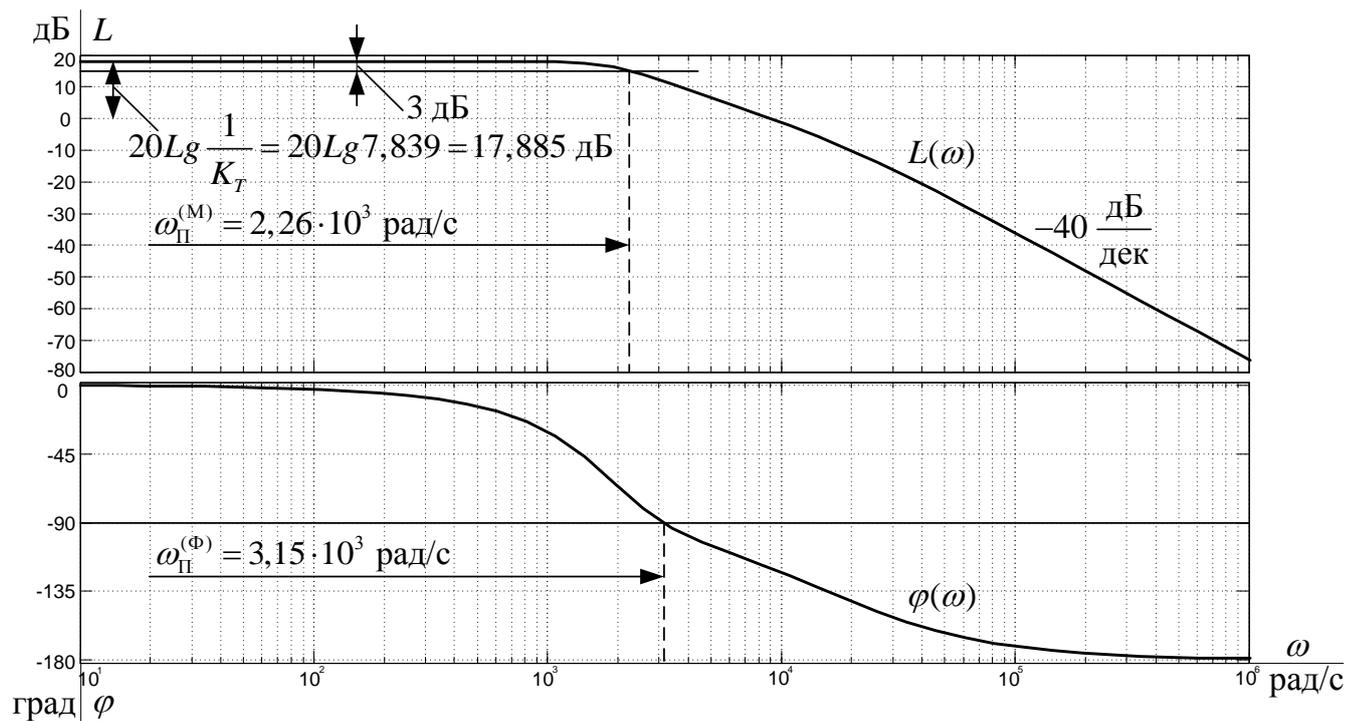


Рисунок 19 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура

тока, настроенного на МО (без фильтра на входе)

Разомкнутый контур тока

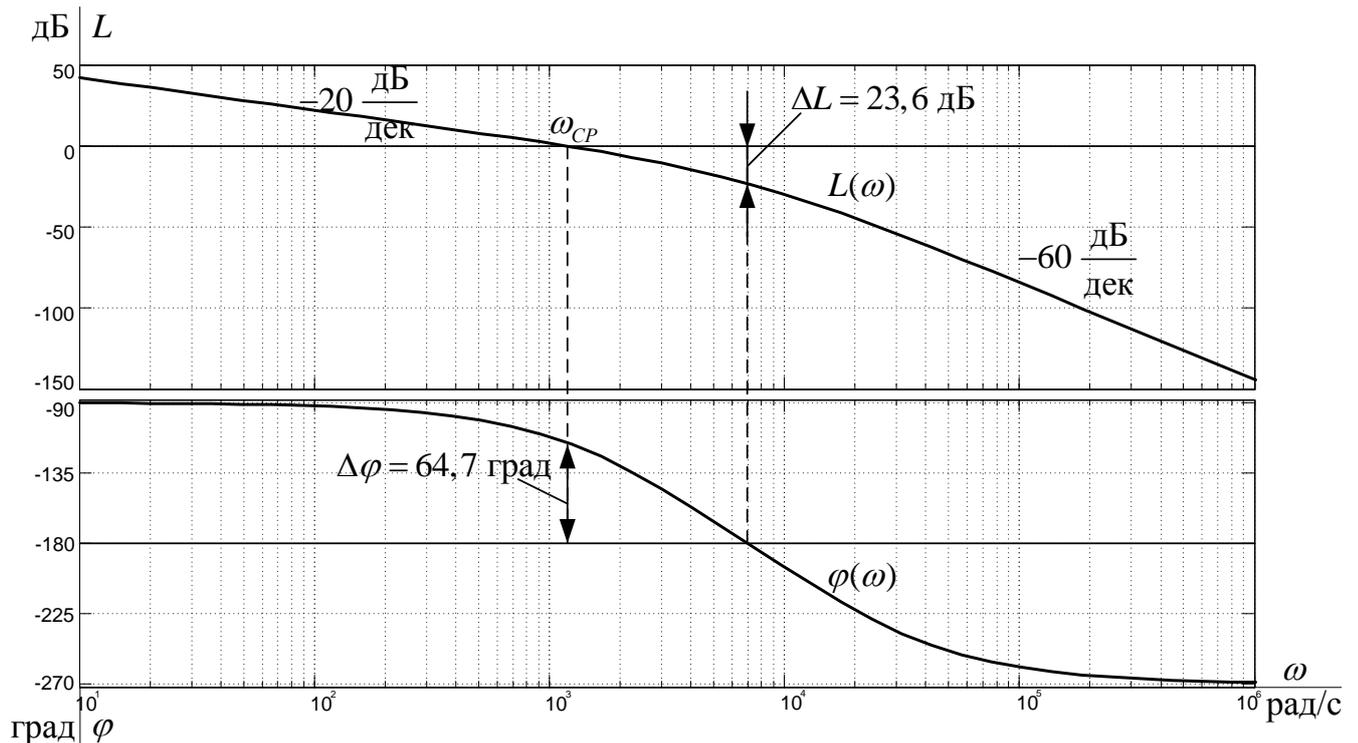


Рисунок 20 – Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура тока, настроенного на МО (без фильтра на входе)

При $T_{\mu TP} \ll T_{\mu TO} = (0,0000625 \ll 0,000333)$ ожидаемые показатели качества работы замкнутого контура тока по управлению без фильтра на входе:

- установившаяся ошибка $\Delta I_{уст} = 0$ А ;
- полоса пропускания по модулю $\omega_{\Pi}^{(M)} = \infty$;
- полоса пропускания по фазе

$$\omega_{\Pi}^{(\Phi)} \approx \frac{0.9}{T_{\mu TP} + T_{\mu TO}} \approx \frac{0.9}{0,0000625 + 0,000333} = 2273,68 \text{ рад/с ;}$$

- перерегулирование $\sigma \approx 6,7$ % ;
- время первого и окончательного вхождения в 5%-ю зону при обработке ступенчатого задания

$$t_{py1}^{(5)} \approx 2,75 \cdot (T_{\mu TP} + T_{\mu TO}) \approx 2,75 \cdot (0,0000625 + 0,000333) = 0,00109 \text{ с ;}$$

$$t_{py2}^{(5)} \approx 6 \cdot (T_{\mu TP} + T_{\mu TO}) \approx 6 \cdot (0,0000625 + 0,000333) = 0,002375 \text{ с .}$$

Таблица 5 – Показатели переходных процессов контура тока с ПИ – регулятором (без фильтра на входе)

Показатели переходных процессов			
По управлению			
$t_{py1}^{(5)}, c$	$t_{py2}^{(5)}, c$	$\sigma, \%$	$\Delta I_{уст}, A$
Ожидаемые показатели (без фильтра на входе)			
0,00109	0,002375	6,7	0
Результаты моделирования (без фильтра на входе)			
0,00114	0,00221	5,97	0

- запас устойчивости по модулю $\Delta L = 23,6$ дБ ;
- запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi = 64,7$ град.

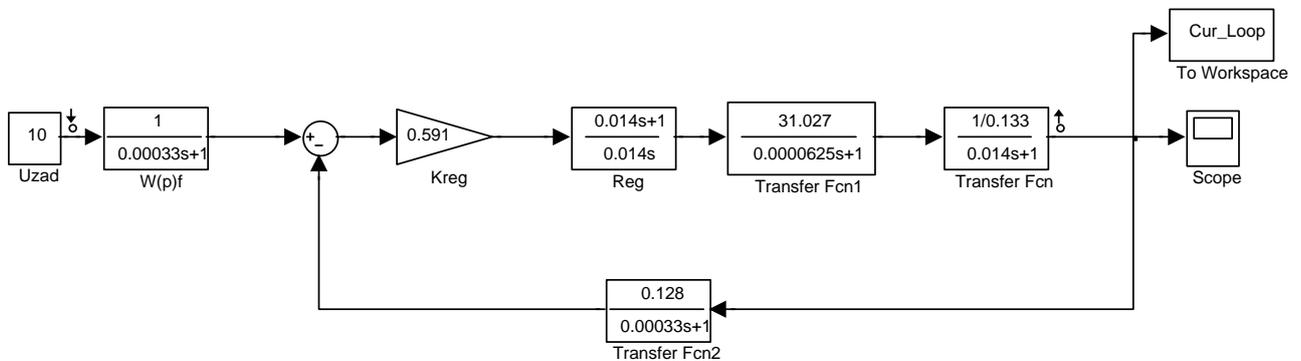


Рисунок 21 – Имитационная модель контура тока в среде Simulink (с фильтром на входе)

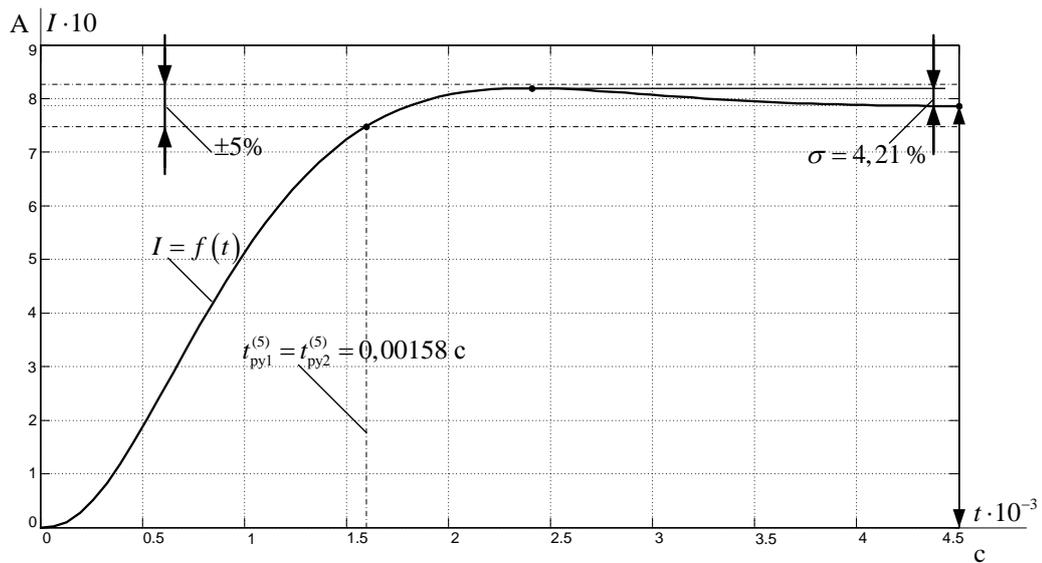


Рисунок 22 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура тока, настроенного на МО (с фильтром на входе)

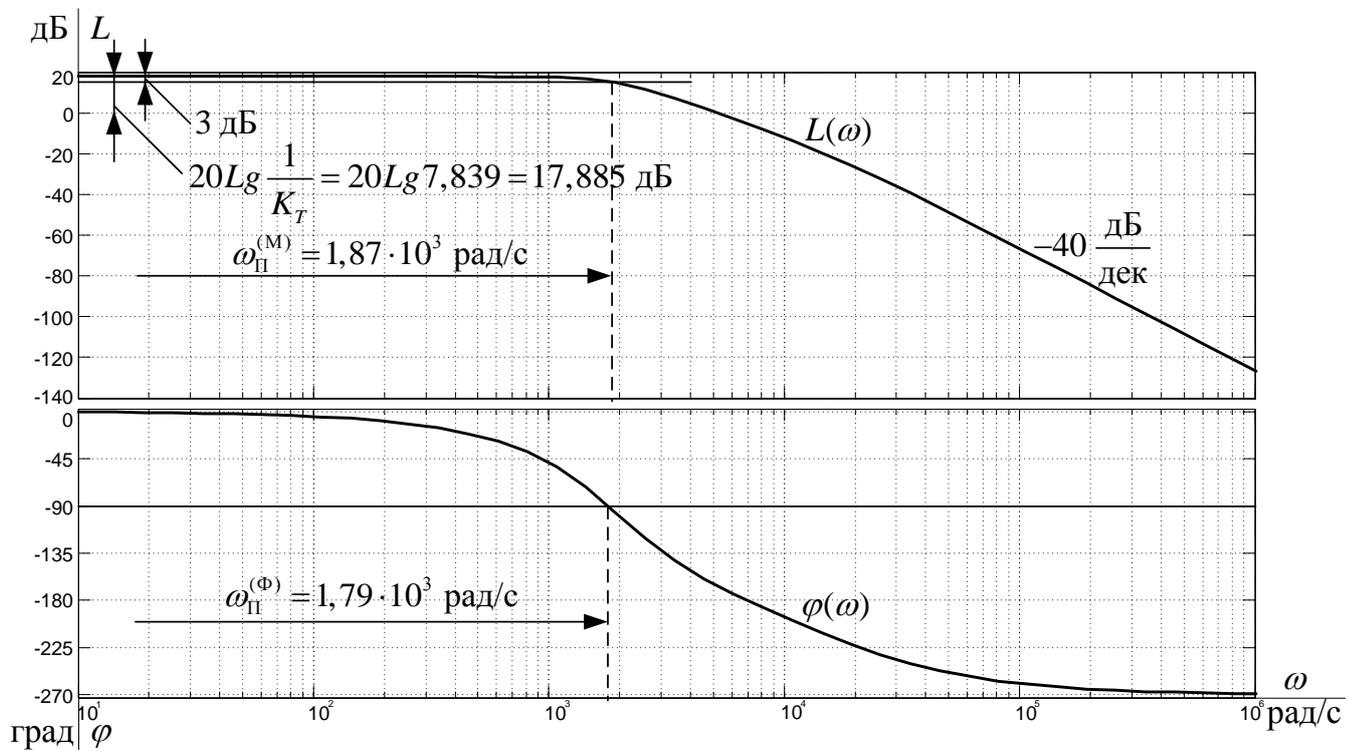


Рисунок 23 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура тока, настроенного на МО (с фильтром на входе)

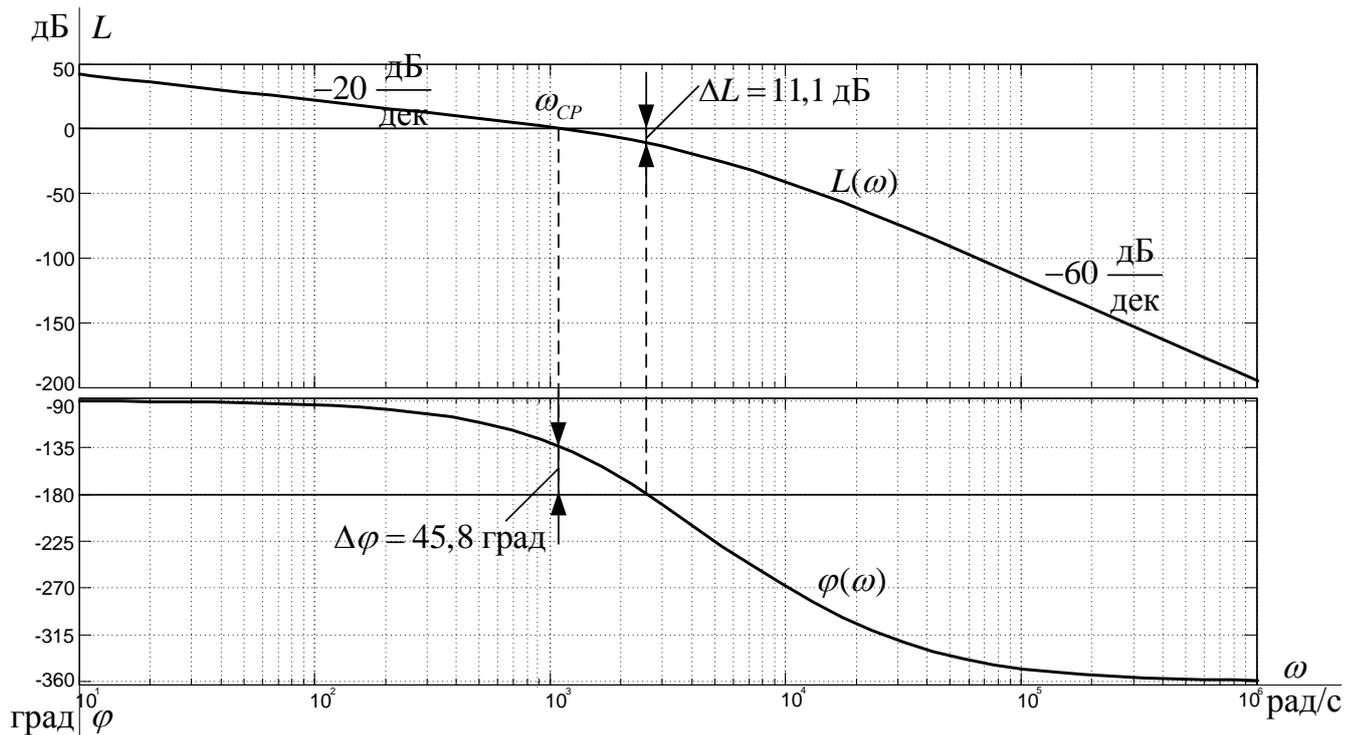


Рисунок 24 – Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура тока, настроенного на МО (без фильтра на входе)

При $T_{\mu\Pi\Pi} \ll T_{\mu\Pi O} = (0,0000625 \ll 0,000333)$ ожидаемые показатели качества работы замкнутого контура тока по управлению с фильтром на входе:

- установившаяся ошибка $\Delta I_{уст} = 0 \text{ А}$;
- перерегулирование $\sigma = 4,3 \%$;
- время первого и окончательного вхождения в 5%-ю зону при отработке ступенчатого задания

$$t_{py1}^{(5)} = t_{py1}^{(5)} \approx 4,1 \cdot (T_{\mu\Pi} + T_{\mu T0}) \approx 4,1 \cdot (0,0000625 + 0,000333) = 0,001623 \text{ с} ;$$

- полоса пропускания по модулю и фазе

$$\omega_{\Pi}^{(M)} \approx \omega_{\Pi}^{(\Phi)} \approx \frac{0,71}{T_{\mu\Pi} + T_{\mu T0}} \approx \frac{0,71}{0,0000625 + 0,000333} = 1793,68 \text{ рад/с} ;$$

- запас устойчивости по модулю $\Delta L = 11,1 \text{ дБ}$
- запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi = 45,8 \text{ град}$

Таблица 6 – Показатели переходных процессов контура тока с ПИ – регулятором (с фильтром на входе)

Показатели переходных процессов			
По управлению			
$t_{py1}^{(5)}, \text{ с}$	$t_{py2}^{(5)}, \text{ с}$	$\sigma, \%$	$\Delta I_{уст}, \text{ А}$
Ожидаемые показатели (с фильтром на входе)			
0,001623	0,001623	4,3	0
Результаты моделирования (с фильтром на входе)			
0,00158	0,00158	4,21	0

Вывод: в таблицах 6 и 7 сведены теоретические и экспериментальные показатели качества линеаризованного контура тока без фильтра и с фильтром на входе соответственно. Настройка контура близка к настройке на модульный оптимум (МО) системы 2-го порядка, вследствие этого полученные данные немного отличаются от ожидаемых показателей. Незначительная величина полученных отклонений позволяет нам сказать, что контур оптимизирован верно. Контур является астатической системой 1-го порядка по управлению.

При установке на вход контура тока фильтра уменьшаются запасы устойчивости по модулю и по фазе, также уменьшаются полосы пропускания по модулю и по фазе, уменьшается перерегулирование, быстродействие системы увеличивается. Качество переходных процессов в контуре тока с фильтром на входе лучше, чем без него (малое перерегулирование).

4.3 Оптимизация контура потокосцепления

Контур регулирования потокосцепления имеет относительно большую инерционность в цепи обратной связи [2].

При оптимизации контура потокосцепления внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{зам.т}} \approx \frac{1}{k_T} \approx \frac{1}{0,19} \approx \frac{5,3}{0,000792 \cdot p + 1},$$

где $T_T = a_T \cdot T_{\mu T \Delta} = a_T \cdot (T_{\mu T \Pi} + T_{\mu T 0}) = 2 \cdot (0,0000625 + 0,000333) = 0,000792$ с – эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

Структурная схема контура потокосцепления с инерционной обратной связью и ПИ – регулятором приведена на рисунке 25.

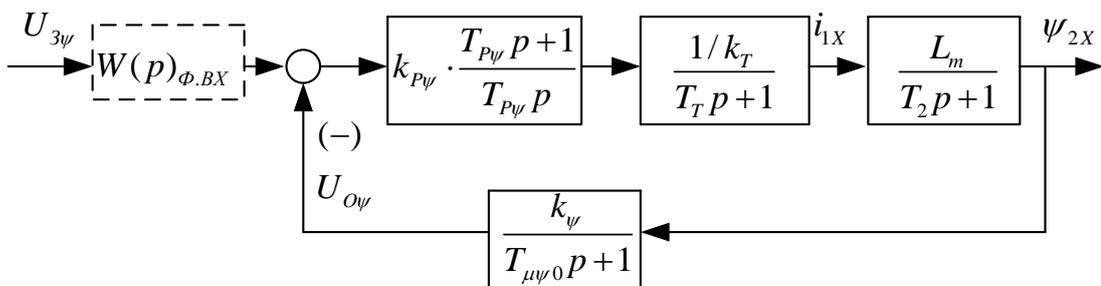


Рисунок 25 – Структурная схема контура потокосцепления с ПИ-регулятором

Передаточная функция ПИ-регулятора потокосцепления

$$W(p)_{P\psi} = k_{P\psi} \cdot \frac{T_{P\psi} \cdot p + 1}{T_{P\psi} \cdot p} = 48 \cdot \frac{0,888 \cdot p + 1}{0,888 \cdot p}.$$

Коэффициент усиления и постоянная времени регулятора потокосцепления определяются по выражениям

$$k_{P\psi} = \frac{T_2 \cdot k_T}{L_m \cdot k_\psi} \cdot \frac{1}{a_\psi \cdot (T_T + T_{\mu\psi 0})} = \frac{0,383 \cdot 0,19}{0,05665 \cdot 11,3} \cdot \frac{1}{2 \cdot (0,000792 + 0,002)} = 20,2,$$

где $k_\psi = \frac{U_{3\psi \text{МАКС}}}{\psi_{2XH}} = \frac{10}{0,885} = 11,3 \text{ В/Вб}$; $U_{3\psi \text{МАКС}} = 10 \text{ В}$;

$a_\psi = 2$ - коэффициент оптимизации.

Контур потокосцепления с ПИ – регулятором настроенный таким образом имеет следующие передаточные функции:

- разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{РАЗ.}\psi} = \frac{1}{a_\psi \cdot T_T \cdot T_{\mu\psi 0} \cdot T_{\mu\psi \Delta} \cdot p^3 + a_\psi \cdot T_{\mu\psi \Delta}^2 \cdot p^2 + a_\psi \cdot T_{\mu\psi \Delta} \cdot p} \approx \frac{1}{2 \cdot 0,000792 \cdot 0,002 \cdot 0,00279 \cdot p^3 + 2 \cdot 0,00279^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,00279 \cdot p};$$

- замкнутого контура

$$W(p)_{\text{ЗАМ.}\psi} = \frac{\frac{1}{k_\psi} \cdot (T_{\mu\psi 0} \cdot p + 1)}{a_\psi \cdot T_T \cdot T_{\mu\psi 0} \cdot T_{\mu\psi \Delta} \cdot p^3 + a_\psi \cdot T_{\mu\psi \Delta}^2 \cdot p^2 + a_\psi \cdot T_{\mu\psi \Delta} \cdot p + 1} \approx \frac{\frac{1}{k_\psi} \cdot (T_{\mu\psi 0} \cdot p + 1)}{a_\psi \cdot T_{\mu\psi \Delta}^2 \cdot p^2 + a_\psi \cdot T_{\mu\psi \Delta} \cdot p + 1} \approx \frac{\frac{1}{11,3} \cdot (0,002 \cdot p + 1)}{2 \cdot 0,00279^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 0,00279 \cdot p + 1};$$

где $T_{\mu\psi \Delta} = T_T + T_{\mu\psi 0} = 0,000792 + 0,002 = 0,00279 \text{ с}$ – эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

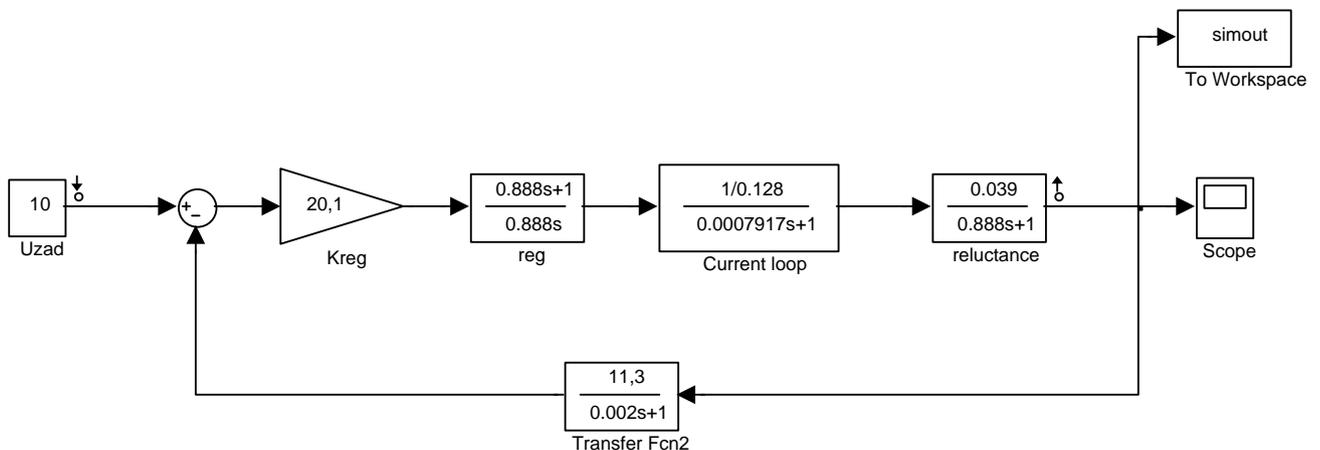


Рисунок 26 – Имитационная модель контура потокосцепления в среде Simulink

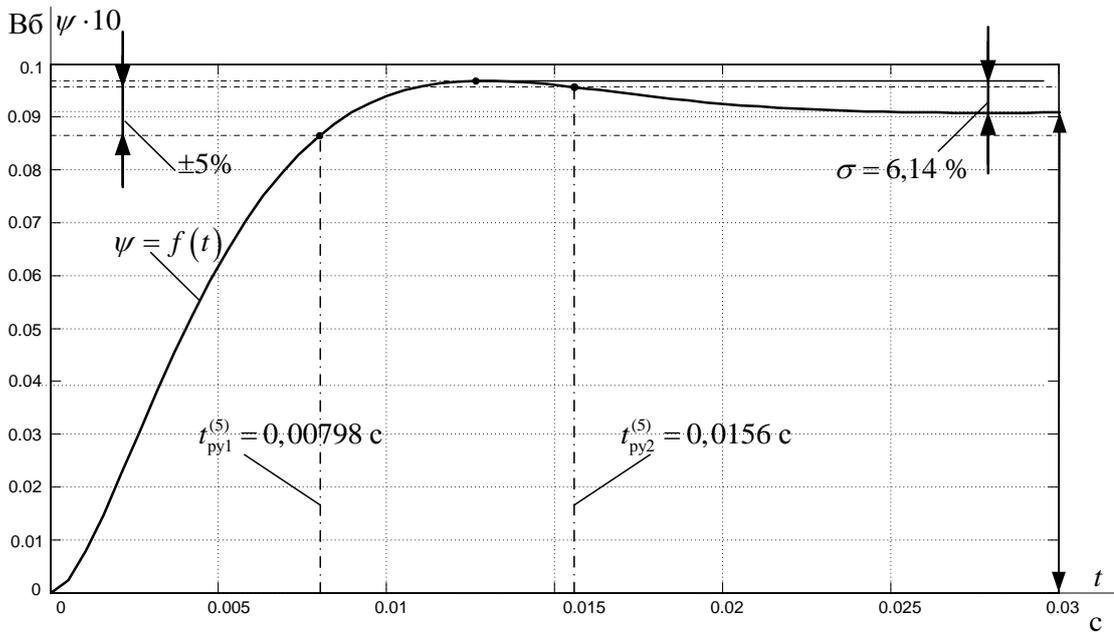


Рисунок 27 – Переходная характеристика $\psi(t)$ контура потокосцепления по имитационной модели рисунка 24

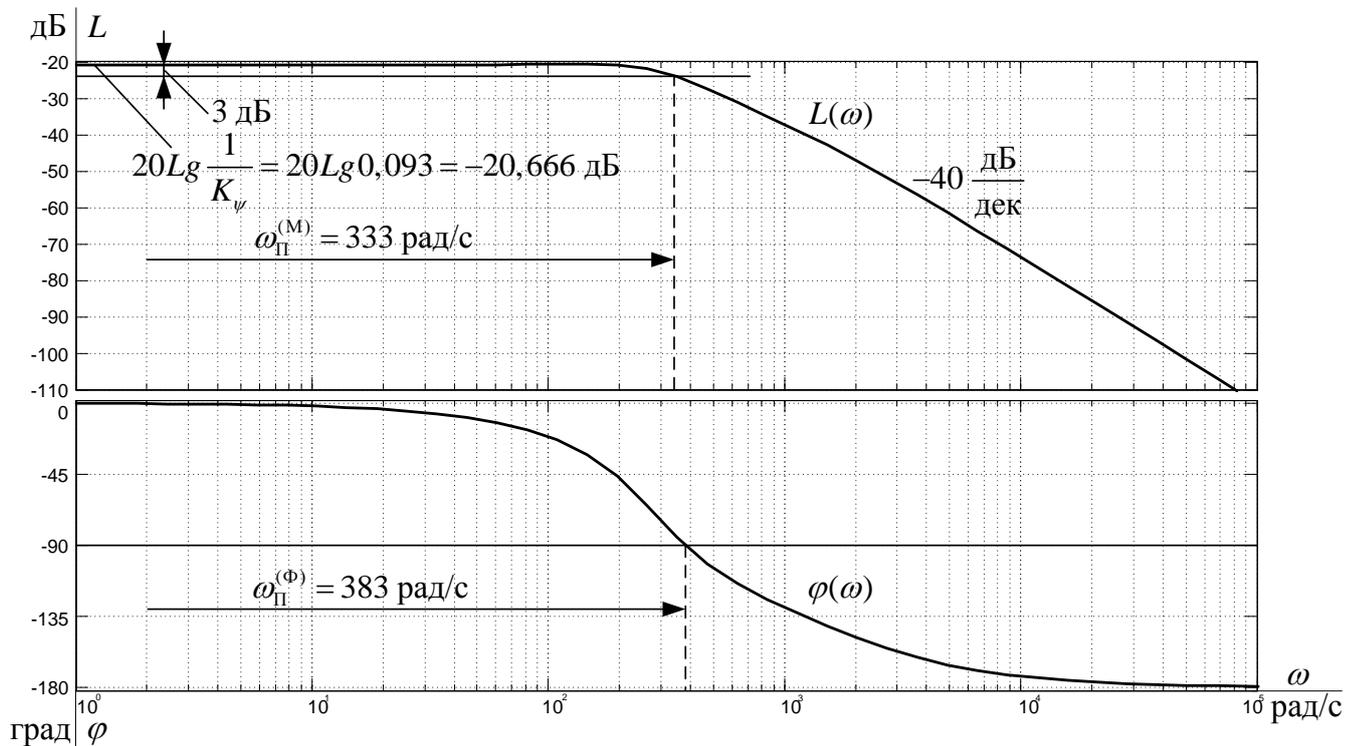


Рисунок 28 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура потокосцепления, настроенного на МО (без фильтра на входе)

Разомкнутый контур

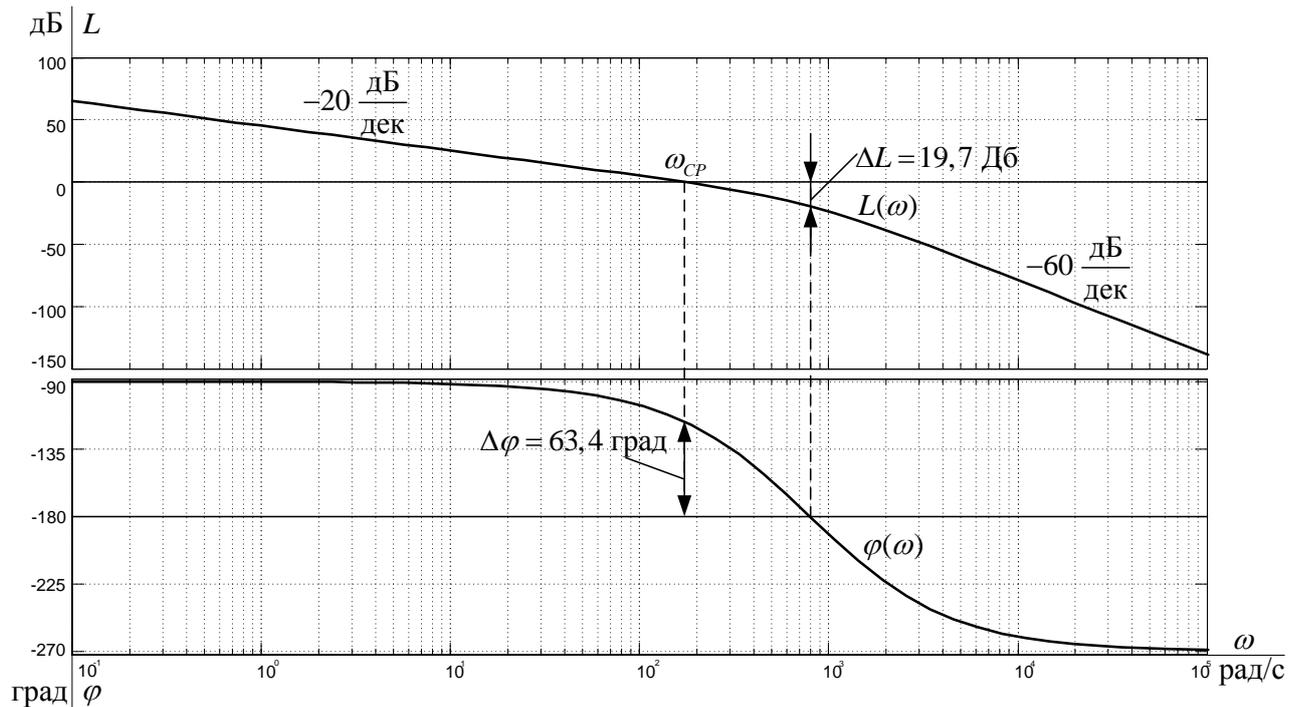


Рисунок 29 – Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура потокосцепления, настроенного на МО (без фильтра на входе)

Настройка контура близка к настройке на модульный оптимум системы второго порядка. Контур является астатической системой регулирования первого порядка по управлению и обеспечивает нулевую установившуюся ошибку $\Delta\psi_{уст} = 0$. В зависимости от соотношения малых постоянных времени T_T и $T_{\mu\psi 0}$ контур имеет следующие динамические показатели качества работы:

- показатели отработки скачка задания
- перерегулирование $\sigma = (4,3 \div 6,7)\%$;
- время вхождения в 5%-ю зону

$$t_{\text{PV1}}^{(5)} = (4,1 \div 2,75) \cdot (T_T + T_{\mu\psi 0}) = (4,1 \div 2,75) \cdot (0,000792 + 0,002) = 0,011 \div 0,007677 \text{ с.}$$

Для замкнутого контура

- полоса пропускания по модулю

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \frac{(0,71 \div 0,9)}{T_{\Gamma} + T_{\mu\psi 0}} = \frac{(0,71 \div 0,9)}{0,000792 + 0,002} = 254,33 \div 322,4 \text{ рад/с ;}$$

из характеристик видно, что:

полоса пропускания по модулю $\omega_{\Pi}^{(M)} = 333 \text{ рад/с ;}$

полоса пропускания по фазе $\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = 385 \text{ рад/с ;}$

Для разомкнутого контура

запас устойчивости по модулю $\Delta L = 19,7 \text{ дБ ;}$

запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi = 63,4 \text{ град.}$

Таблица 7 – Показатели переходных процессов по управлению оптимизированного контура потокосцепления с ПИ – регулятором

Показатели переходных процессов			
По управлению			
$t_{\text{py1}}^{(5)}, \text{ с}$	$t_{\text{py2}}^{(5)}, \text{ с}$	$\sigma, \%$	$\Delta\psi_{\text{уст}}, \text{ Вб}$
Ожидаемые показатели			
0,007677	-	(4.3 ÷ 6.7)	0
Результаты моделирования			
0,00798	0,0156	6,14	0

Вывод: Так как настройка контура потокосцепления производилась приближенно на модульный оптимум второго порядка, передаточная функция замкнутого контура имеет третий порядок, причем в знаменателе присутствует форсирующее звено то, вследствие этого полученные данные немного отличаются от ожидаемых показателей. Незначительная величина полученных отклонений позволяет нам сказать, что контур оптимизирован верно.

3.4 Оптимизация контура скорости с ПИ– регулятором

Контур регулирования тока имеет относительно большую инерционность в цепи обратной связи.

При оптимизации контура скорости внутренний оптимизированный замкнутый контур тока представлен усеченной передаточной функцией 1-го порядка

$$W(p)_{\text{ЗАМ.Т}} \approx \frac{1}{T_T \cdot p + 1} \approx \frac{1}{0,000792 \cdot p + 1};$$

где $T_T = a_T \cdot T_{\mu\Gamma\Theta} = a_T \cdot (T_{\mu\Pi\Pi} + T_{\mu\Gamma\Theta}) = 2 \cdot (0,0000625 + 0,000333) = 0,000792$ с - эквивалентная постоянная времени оптимизированного контура тока.

Структурная схема контура скорости с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором приведена на рисунке 30.

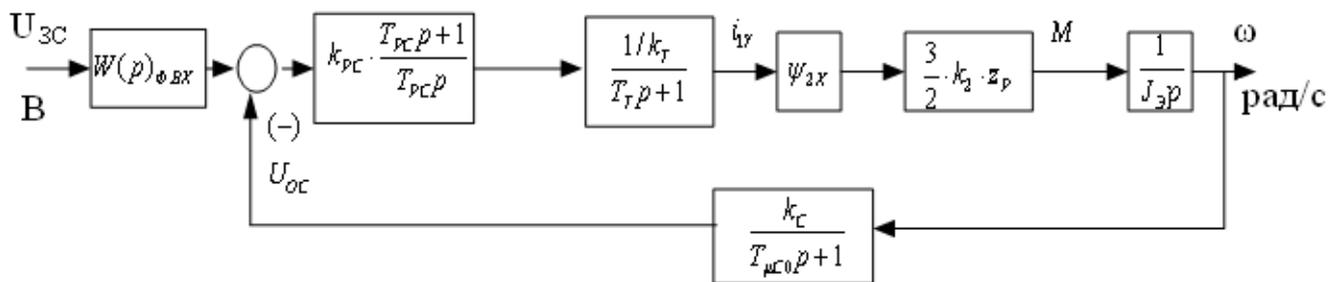


Рисунок 30 – Структурная схема контура скорости с ПИ-регулятором

Передаточная функция ПИ-регулятора

$$W(p)_{\text{PC}} = k_{\text{PC}} \cdot \frac{T_{\text{PC}} \cdot p + 1}{T_{\text{PC}} \cdot p} = 77,85 \cdot \frac{0,011 \cdot p + 1}{0,011 \cdot p}.$$

Коэффициент усиления и постоянная времени регулятора скорости определяются по выражениям

$$k_{\text{PC}} = \frac{J_3 \cdot k_T}{\psi_{2X} \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2} \cdot z_p \cdot k_C} \cdot \frac{1}{a_C \cdot (T_T + T_{\mu C0})} = \frac{0,195 \cdot 0,19}{0,885 \cdot \frac{3}{2} \cdot \frac{0,05665}{0,05929} \cdot 2 \cdot 0,065} \cdot \frac{1}{2 \cdot (0,000792 + 0,002)} = 40,23,$$

где $T_{\text{PC}} = b_C \cdot a_C \cdot (T_T + T_{\mu C0}) = 2 \cdot 2 \cdot (0,000792 + 0,002) = 0,011$ с - эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

Оптимизированный контур скорости с ПИ-регулятором имеет следующие передаточные функции:

- разомкнутого контура

$$W(p)_{\text{РАЗ.С}} = \frac{a_c \cdot b_c \cdot T_{\mu\text{СЭ}} \cdot p + 1}{b_c \cdot a_c^2 \cdot T_T \cdot T_{\mu\text{С0}} \cdot T_{\mu\text{СЭ}}^2 \cdot p^4 + b_c \cdot a_c^2 \cdot T_{\mu\text{СЭ}}^3 \cdot p^3 + b_c \cdot a_c^2 \cdot T_{\mu\text{СЭ}}^2 \cdot p^2} =$$

$$= \frac{2 \cdot 2 \cdot 0,002792 \cdot p + 1}{2 \cdot 2^2 \cdot 0,000792 \cdot 0,002 \cdot 0,002792^2 \cdot p^4 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,002792^3 \cdot p^3 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,002792^2 \cdot p^2};$$

- замкнутого контура по управлению

$$W(p)_{\text{РАЗ.С}} = \frac{1}{k_c} \cdot \frac{(a_c \cdot b_c \cdot T_{\mu\text{СЭ}} \cdot p + 1) \cdot (T_{\mu\text{С0}} \cdot p + 1)}{b_c \cdot a_c^2 \cdot T_T \cdot T_{\mu\text{С0}} \cdot T_{\mu\text{СЭ}}^2 \cdot p^4 + b_c \cdot a_c^2 \cdot T_{\mu\text{СЭ}}^3 \cdot p^3 + b_c \cdot a_c^2 \cdot T_{\mu\text{СЭ}}^2 \cdot p^2 + b_c \cdot a_c \cdot T_{\mu\text{СЭ}} \cdot p + 1} =$$

$$= \frac{1}{0,073} \cdot \frac{(2 \cdot 2 \cdot 0,002792 \cdot p + 1) \cdot (0,002 \cdot p + 1)}{2 \cdot 2^2 \cdot 0,000792 \cdot 0,002 \cdot 0,002792^2 \cdot p^4 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,002792^3 \cdot p^3 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,002792^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 2 \cdot 0,002792 \cdot p + 1};$$

где $T_{\mu\text{СЭ}} = T_T + T_{\mu\text{С0}} = 0,000792 + 0,002 = 0,002792$ с - эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

Оптимизированный контур при обработке ступенчатых управляющих воздействий обеспечивает высокое быстродействие при перерегулировании в общем случае более 43%. Настройка контура без фильтров на входе близка к настройке на С0.

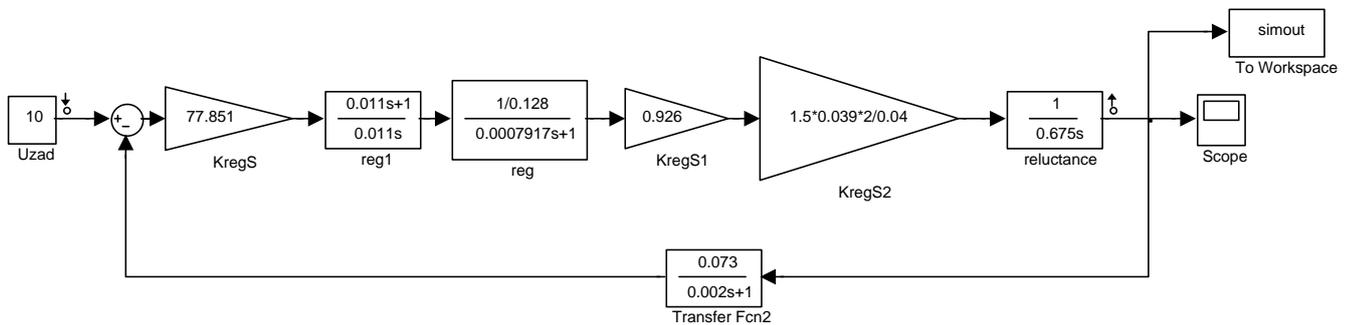


Рисунок 31 – Имитационная модель контура скорости с ПИ–регулятором (без фильтра на входе)

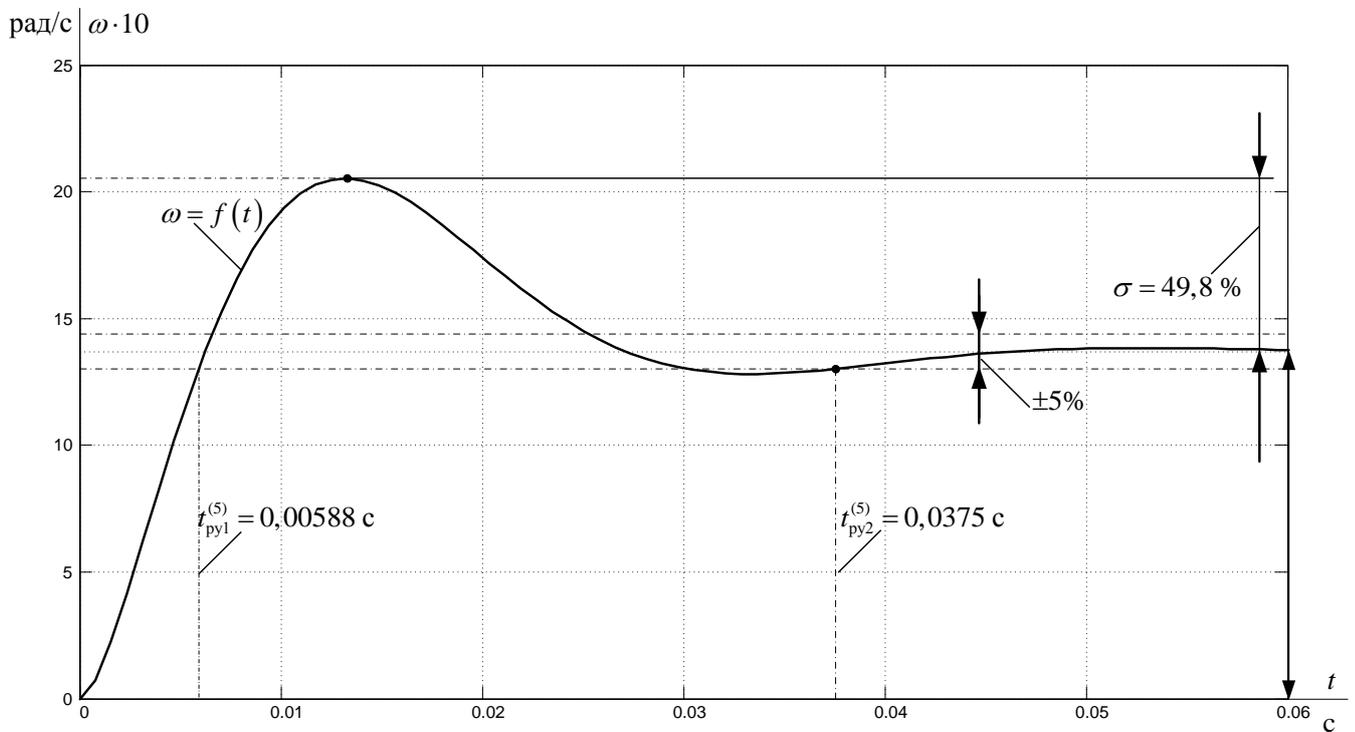


Рисунок 32 – Переходная характеристика контура скорости по имитационной модели рисунка 29.

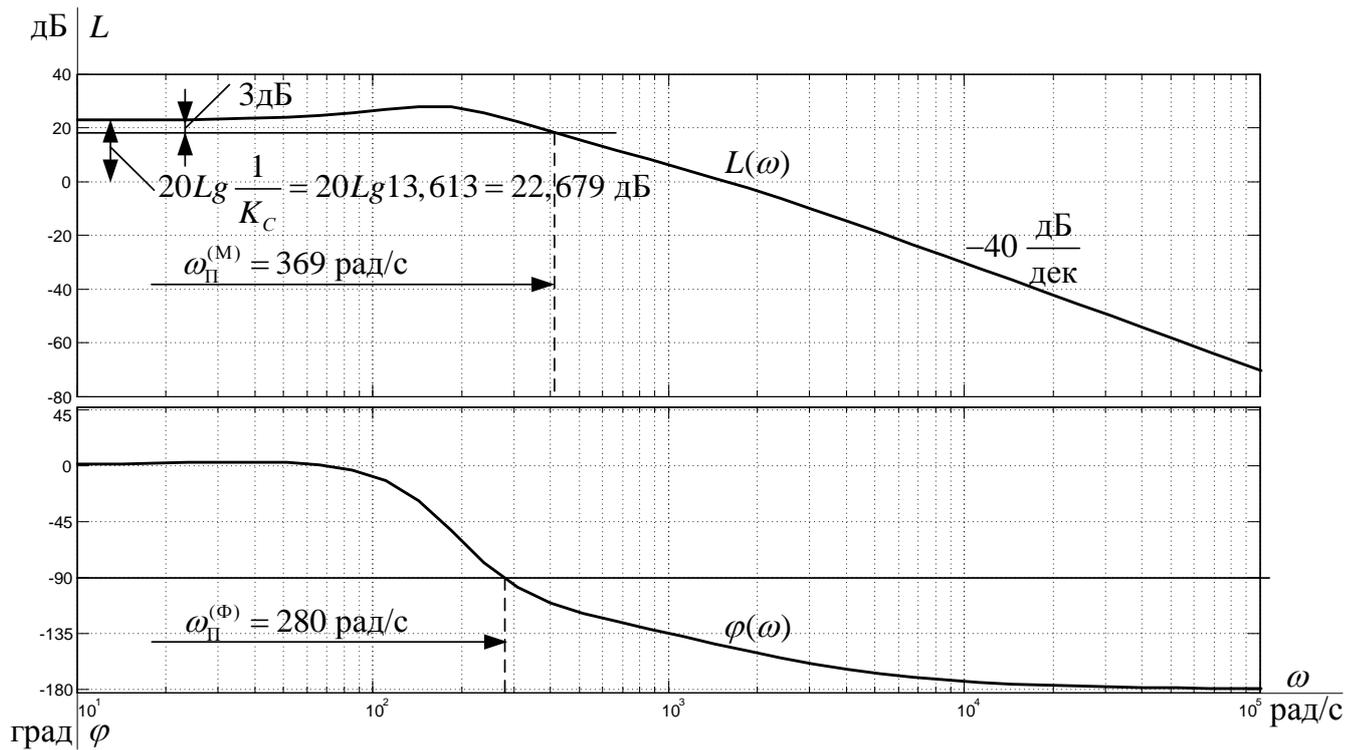


Рисунок 33 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура скорости, настроенного на СО (без фильтра на входе)

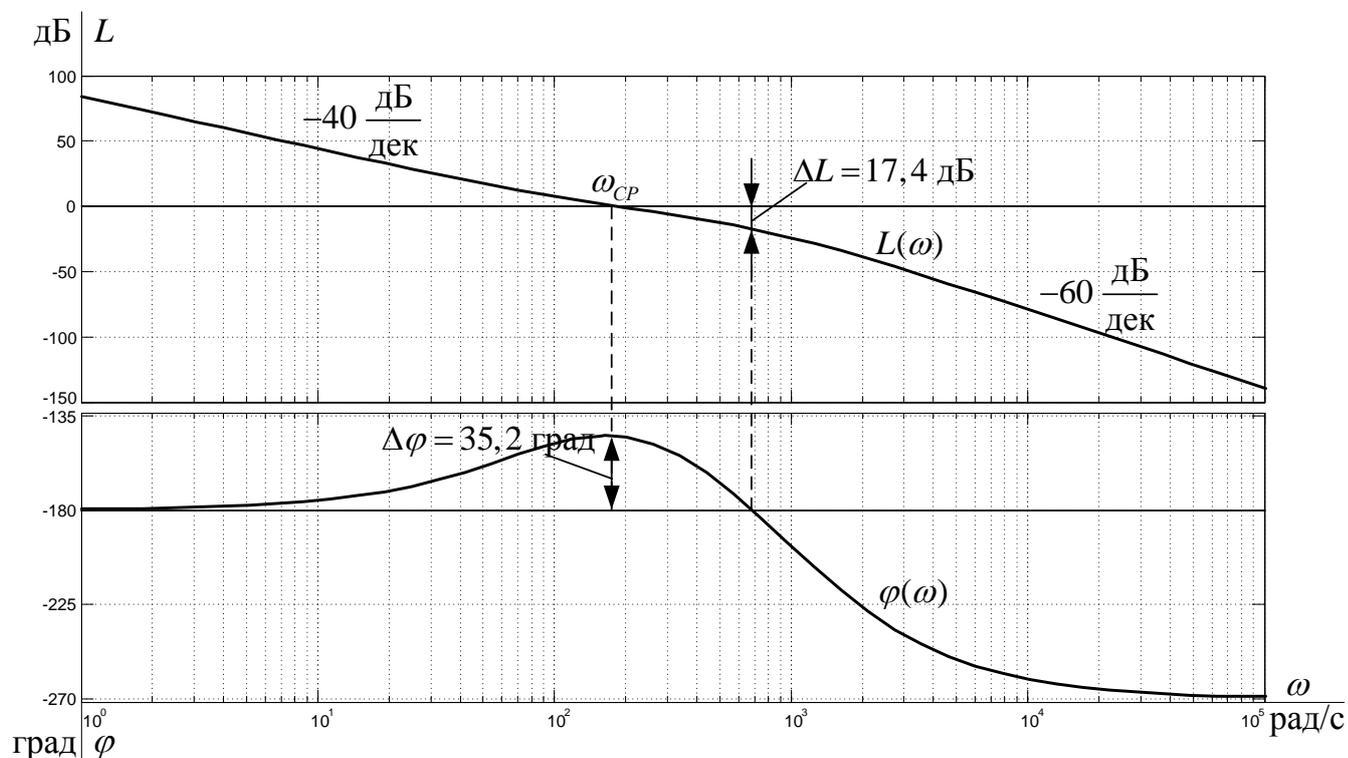


Рисунок 34 – Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура скорости, настроенного на СО (без фильтра на входе)

Из графиков видно, что

полоса пропускания по модулю $\omega_{\Pi}^{(M)} = 369 \text{ рад/с}$;

полоса пропускания по фазе $\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = 280 \text{ рад/с}$.

Для разомкнутого контура

запас устойчивости по модулю $\Delta L = 17,4 \text{ дБ}$;

запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi = 35,2 \text{ дБ}$.

Экспериментальные показатели качества линеаризованного контура скорости сведены в таблицу 8.

Таблица 8 – Показатели переходных процессов контура скорости с ПИ – регулятором (без фильтра на входе)

Показатели переходных процессов			
По управлению			
$t_{py1}^{(5)}$, с	$t_{py2}^{(5)}$, с	σ , %	$\Delta\omega_{уст}$, рад/с
Результаты моделирования			
0,00588	0,0375	49,8	0

Для ограничения перерегулирования на уровне 8,1 % на входе контура скорости должны быть включены два одинаковых фильтра, соответственно с постоянными времени :

$$T_{\Phi, \text{ВХ2}} = b_C \cdot a_C \cdot (T_T + T_{\mu C0}) = 2 \cdot 2 \cdot (0,000792 + 0,002) = 0,013 \text{ с}; \quad T_{\Phi, \text{ВХ2}} = T_{\mu C0} = 0,002 \text{ с}.$$

Передаточная функция замкнутого контура скорости по управлению с двумя фильтрами на входе имеет вид

- замкнутого контура

$$W(p)_{\text{РАЗС}} = \frac{1}{k_C} \cdot \frac{1}{b_C \cdot a_C^2 \cdot T_T \cdot T_{\mu C0} \cdot T_{\mu CЭ}^2 \cdot p^4 + b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu CЭ}^3 \cdot p^3 + b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu CЭ}^2 \cdot p^2 + b_C \cdot a_C \cdot T_{\mu CЭ} \cdot p + 1} =$$

$$= \frac{1}{0,073} \cdot \frac{1}{2 \cdot 2^2 \cdot 0,000792 \cdot 0,002 \cdot 0,002792^2 \cdot p^4 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,002792^3 \cdot p^3 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,002792^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 2 \cdot 0,002792 \cdot p + 1};$$

где $T_{\mu CЭ} = T_T + T_{\mu C0} = 0,000792 + 0,002 = 0,002792 \text{ с}$ - эквивалентная малая постоянная времени оптимизированного контура.

Настройка контура без фильтров на входе близка к настройке на СО, а с фильтрами на МО для системы 3-го порядка.

Контур скорости с фильтрами на входе представляет собой астатическую систему 1-го порядка и обеспечивает нулевую статическую ошибку по управлению. Динамические показатели качества работы контура зависят от соотношения малых постоянных времени $\frac{T_{\mu C0}}{T_T}$ и предварительно могут быть определены по выражениям:

- перерегулирование, время первого и окончательного вхождения в 5%-ю зону при отработке скачка задания

$$\sigma = (8,1 \div 10) \% ;$$

$$t_{\text{ПВ1}}^{(5)} = (7 \div 5,8) \cdot (T_T + T_{\mu C0}) = (7 \div 5,8) \cdot (0,000792 + 0,002) = 0,02 \div 0,016 \text{ с};$$

$$t_{\text{ПВ2}}^{(5)} = (12 \div 9,5) \cdot (T_T + T_{\mu C0}) = (12 \div 9,5) \cdot (0,000792 + 0,002) = 0,034 \div 0,027 \text{ с}.$$

Для замкнутого контура

- полоса пропускания контура по модулю и по фазе изменяются в пределах

$$\omega_{\Pi}^{(M)} = \frac{(0,5 \div 0,54)}{T_T + T_{\mu C0}} = \frac{(0,5 \div 0,54)}{0,000792 + 0,002} = 179,1 \div 193,4 \text{ рад/с ;}$$

$$\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = \frac{(0,36 \div 0,42)}{T_T + T_{\mu C0}} = \frac{(0,36 \div 0,42)}{0,000792 + 0,002} = 129 \div 150,4 \text{ рад/с ;}$$

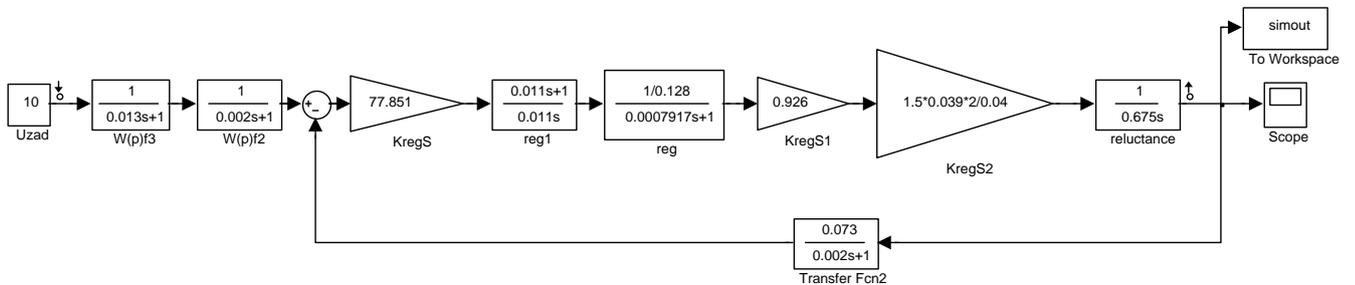


Рисунок 35 – Имитационная модель контура скорости с ПИ–регулятором в среде Simulink (с двумя фильтрами на входе)

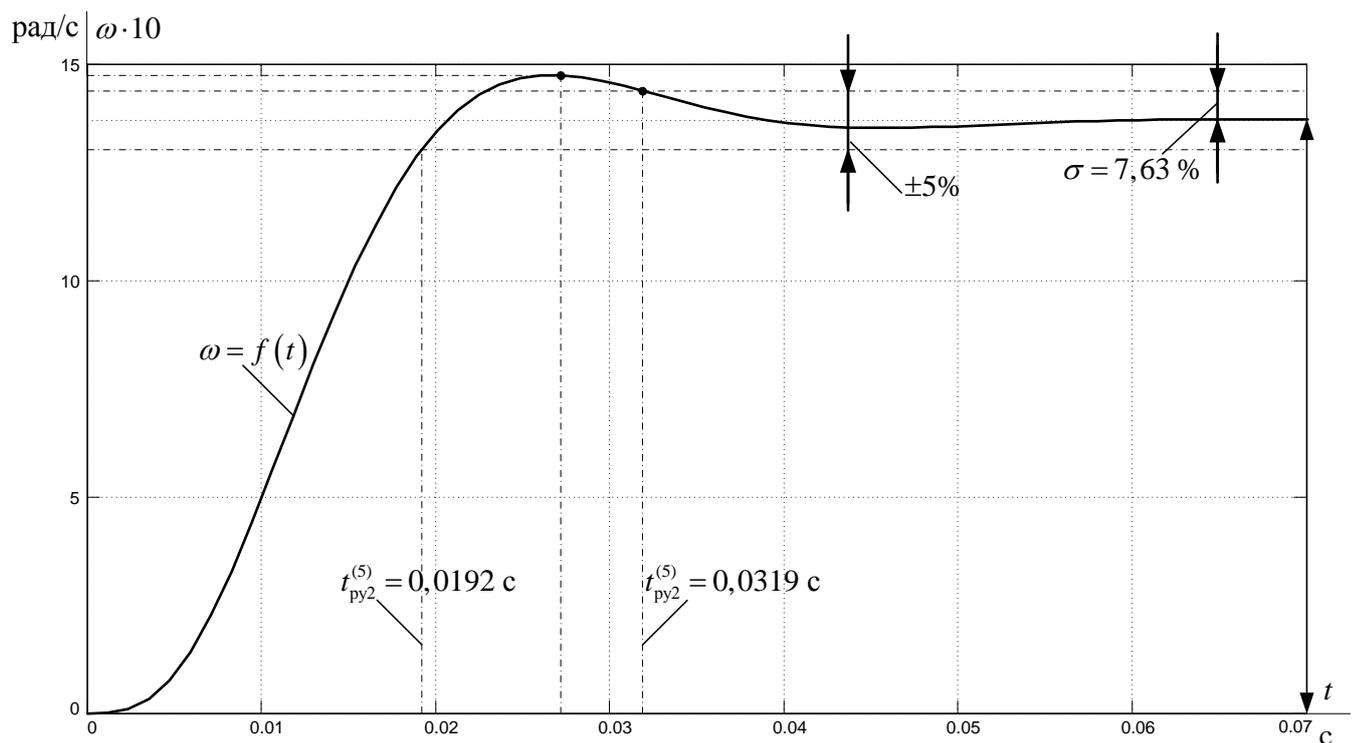


Рисунок 36 – Переходная характеристика контура скорости по имитационной модели рисунка 33

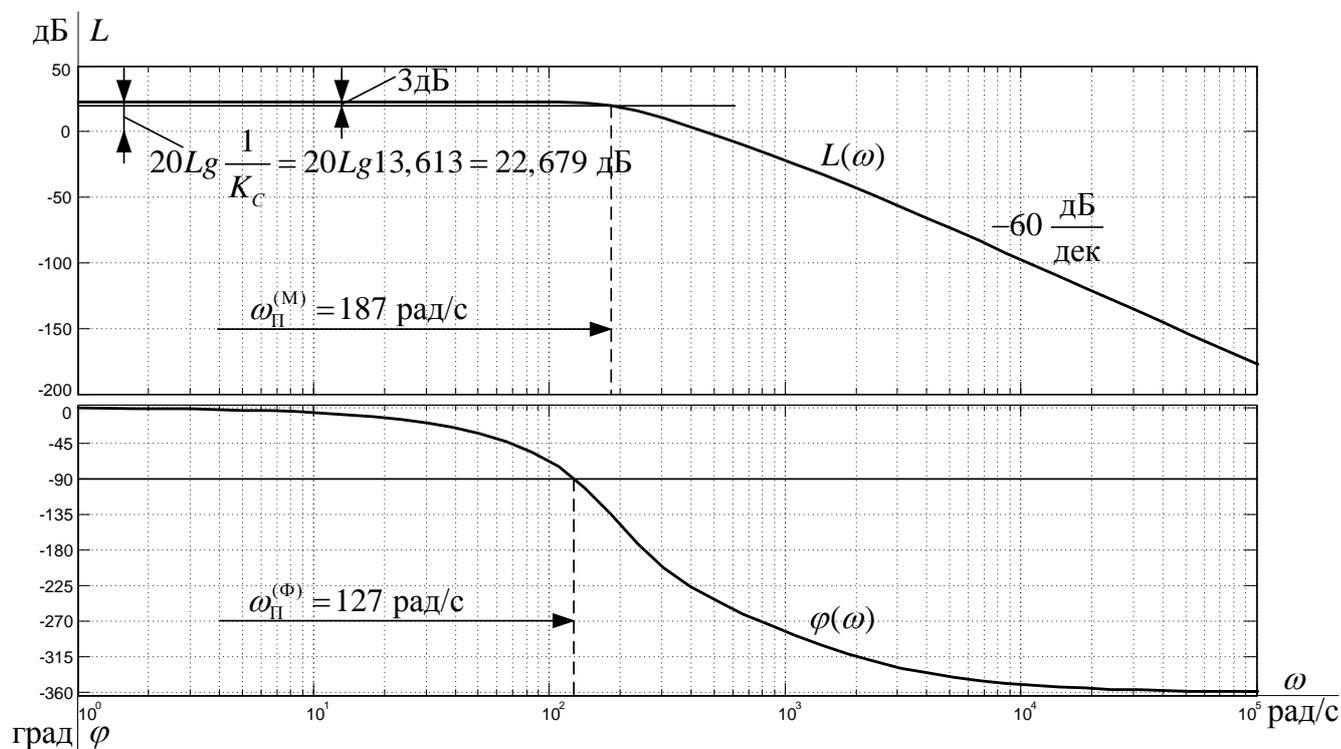


Рисунок 37 – Логарифмические частотные характеристики замкнутого контура скорости, настроенного на МО (с двумя фильтрами на входе)

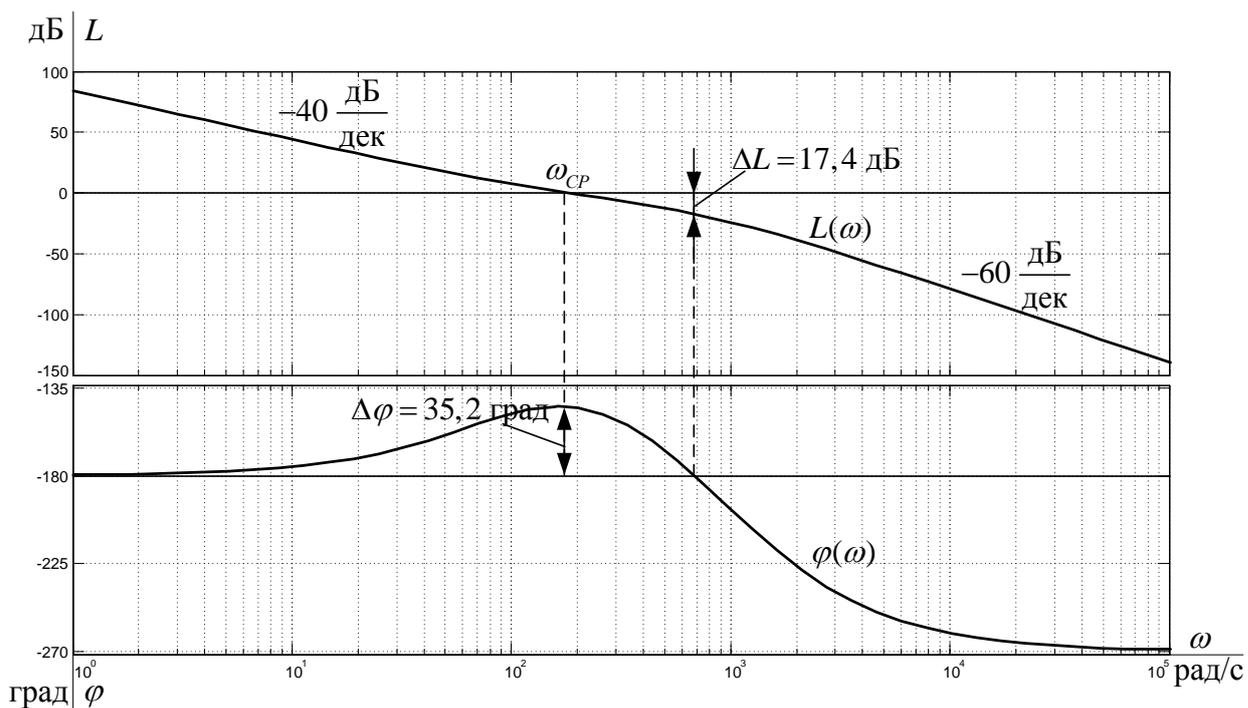


Рисунок 38 – Логарифмические частотные характеристики разомкнутого контура скорости, настроенного на МО (с двумя фильтрами на входе)

Из графиков видно, что

полоса пропускания по модулю $\omega_{\Pi}^{(M)} = 187$ рад/с ;

полоса пропускания по фазе $\omega_{\Pi}^{(\Phi)} = 127$ рад/с .

Для разомкнутого контура

запас устойчивости по модулю $\Delta L = 17,4$ дБ;

запас устойчивости по фазе $\Delta\varphi = 35,2$ дБ.

Теоретические и экспериментальные показатели качества линеаризованного контура скорости сведены в таблицу 9.

Таблица 9 – Показатели переходных процессов контура скорости (ПИ-регулятор)

Показатели переходных процессов			
По управлению			
$t_{py1}^{(5)}$, с	$t_{py2}^{(5)}$, с	σ , %	$\Delta\omega_{у.уст}$, рад/с
Ожидаемые показатели			
0,02 ÷ 0,016	0,034 ÷ 0,027	(8,1 ÷ 10)	0
Результаты моделирования			
0,0192	0,0319	7,63	0

Вывод: Так как контур скорости, оптимизированный приближенно по МО с ПИ-регулятором, является контуром четвертого порядка, с двумя входными фильтрами, поэтому полученные показатели оптимизации на модульный оптимум отличаются от предполагаемых. Полученные отклонения не значительны и входят в допустимый диапазон, следовательно контур оптимизирован верно.

3.5 Обработка контуром скорости возмущающих воздействий

Структурная схема линеаризованного контура скорости с инерционной обратной связью и ПИ-регулятором, при обработке возмущающего воздействия приведена на рис. 39.

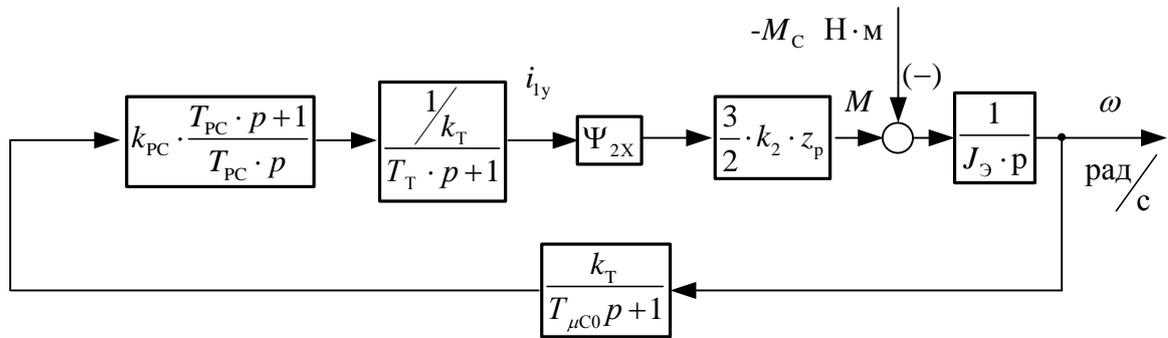


Рисунок 39 – Структурная схема линейризованного контура скорости с ПИ-регулятором при отработке возмущающих воздействий

Передаточная функция замкнутого контура скорости по возмущению

$$\begin{aligned}
 W(p)_{\text{в.зам}} &= \frac{\omega(p)}{-M_C(p)} = \frac{\frac{1}{J_{\text{э}}} \cdot b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu\text{сэ}}^2 \cdot p \cdot (T_T \cdot p + 1) \cdot (T_{\mu\text{с0}} \cdot p + 1)}{b_C \cdot a_C^2 \cdot T_T \cdot T_{\mu\text{с0}} \cdot T_{\mu\text{сэ}}^2 \cdot p^4 + b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu\text{сэ}}^3 \cdot p^3 + b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu\text{сэ}}^2 \cdot p^2 + b_C \cdot a_C \cdot T_{\mu\text{сэ}} \cdot p + 1} \approx \\
 &\approx \frac{\frac{1}{J_{\text{э}}} \cdot b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu\text{сэ}}^2 \cdot p \cdot (T_{\mu\text{сэ}} \cdot p + 1)}{b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu\text{сэ}}^3 \cdot p^3 + b_C \cdot a_C^2 \cdot T_{\mu\text{сэ}}^2 \cdot p^2 + b_C \cdot a_C \cdot T_{\mu\text{сэ}} \cdot p + 1} \approx \\
 &\approx \frac{\frac{1}{0,675} \cdot 2 \cdot 2 \cdot 0,002792^2 \cdot p \cdot (0,002792 \cdot p + 1)}{2 \cdot 2^2 \cdot 0,002792^3 \cdot p^3 + 2 \cdot 2^2 \cdot 0,002792^2 \cdot p^2 + 2 \cdot 2 \cdot 0,002792 \cdot p + 1};
 \end{aligned}$$

Оптимизированный замкнутый контур скорости с ПИ-регулятором представляет собой астатическую систему регулирования 1-го порядка по возмущению. Ожидаемые показатели качества работы контура при отработке ступенчатого возмущающего воздействия:

- установившаяся ошибка по возмущению

$$\Delta\omega_{\text{в.уст}} = 0 \text{ рад/с};$$

динамический провал (всплеск) скорости при набросе (сбросе) нагрузки ΔM_C

$$\Delta\omega_{\text{в.макс}} \approx -\frac{1,75 \cdot (T_T + T_{\mu\text{с0}})}{J_{\text{э}}} \cdot \Delta M_C \approx -\frac{1,75 \cdot (0,000792 + 0,002)}{0,195} \cdot 55 = -0,977 \text{ рад/с};$$

- время отработки возмущающего воздействия

$$t_{\text{РВ}} \approx (12,5 \div 10,9) \cdot (T_T + T_{\mu\text{с0}}) \approx (12,5 \div 10,9) \cdot (0,000792 + 0,002) \approx 0,035 \div 0,03 \text{ с.}$$

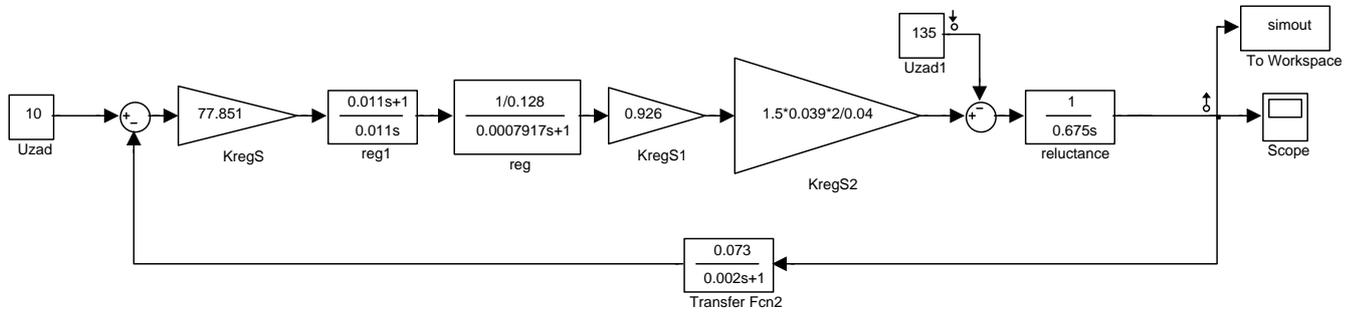


Рисунок 40 – Имитационная модель линейризованного контура скорости с ПИ-регулятором при обработке возмущения в среде Simulink

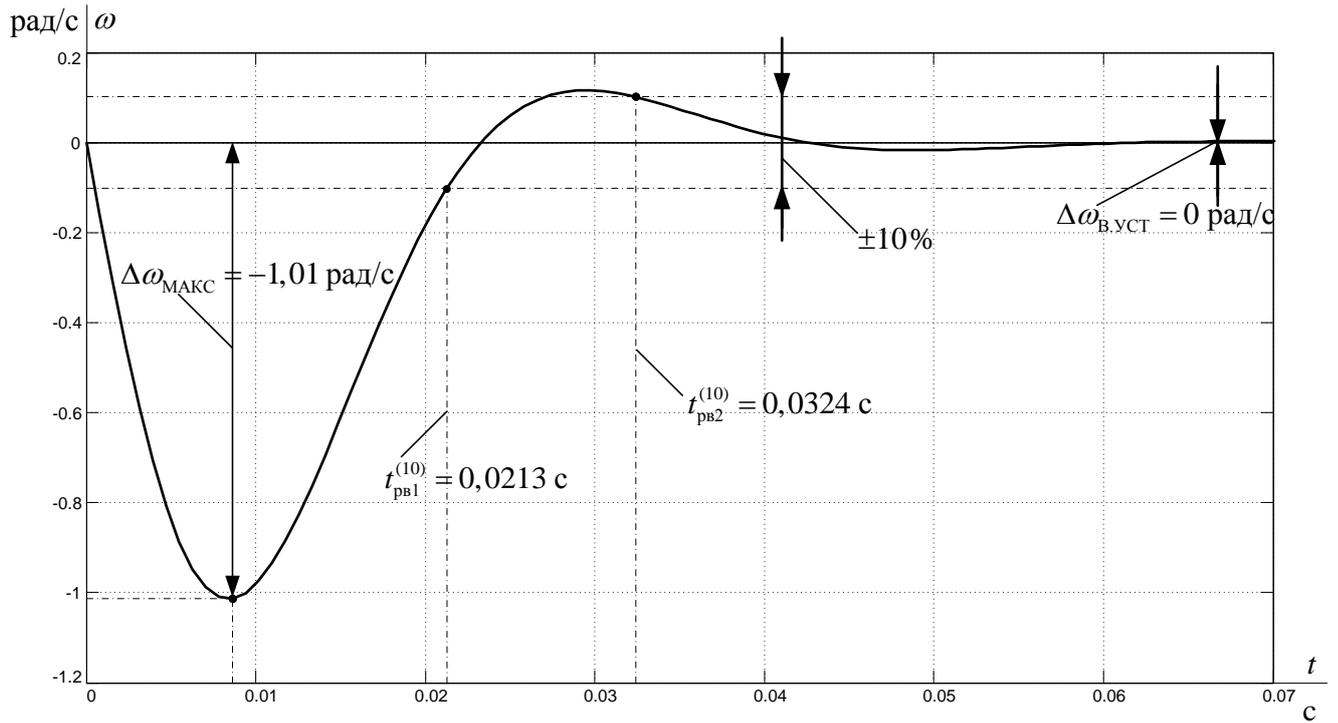


Рисунок 41 – Переходная характеристика контура скорости по имитационной модели рисунка 40

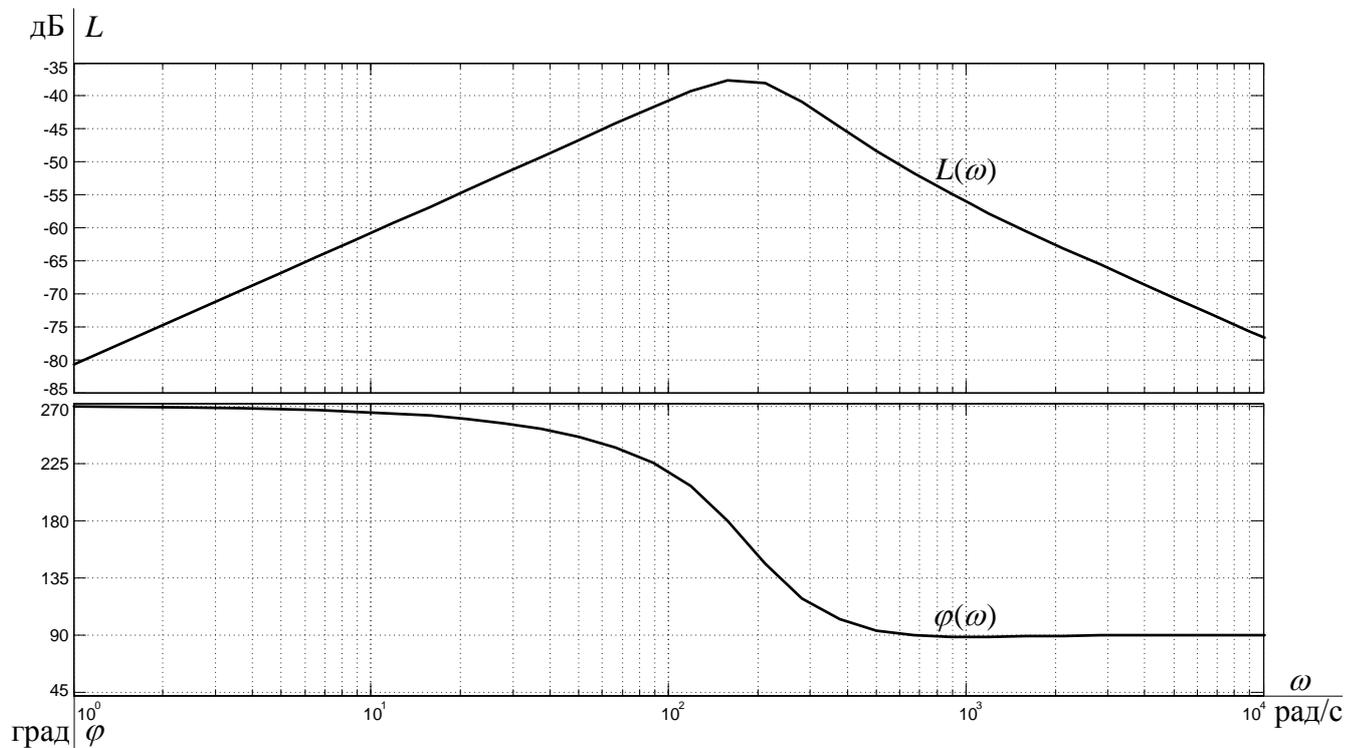


Рисунок 42 – ЛАЧХ и ЛФЧХ замкнутого контура скорости при отработке возмущающего воздействия

Теоретические и экспериментальные показатели качества сведены в таблицу 10. Время переходного процесса по возмущению t_{PB} оценивается по окончательному вхождению в зону допустимых отклонений $\pm\Delta$, где $\Delta = 0,1 \cdot \omega_{уст}$

Таблица 10 – Показатели переходных процессов контура скорости с ПИ-регулятором

$\Delta\omega_{в.макс}$, рад/с ($\Delta\dot{\omega}_{\bar{N}} = 55 \dot{\omega} \cdot \dot{\omega}$)	t_{PB} , с	$\Delta\omega_{в.уст}$, рад/с
Ожидаемые показатели качества		
-0,977	0,035÷0,03	0
Результаты моделирования		
-1,01	0,0324	0

Вывод: Логарифмические частотные характеристики замкнутого и разомкнутого контуров одинаковы. Поскольку ЛАЧХ замкнутого контура скорости по возмущению располагается в нижней полуплоскости, значит, система эффективно подавляет возмущение. Следовательно контур настроен верно.

4 НЕЛИНЕЙНАЯ САУ ЭЛЕКТРОПРИВОДА

4.1 Структурная схема нелинейной САУ РЭП асинхронного электропривода с векторным управлением

Структурная схема нелинейной САУ частотно-регулируемого электропривода с векторным управлением приведена на рисунке 43. Структурная схема рисунка 40 составлена на основании структурной схемы линеаризованной САУ электропривода (рисунок 40) и учитывая, следующие основные нелинейности элементов системы управления электропривода:

- насыщение регулятора тока, потокосцепления и скорости

$$U_{PTMAKC} = \pm 10B, \quad U_{P\psi MAKC} = \pm 10B, \quad U_{PCMAKC} = \pm 10B;$$

- постоянное по величине ограничение максимального тока электропривода в переходных режимах и кратковременных нагрузках, которое достигается ограничением выходного напряжения регулятора скорости на уровне

$$U_{PCDOП}(\omega) = \pm k_T \cdot I_{ЭПМАКС}(\omega),$$

ограничение выходного напряжения инвертора $E_{\text{E}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{И}} = 311,1\text{A}$;

реактивный характер нагрузки $M_C(\omega) = M_C \cdot \text{sign } \omega$,

где величина момента изменяется от $(M_{\text{СХХ}} + M_{\text{СДВ}})$ до $(M_{\text{СМАКС}} + M_{\text{СДВ}})$;

нелинейная зависимость задания потокосцепления $U_{\text{C}\psi}$ во второй зоне регулирования скорости от величины задания скорости $U_{\text{ЗС}}$.

Исследование на имитационной модели нелинейной САУ электропривода (рисунок 41) проводятся с целью оценки влияния величины задания скорости $U_{\text{ЗС}}$ и момента M_C на характер переходных процессов и динамические показатели качества работы электропривода с учетом ограничения выходных напряжений регуляторов и преобразователя частоты.

По результатам имитационных исследований могут быть внесены изменения в настройку контуров регулирования САУ электропривода, введены корректирующие цепи или выбраны компромиссные настройки с учетом изменяющихся параметров силовой части электропривода, например, момента инерции, потокосцепления и т. д.

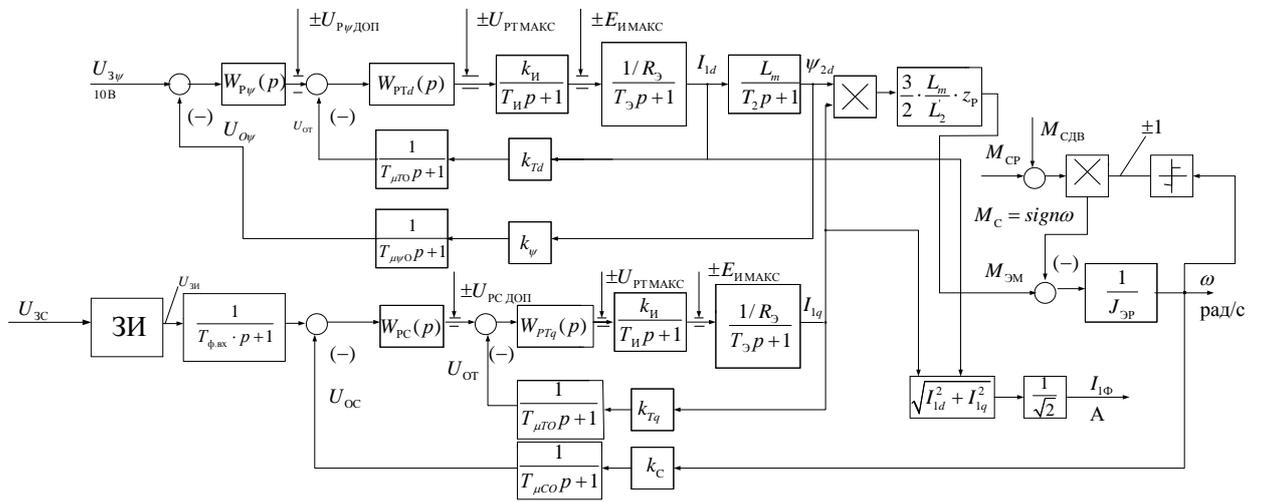


Рисунок 43 – Структурная схема нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении

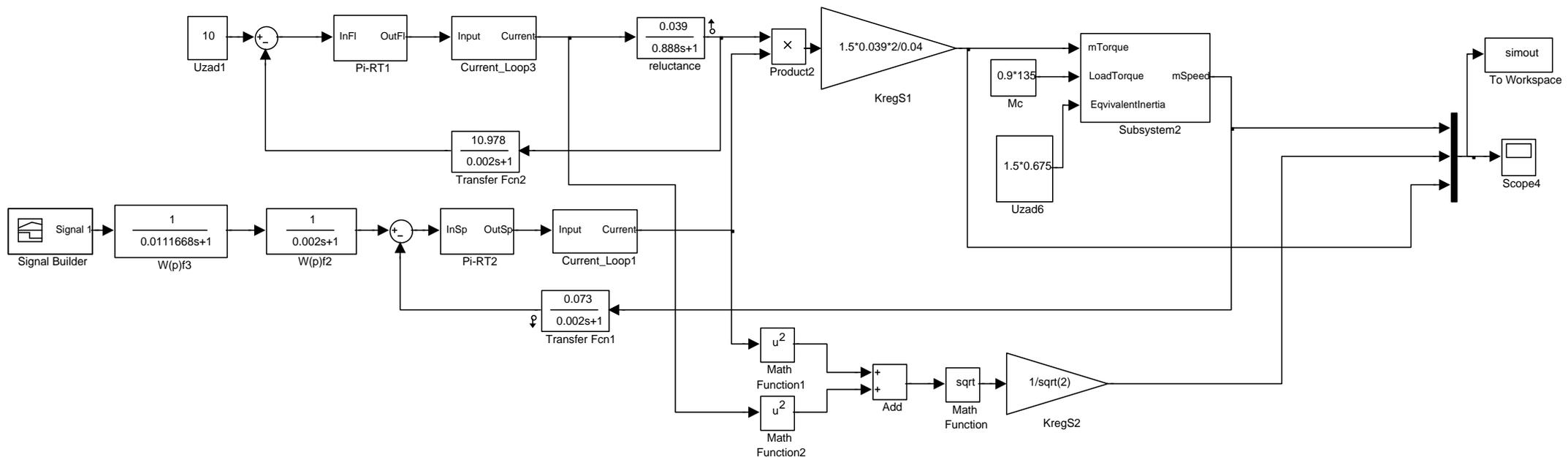


Рисунок 44 – Имитационная модель нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении

$\Psi_{2d}(t)$ Вб $M_{\text{дв.эм}}(t)$ Н*М $I_{1d}(t)$ А $\omega_{\text{эл}}(t)$ рад/с

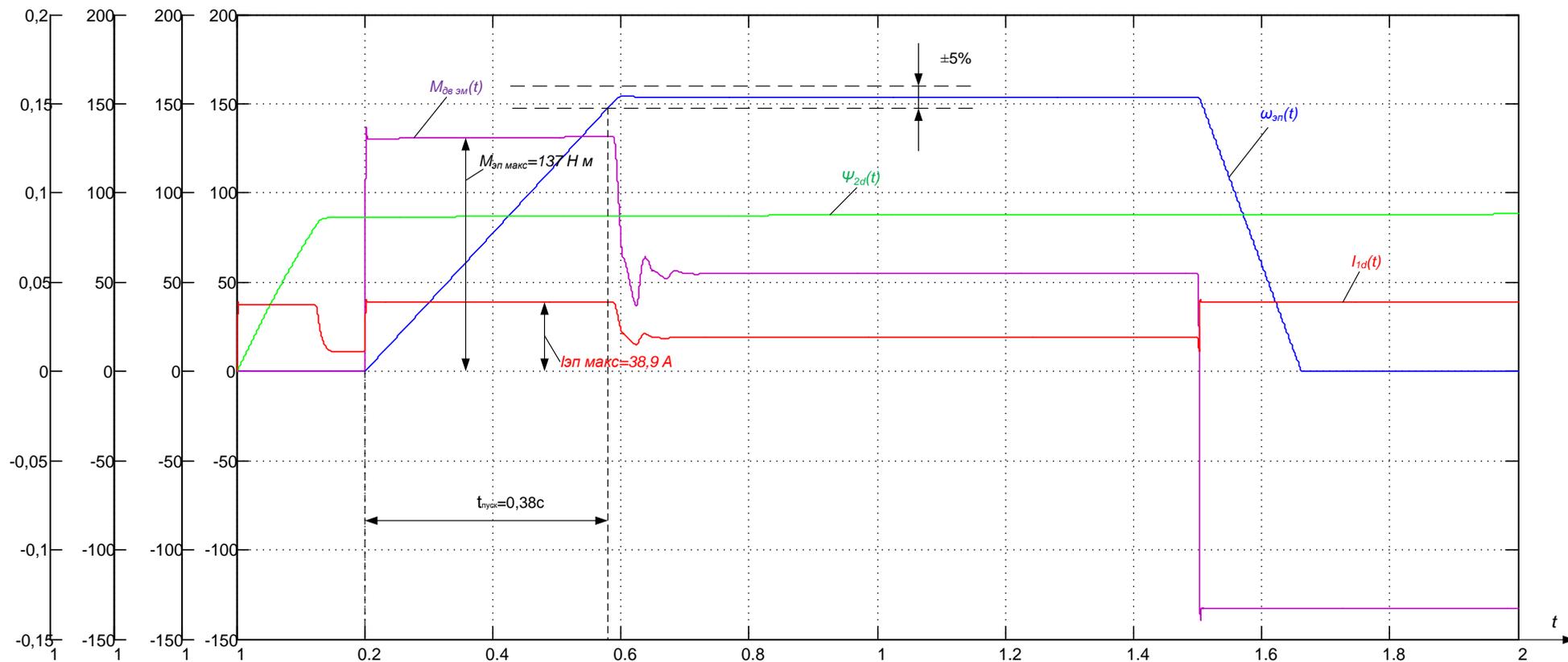


Рисунок 45 – Переходная характеристика пуска на максимальную скорость и торможения нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55 \text{ Нм}$

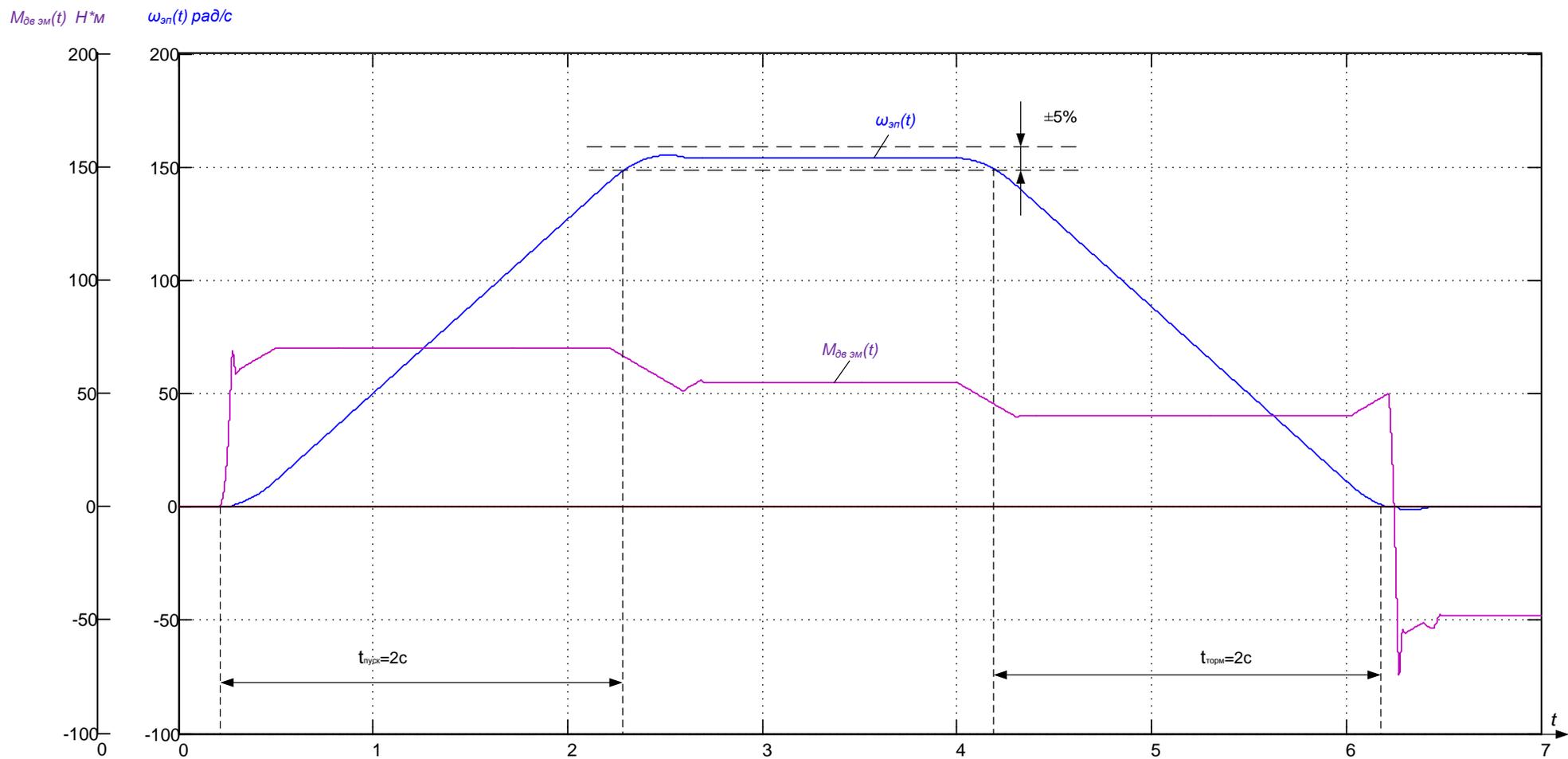


Рисунок 46 – Переходная характеристика пуска на максимальную скорость и торможения нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55$ Нм с задатчиком интенсивности.

$M_{\text{дв.эм}}(t)$ Н*м $I_{\text{д}}(t)$ А $\omega_{\text{эл}}(t)$ рад/с

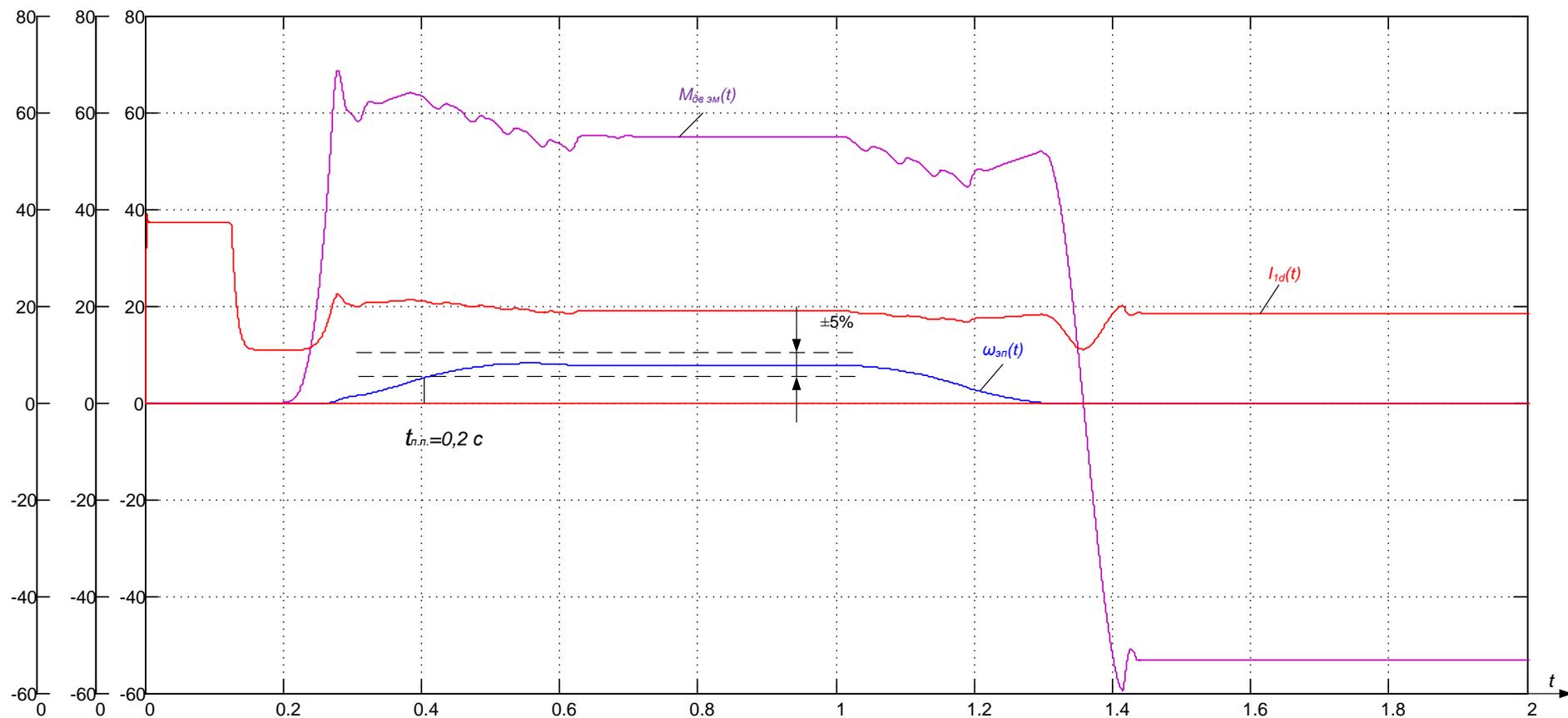


Рисунок 47 – Переходная характеристика пуска на минимальную скорость и торможения нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55$ Нм с задатчиком интенсивности.

$M_{\text{дв}}(t)$ Н*М $\omega_{\text{эл}}(t)$ рад/с

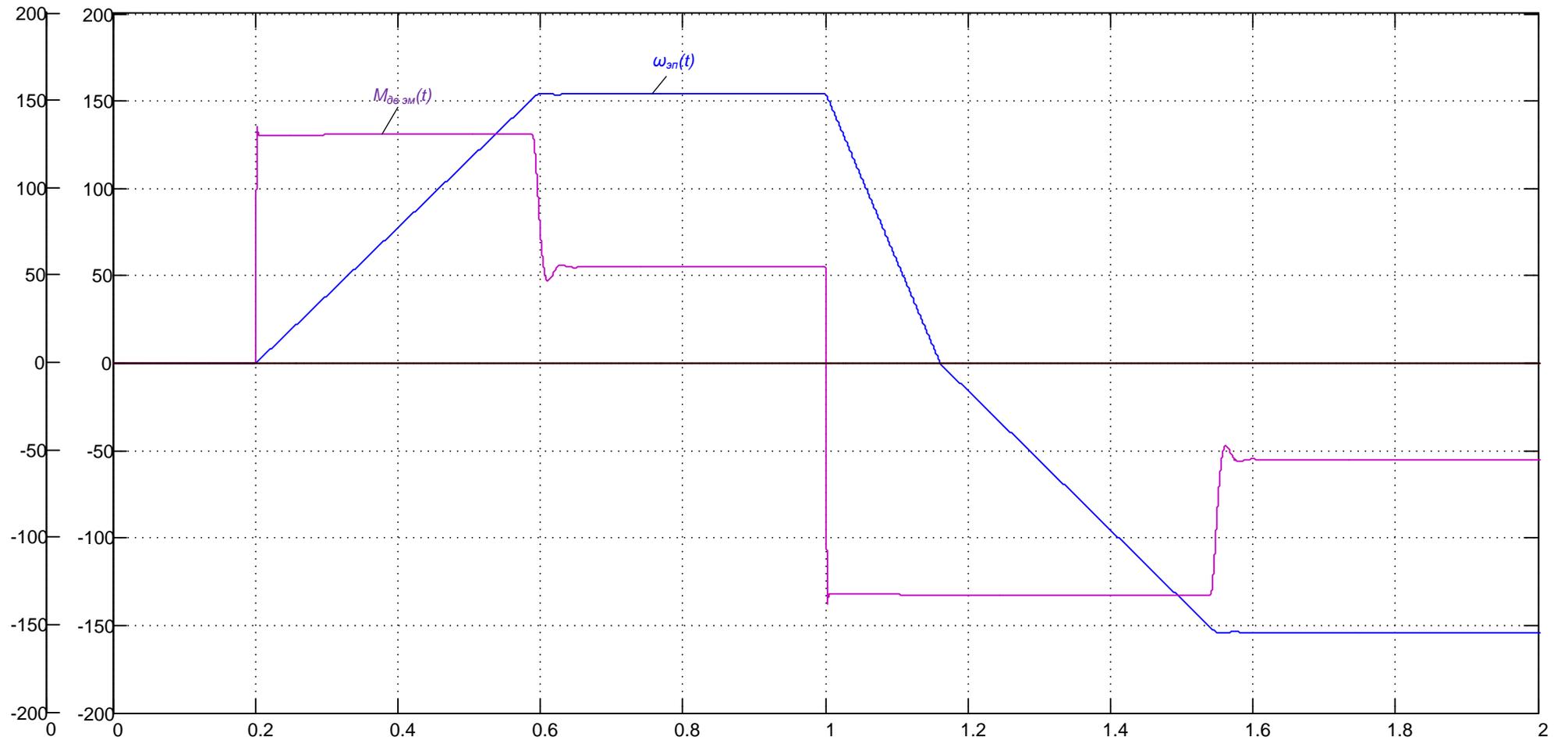


Рисунок 48 – Переходная характеристика реверса на максимальную скорость нелинейной САУ РЭП

при $M_c = 55$ Нм с.

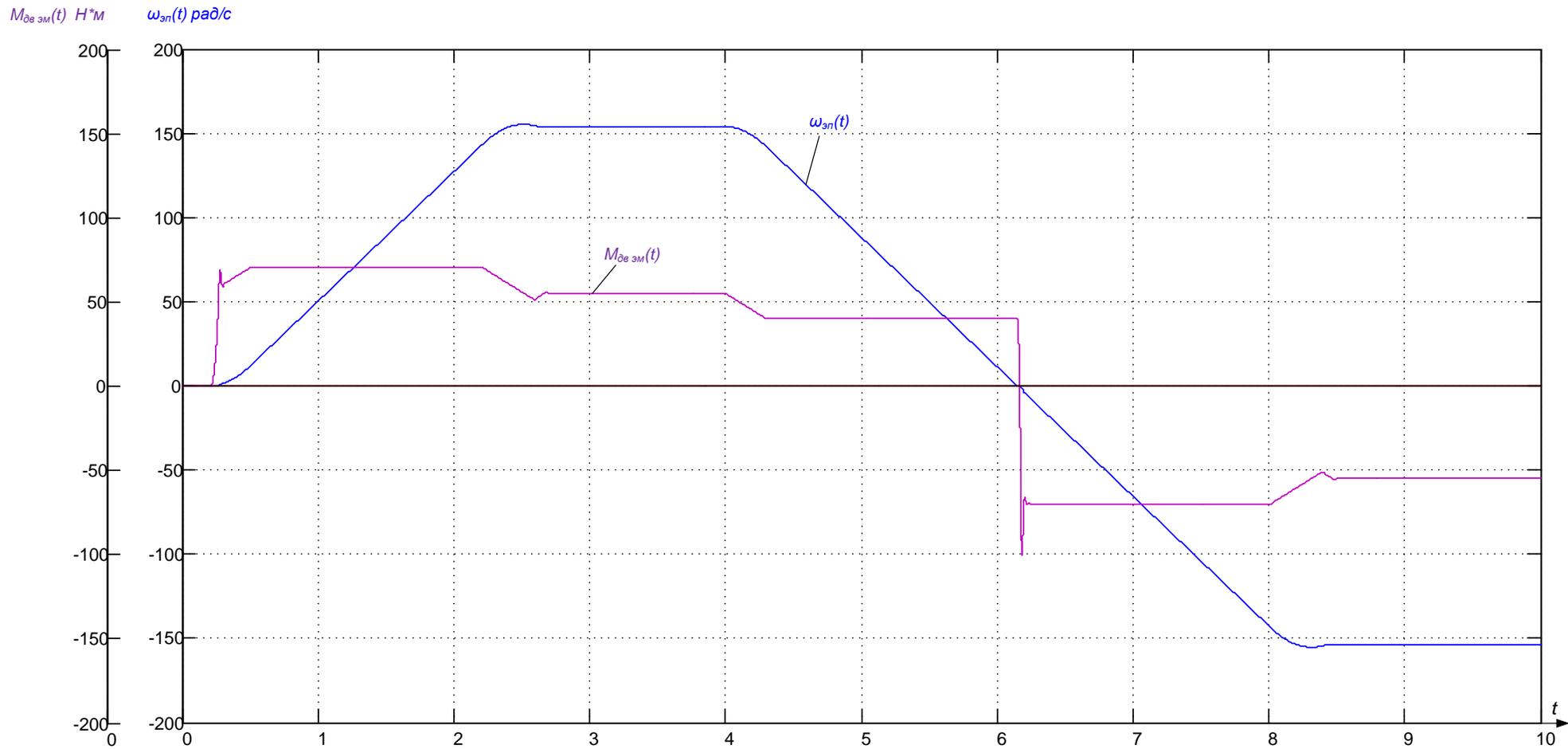


Рисунок 49 – Переходная характеристика реверса на максимальную скорость нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55$ Нм с задатчиком интенсивности.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Группа 3-5ГЗА1	ФИО Маленко Максим Тимофеевич
--------------------------	---

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. <i>Стоимость ресурсов проектной работы: материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	- Примерный бюджет проекта - 400 000 руб.; - В реализации проекта задействованы 5 человек: руководитель, инженер, 3 электромонтера (один из них бригадир);
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность» В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность»
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	Отчисления по страховым взносам 26% от ФОТ

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения проектной работы с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	- Инициализация проекта и его технико-экономическое обоснование; - Потенциальные потребители результатов НТП; - Анализ и оценка научно-технической уровня проекта; - Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения (Анализ используемого и проектируемого оборудования; Выбор и обоснование принципиальной схемы электропривода)
2. <i>Планирование и формирование бюджета проектной работы</i>	- Планирование выполнения проекта - Расчет бюджета проекта, в том числе расчет капитальных затрат - Расчет расходов при эксплуатации электропривода
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	- Определение ресурсной (ресурсосберегающей) и экономической эффективности исследования

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

1. график Ганта

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент	Попова С.Н.	к.э.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5ГЗА1	Маленко Максим Тимофеевич		

5. ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ

Темой дипломного проекта является «Частотно-регулируемый электропривод механизма передвижения телеги козлового крана».

В данное время система на электромостовых кранах используется устаревшая система управления (релейно-контакторная), которая давно устарела и из-за этого обслуживание данного оборудования является убыточным для предприятия.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение разрабатываемого проекта, оценка его эффективности, уровня возможных рисков, разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации.

Для достижения обозначенной цели необходимо решить следующие задачи:

- 1) произвести технико-экономическое обоснование проекта;
- 2) осуществить планирование этапов выполнения проекта;
- 3) рассчитать бюджет проводимого научно-технического проекта;
- 4) произвести оценку и экономической эффективности проекта.

5.1. Инициализация проекта и его технико-экономическое обоснование. Потенциальные потребители НТИ

Применение частотно-регулируемого асинхронного электропривода в механизмах подъёмно-транспортного оборудования является эффективным методом повышения технологичности производства. Использование таких приводов позволяет:

1. значительно, до 40% снизить энергопотребление крана, что особенно актуально при растущих тарифах на энергоносители;

2. осуществить разгон и торможение двигателя плавно, по линейному закону от времени, при варьировании времени разгона и времени торможения от долей секунд до 50 минут;

3. повысить комфортные показатели при движении крана и долговечность механического оборудования благодаря плавности переходных процессов;

4. защитить двигатель от перегрузок по току, перегрева, утечек на землю и от обрывов в цепи питания двигателя;

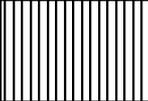
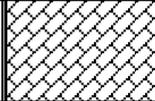
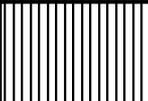
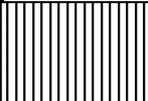
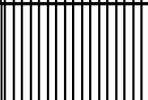
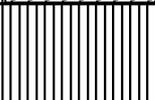
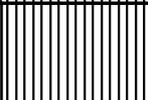
5. снизить эксплуатационные расходы на капитальный ремонт оборудования за счёт значительного снижения динамических нагрузок в элементах кинематической цепи.

В связи с бурным развитием техники проектные и пуско-наладочные работы проводятся на всех, без исключения, предприятиях, где осуществляется реконструкция или модернизация действующего электрооборудования. Стоимость электрооборудования и его монтаж составляет большой удельный вес в общей стоимости развития предприятия.

Организация и планирование пуско-наладочных работ производится параллельно с модернизацией производства в соответствии с нормативными актами. Пусконаладочные работы при монтаже электроприводов и их установке являются завершающей стадией процесса проектно-монтажных работ. Высокий уровень механизации и автоматизации производства, повышенные требования к качеству увеличивают объём ПНР и выделяют их в самостоятельный вид деятельности. От качества проведения ПНР зависит бесперебойность работы, безопасность и экономичность обслуживания электрооборудования. Финансирование ПНР осуществляется из ремонтного фонда предприятия, либо цеха. Средства выделяются на основе рассчитываемой сметы проведения ПНР.

Сегментировать рынок услуг по разработке и внедрению в производстве электропривода можно по следующим критериям: изменение в конструкции

существующих электрокозловых кранов, длительность эксплуатации оборудования (рисунок 50).

		Изменения в конструкции		
		Настройка существующего электропривода	Замена электропривода, их настройка	Замена устройства, настройка электропривода
Длительность эксплуатации, лет	1-5			
	5-10			
	Более 10			

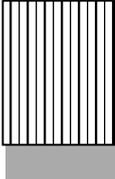
	Ремонтная служба предприятия		Сервисная компания по ремонту производственного оборудования		Фирма - производитель оборудования
--	------------------------------	--	--	--	------------------------------------

Рисунок 50 – Карта сегментирования рынка услуг по разработке и внедрению в производстве электропривода:

Потенциальными потребителями результатов НТП могут являться:

- легкая и тяжелая промышленность;
- склады открытого и закрытого типа;
- ремонтные цеха открытого и закрытого типа
- другие виды производств, связанные с эксплуатацией перемещением грузов с использованием электромостовых кранов.

5.1.1 Анализ и оценка научно-технической уровня исследуемого проекта

Для определения научно - технического уровня НТИ, научной ценности исследования, технической значимости и эффективности необходимо рассчитать коэффициент научно-технического уровня (НТУ).

Коэффициент НТУ рассчитывается при помощи метода балльных оценок. Суть метода состоит в присвоении каждому из признаков НТУ определенного числа баллов по принятой шкале. Общую оценку приводят по сумме баллов по всем показателям с учетом весовых характеристик.

Формула для определения общей оценки:

$$НТУ = \sum_{i=1}^n k_i * П_i$$

где k_i – весовой коэффициент i – го признака;

$П_i$ – количественная оценка i – го признака.

Таблица 11 - Весовые коэффициенты НТУ

Признаки НТУ	Весовой коэффициент
Уровень новизны	0,6
Теоретический уровень	0,4
Возможность реализации	0,2

Таблица 12 - Шкала оценки новизны

Баллы	Уровень
1-4	Низкий НТУ
5-7	Средний НТУ
8-10	Сравнительно высокий НТУ
11-14	Высокий НТУ

Таблица 13 - Значимость теоретических уровней

Характеристика значимости теоретических уровней	Баллы
Установка законов, разработка новой теории	10
Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ, взаимозависимость между факторами	8
Разработка способа (алгоритм, устройство, программы)	6
Элементарный анализ связей между факторами (наличие гипотезы, объяснение версий, практические рекомендации)	2
Описание отдельных факторов (вещества, свойств, опыта, результатов)	0.5

Таблица 14 - Возможность реализации по времени и масштабам

<u>Время реализации</u>	Баллы
В течение первых лет	10
От 5 до 10 лет	4
Свыше 10 лет	2
<u>Масштабы реализации</u>	Баллы
Одно или несколько предприятий	2
Отрасль	4
Народное хозяйство	10

Расчет НТУ:

$$НТУ = \sum_{i=1}^n k_i * П_i$$

где $k_1 = 0,6$; $k_2 = 0,4$; $k_3 = 0,2$; $k_4 = 0,4$; $П_1 = 8$; $П_2 = 5$; $П_3 = 9$; $П_4 = 6$.

$$НТУ = 0,6*8+0,4*5+0,2*9+0,2*6 = 9,8.$$

По полученным значениям коэффициента можно сказать о достаточно высоком научно - техническом уровне и эффективности исследуемого проекта.

5.1.2 Анализ используемого и проектируемого оборудования

Транспортировка и погрузо-разгрузочные работы осуществляются козловым краном ЛТ-62 в течении одной смены в день (8 ч.), грузоподъемностью 32 т, с максимальной мощностью 129 кВт. В электроприводе данного крана используется двигатель типа 4А160М4У3, номинальной мощностью 18,5 кВт и релейно-контакторная система управления.

В таблице 15 представлены параметры существующей и разрабатываемой систем управления.

Таблица 15- Параметры систем управления

До модернизации	После модернизации
Установленная мощность – 129 кВт	Установленная мощность – 80 кВт
Большие электрические потери при работе в режиме пониженной скорости	Обеспечивают полностью бесконтактное управление двигателями и плавное высококачественное регулирование частоты вращения во всём диапазоне
Возникновение максимальных ударных моментов из за частых переключений из двигательного в тормозной режим.	Плавность регулирования приводит к существенному уменьшению нагрузки на механическую часть крана.
Срок службы привода - 20лет	Скорость электропривода может быть адаптирована к каждому конкретному технологическому процессу, что позволяет повысить производительность крана и срок службы привода (30 лет)

5.1.3 Выбор и обоснование принципиальной схемы электропривода

Выбор структурной схемы сводится к сравнению возможных вариантов модернизации и выбору наиболее оптимальной (таблица 16).

Таблица 16 – Экономическое сравнение предполагаемого закупаемого оборудования

Наименование комплектующих	Вариант исполнения			
	1		2	
	марка	стоимость	марка	стоимость
ПЧ	VLT 5023 Danfoss	85000	ABBACS880	93800
Двигатель	4A160M4У3	19500	4A160M4У3	19500
Коммут. аппаратура		9028		15180
Прочие оборудование (кабеля, клеммы и др.)		50000		57500
Общая сумма		163528		185980

Для проведения конкурентоспособной оценки выбраны следующие показатели: 1) уровень капитальных вложений, 2) уровень надежности, 3) уровень обслуживания, 4) завышение мощности электропривода, 5) уровень затрат на эксплуатацию, 6) коэффициент мощности, 7) генерирование помех. Сведем коэффициенты их значений (по экспертной оценке) в таблицу 17:

Таблица 17 – Коэффициенты весомости критериев сравнения внедряемого привода

Номер критерия	1	2	3	4	5	6	7
Коэффициент весомости	1,0	0,8	0,6	0,3	0,4	0,2	0,1

По каждому частотному критерию устанавливаем оценку степени обеспечения цели (таблица 18):

Таблица 18 – Оценка степени обеспечения цели

Уровень цели	Низкий	Средний	Высокий
Оценка обеспечения цели	0	0,5	1

Проанализировав имеющиеся данные, производим модернизацию электропривода крана за счёт использования преобразователя VLT 5023 Danfoss мощностью 22 кВт и стоимостью 85000руб., комплект интерфейса для связи преобразователя с ПК – 2900 руб., программное обеспечение PowerSuite – 2960 руб., сетевой дроссель для преобразователя – 3168 руб., прочее оборудование (кабеля, контакторы, кнопки, входной дроссель) – 50000руб. Общая стоимость для всего привода 163528 рублей.

5.2. Планирование выполнения проекта

5.2.1 Определение трудоемкости работ

Комплекс работ по созданию проекта включает в себя 2 этапа:

- проектировка электропривода лифта;
- пуско-наладочные работы электропривода лифта.

Проект электропривода лифта будут разрабатывать 2 человека: руководитель и инженер.

Пуско-наладочные работы будут осуществлять руководитель и бригада электриков (один из электриков будет бригадир).

Расчет трудоемкости работ проводится опытно-статистическим методом, основанным на определении ожидаемого времени выполнения работ в человеко-днях по формуле:

$$t_{ож\ i} = \frac{3*t_{min\ i} + 2*t_{max\ i}}{5},$$

где $t_{min\ i}$ – минимальная возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой операции (оптимистическая оценка), чел.-дн.;

$t_{max\ i}$ – максимальная возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой операции (пессимистическая оценка), чел.-дн..

Разработка технического задания на проектирование:

$$t_{ож\ i} = \frac{3*4 + 2*2}{5} = 3 \text{ чел.-дн.}$$

Остальные расчеты пунктов трудоемкости работ выполняются аналогичным способом и приведены в таблице 19.

Таблица 19 – Содержание проектных работ

№	Содержание работ	Продол. работ, чел.-дн.		
		t_{min}	t_{max}	$t_{ож}$
1	Разработка технического задания на проектирование	2	4	3
2	Описание объекта модернизации	1	3	2
3	Разработка структурной схемы ЭП	1	3	2
4	Кинематическая схема механизма	1	3	2
5	Выбор системы и алгоритма управления. Подбор оборудования для управления (ПЧ, контроллер, датчики)	2	4	3
6	Разработка математической модели системы АУ ЭП	5	10	7
7	11. Вопросы безопасности и экологичности проекта	2	4	3
8	Технико-экономические расчеты	2	7	4
9	Составление пояснительной записки	3	4	4
	Итого:	19	42	30

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож i}}{ч_i},$$

Где $ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Разработка технического задания на проектирование:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож i}}{ч_i} = \frac{3}{2} = 1,5 \text{ дн.}$$

Остальные расчеты пунктов продолжительности работ выполняются аналогичным способом и приведены в таблице 20.

Таблица 20 – Продолжительность проектных работ

№	Содержание работ	Продол. работ, чел.-дн.		
		$t_{ож}$	$Ч_i$	T_p
1	Разработка технического задания на проектирование	3	2	1,5
2	Описание объекта модернизации	2	2	1
3	Разработка структурной схемы ЭП	2	2	1
4	Кинематическая схема механизма	2	2	1
5	Выбор системы и алгоритма управления. Подбор оборудования для управления (ПЧ, контроллер, датчики)	3	2	1,5
6	Разработка математической модели системы АУ ЭП	7	2	3,5
7	Вопросы безопасности и экологичности проекта	3	2	1,5
8	Технико-экономические расчеты	4	2	2
9	Составление пояснительной записки	4	1	4
	Итого:	30		17

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} * k,$$

где k – коэффициент календарности, предназначенный для перевода рабочего времени в календарное, который рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{T_{кГ}}{T_{кГ} - T_{вД} - T_{пД}},$$

где $T_{кГ}$ – количество календарных дней в году;

$T_{вД}$ – количество выходных дней в году;

$T_{пД}$ – количество праздничных дней в году;

$$k = \frac{T_{кГ}}{T_{кГ} - T_{вД} - T_{пД}} = \frac{365}{365 - 104 - 10} = 1,45,$$

тогда при расчете длительности этапов в рабочих днях расчетную величину продолжительности работ T_k нужно округлить до целых чисел.

Разработка технического задания на проектирование (в календарных днях):

$$T_{ki} = 1,5 * 1,45 = 2.$$

Дальнейший расчет пунктов продолжительности работ в календарных днях выполняется аналогично и результаты приведены в таблице 21.

Таблица 21 – Продолжительность проектных работ (в календарных днях)

№	Содержание работ	Продол. работ, чел.-дн.		
		T_p	k	T_k
1	Разработка технического задания на проектирование	1,5	1,45	2
2	Описание объекта модернизации	1	1,45	2
3	Разработка структурной схемы ЭП	1	1,45	2
4	Кинематическая схема механизма	1	1,45	2
5	Выбор системы и алгоритма управления. Подбор оборудования для управления (ПЧ, контроллер, датчики)	1,5	1,45	2
6	Разработка математической модели системы АУ ЭП	3,5	1,45	5
7	Вопросы безопасности и экологичности проекта	1,5	1,45	2
8	Технико-экономические расчеты	2	1,45	3
9	Составление пояснительной записки	4	1,45	6
	Итого:	17		25

Результаты расчетов временных показателей разработка проекта приведены в таблице 22.

Таблица 22 – Временные показатели разработки проекта

№ раб.	Исполнители	Продолжительность работ						
		t_{min} , че л.-дн.	t_{max} , чел. -дн.	$t_{ож}$, чел. -дн.	T_p , раб. дн.	T_k , кол. дн.	U_i , %	Γ_i , %
1	Руководитель, Инженер	2	4	3	1,5	2	8	8
2	Руководитель, Инженер	1	3	2	1	2	8	16
3	Руководитель, Инженер	1	3	2	1	2	8	24
4	Руководитель, Инженер	1	3	2	1	2	8	32
5	Руководитель, Инженер	2	4	3	1,5	2	8	40
6	Руководитель, Инженер	5	10	7	3,5	4	16	56
7	Руководитель, Инженер	2	4	3	1,5	2	8	64
8	Руководитель, Инженер	2	7	4	2	3	12	76
9	Инженер	3	4	4	4	6	24	100
Итого						25		

Далее в таблице 13 приведен календарный план разработки проект в форме диаграммы Ганта.

Таблица 23 – Диаграмма Ганта – календарный план разработки проекта

№ р.	Исполнители	Т к	Март																								Апрель	
			1	2	3	4	7	8	9	10	11	14	15	16	17	18	21	22	23	24	25	28	29	30	31	1	4	
1	Руководитель, Инженер	2	1	2																								
			1	2																								
2	Руководитель, Инженер	2	3	4	7	8																						
			3	4	7	8																						
3	Руководитель, Инженер	2	7	8																								
			7	8																								
4	Руководитель, Инженер	2	9	10																								
			9	10																								
5	Руководитель, Инженер	2	11	14																								
			11	14																								
6	Руководитель, Инженер	4	15	16	17	18																						
			15	16	17	18																						
7	Руководитель, Инженер	2	21	22																								
			21	22																								
8	Руководитель, Инженер	3	23	24	25																							
			23	24	25																							
9	Инженер	6	28	29	30	31	1	4																				
			28	29	30	31	1	4																				



- электрики;



- руководитель.

Календарный план разработки проекта составлен с учетом всех выходных и праздничных дней. На разработку данного проекта потребуется 25 рабочих дней.

5.2.2 Планирование пуско-наладочных работ (ПНР)

Пуско-наладочные работы являются завершающим этапом ввода в эксплуатацию объекта. Работы выполняются квалифицированными специалистами по заранее разработанным программам. ПНР должны обеспечивать проверку и испытание электрооборудования в соответствии с действующими правилами устройства электроустановок, технической документацией предприятия-изготовителя, а также получение заданных проектом электромеханических параметров работы оборудования.

Результат испытаний, входящих в комплекс наладки электроустановок, оформляются в виде протоколов установленной формы, которые прикладываются к акту сдачи объекта в эксплуатацию.

В таблице 24 составлена план ПНР.

Таблица 24 – план ПНР

№	Состав работы	Трудоемкость, дни
1	Подготовительные работы	5
2	Пуско-наладочные работы	7
3	Комплексное опробование	3
4	Оформление отчетной документации; сдача объекта в эксплуатацию	5
	Общий срок монтажа	20

Далее в таблице 25 представлен список ПНР.

Таблица 25 – Содержание ПНР

№ п.	Содержание работы	Исполнитель	Дни
1	- ознакомление с документацией проекта, паспортами монтируемого оборудования	- руководитель; - электрики	3
	- подготовка оборудования и инструмента	- электрики	2
2	- монтаж оборудования	- электрики	3
	- настройка параметров двигателя и ПЧ	- электрики	2
	- проверка системы управления в холостую	- руководитель; - электрики	2
3	- проверка системы управления под нагрузкой	- руководитель; - электрики	2
	- корректировка параметров СУ	- электрики	1
4	- составление протоколов ПНР	- руководитель; - электрики	2
	- внесение изменений в ПНР, выявленных во время работ	- электрики	2
	- сдача объекта в эксплуатацию	- руководитель; - электрики	1

5.2.3 Состав бригады для проведения ПНР

Количество членов бригады регламентируется требованиями к ПНР:

1. ПНР кранового оборудования характеризуются особенностями монтажа кранового оборудования, а также опасностью падения с высоты;
2. По правилам эксплуатации и настройки электрооборудования напряжением до 1000 В запрещаются работы на оборудовании, находящемся под напряжением, менее чем двум членам бригады.

Состав бригады, проводящей ПНР, приведён в таблице 26.

Таблица 26 – Состав бригады, выполняющей ПНР

	Состав бригады	Категория
1	электрик – бригадир	4
2	электрик	4
3	электрик	4

Далее составляем календарный план пуско-наладочных работ в виде диаграммы Ганта (таблице 27).

Календарный план ПНР составлен с учетом всех выходных праздничных дней. На пуско-наладочный работы потребуется 20 рабочих дней. Результат испытаний ПНР обеспечивают работу электрооборудования в соответствии с действующими правилами устройства электроустановок, технической документацией предприятия-изготовителя.

Всего на разработку и ПНР проекта потребуется 45 рабочих дней, которые выполнят 5 человек: руководитель, инженер и бригада электриков.

Таблица 27 – Календарный план разработки проекта

№	Вид работы	Исполнитель	Т _к	Апрель																			Май
				5	6	7	8	11	12	13	14	15	18	19	20	21	22	25	26	27	28	29	4
1	- ознакомление с документацией проекта, паспортами монтируемого оборудования	рук-ль; электрики	3	■	■	■																	
	- подготовка оборудования и инструмента	электрики	2	■	■		■	■															
2	- монтаж оборудования	электрики	3						■	■	■												
	- настройка параметров двигателя и ПЧ	электрики	2								■	■											
	- проверка системы управления в холостую	рук-ль; электрики	2										■	■									
3	- проверка системы управления под нагрузкой	рук-ль; электрики	2													■	■						
	корректировка параметров СУ	электрики	1														■						
	- составление протоколов ПНР	рук-ль; электрики	2															■	■				
4	- внесение изменений в ПНР, выявленных во время работ	электрики	2															■	■	■	■		
	- сдача объекта в эксплуатацию	рук-ль; электрики	1																			■	
																						■	



- инженер;



- руководитель.

5.3. Расчет бюджета проектной работы

Осуществление проектной работы потребует расчеты следующих пунктов затрат:

- материальные затраты (затраты на канцелярию и на литературу);
- капитальные затраты (специальное и дополнительное оборудование, стоимость монтажных и пусконаладочных работ, а также транспортные расходы и накладные расходы);
- расчет заработной платы исполнителей проекта;
- расчет пенсионных и страховых расходов;
- расчет накладных расходов;
- расчет расходов при эксплуатации электропривода лифта;
- расчет амортизационных отчислений;
- расчет заработной платы обслуживающего персонала.

5.3.1 Расчет бюджета по НИР

Расчет материальных затрат осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1+k_m) * \sum_{i=1}^m C_i * N_{расхi},$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при разработке проекта;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию при разработке проекта

C_i – цена приобретения i -го вида потребляемых материальных ресурсов;

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы (15 % от стоимости).

$$Z_m = (1+0,15)*(1,1*150 + 1*900 + 2*50 + 4*10 + 10*10 + 1*830 + 2*750) = 4180 \text{ руб.}$$

В таблице 28 указаны материальные затраты проектной работы.

Таблица 28 – Материальные затраты проектной работы

Наименование	Кол-во		Цена за ед., руб.		Затраты Z_m , руб	
	1	2	1	2	1	2
Бумага	150	-	1,1	-	190	-
Картридж	1	-	900	-	1035	-
Тетрадь общая	1	1	50	50	57,5	57,5
Ручка	1	3	10	10	11,5	34,5
Карандаш строительный	-	10	-	10	-	115
Дополнительная литература	1	2	830	750	955	1725
Итого					4180	
1 – инженер						
2 – электрики						

Получаем сумму материальных затрат для обеспечения бригады электриков и руководителя необходимой литературой и прочими принадлежностями равную 4180 руб, так как сумма незначительная, то отнесем к прочим расходам.

5.3.2 Расчет бюджета на реализацию проекта

Данный расчет включает в себя такие затраты, как контрольно-измерительное оборудование, программное обеспечение, непосредственно проектируемое оборудование и др., рассчитывается по аналогичное формуле расчета бюджета проектной работы.

В таблице 29 приведены данные о капитальных затратах выполняемой работы.

Таблица 29 – Капитальные затраты

№	Наименование	Цена за ед., руб.
1	- коммутирующая аппаратура;	9028
	- электродвигатель ^[http://www.etm.ru/cat/nn/6475168/] ;	19500
	- преобразователь частоты ^[http://danfoss.ru/] ;	85000
	- прочие расходы (кабеля, изолирующие материалы, клеммы, метизы и др.)	50000
	Итого по разделу 1	163528
2	- стоимость монтажных и пусконаладочных работ (8% от р.1)	13082
3	- транспортные расходы (3% от р.1+р.2)	5298
	Общая стоимость проекта по закупке, монтажу и доставке оборудования	181908

Расчет капитальных вложений проводился с учетом цен действительных на 16.02.16г.

Конечная сумма капитальных затрат на приобретение выбранного оборудования составила 181908 руб.

5.3.3 Расчет заработной платы исполнителей проекта

Руководитель, инженер, а также бригада электриков имеют повременную оплату труда, пятидневный график работы и восьмичасовой рабочий день.

Инженер имеет оклад 9250 руб..

Руководитель имеет оклад 13500 руб..

Электрик 4 разряда имеет ставку 54,75 руб./час.

Расчет основной заработной платы инженера:

$$ЗП_{инж.} = (З_{ок} + k_{пр} + k_c) * k_p,$$

где $З_{ок} = 9250$. – оклад;

$k_{пр}$ – премия (20% от оклада);

$k_p = 1,3$ – районный коэффициент;

$k_c = 3500$ руб. – надбавка за сверхурочную работу;

$$ЗП_{инж.} = (9250 + 1850 + 3500) * 1,3 = 18980 \text{ руб./мес.}$$

Расчет дневной заработной платы инженера:

$$ЗП_{инж.д.} = \frac{ЗП_{инж.}}{F_d},$$

где $F_d = 23$ дня – количество рабочих дней в месяце;

$$ЗП_{инж.д.} = \frac{18980}{23} = 825,2 \text{ руб./день.}$$

Расчет заработной платы разработчика проекта за период работы:

$$ЗП_{инж.п.} = ЗП_{инж.д.} * F_{пер},$$

где $F_{пер} = 25$ дней – период работы разработчика проекта;

$$ЗП_{разр.пер.} = 825,2 * 25 = 20630 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы руководителя:

$$ЗП_r. = (З_{ок} + k_{np} + k_c) * k_p,$$

$$ЗП_r. = (13500 + 2700 + 3500) * 1,3 = 25610 \text{ руб./мес.}$$

Расчет дневной заработной платы руководителя:

$$ЗП_{р.д.} = \frac{ЗП_r.}{F_d},$$

$$ЗП_{р.д.} = \frac{25610}{23} = 1113,5 \text{ руб./день}$$

Расчет заработной платы руководителя за период работы:

$$ЗП_{р.п.} = ЗП_{р.д.} * F_{пер},$$

где $F_{пер} = 45$ дней – период работы руководителя;

$$ЗП_{разр.пер.} = 1113,5 * 45 = 50107,5 \text{ руб.}$$

Т.к. при монтаже нового оборудования работает коллектив электриков, то один из них должен быть бригадиром. Расчет основной заработной платы электрика – бригадира:

$$ЗП_{эл.б.} = (З_c * F_d * t + k_{np} + k_b) * k_p,$$

где $k_b = 1800$ руб. – надбавка за бригадирство;

$З_c = 54,75$ руб./час – часовая ставка электрика 4 р;

$t = 8$ ч. – продолжительность рабочего дня;

$$ЗП_{эл.б.} = (54,75 * 23 * 8 + 2014,8 + 1800) * 1,3 = 18055,4 \text{ руб./мес.}$$

Расчет дневной заработной платы электрика - бригадира:

$$ЗП_{эл.б.д.} = \frac{ЗП_{эл.б.}}{F_d},$$

$$ЗП_{эл.5р.д.} = \frac{18055,4}{23} = 785 \text{ руб./день.}$$

Расчет заработной платы электрика – бригадира за период работы:

$$ЗП_{эл.б.п.} = ЗП_{эл.б.д.} * F_{пер},$$

где $F_{пер} = 20$ дней – период работы электрика – бригадира;

$$ЗП_{эл.5р.п.} = 785 * 20 = 15700 \text{ руб.}$$

Расчет основной заработной платы электрика:

$$ЗП_{эл.} = (З_c * F_d * t + k_{np} + k_{сл}) * k_p,$$

где $k_{сл} = 1000$ руб. – надбавка за сложность работы;

$$ЗП_{эл.} = (54,75 * 23 * 8 + 2014,8 + 1000) * 1,3 = 15706,6 \text{ руб./мес.}$$

Расчет дневной заработной платы электрика:

$$ЗП_{эл.д.} = \frac{ЗП_{эл.}}{F_d},$$

$$ЗП_{эл.д.} = \frac{15706,6}{23} = 682,9 \text{ руб./день.}$$

Расчет заработной платы электрика период работы:

$$ЗП_{эл.п.} = ЗП_{эл.д.} * F_{пер},$$

$$ЗП_{эл.4р.пер.} = 682,9 * 20 = 13658 \text{ руб.}$$

Т.к. электриков двое, то их оплата за весь период работы будет составлять 27316 руб.

В таблице 30 приведены сведения о з.п. всех исполнителей проекта:

Таблица 30 – З.п. исполнителей проекта

Должность	Основная з.п., руб.	Дневная з.п., руб.	З.п. за период,руб.
Инженер	18980	825,2	20630
Руководитель	25610	1113,5	50107,5
Электрик – бригадир	18055,4	785	15700
Электрик	15706,6	682,9	13658
Электрик	15706,6	682,9	13658
Итого			113753,5
Итого на IV квартал 2017			2129465,52

Таким образом, на заработную плату всех исполнителей проекта с учетом индекса изменения сметной стоимости на IV квартал 2017 года необходимо выделить 2129465,52 руб.

5.3.4 Расчет отчислений во внебюджетные фонды

Величина отчислений в пенсионный и страховой фонд рассчитывается по формуле:

$$Z_{внеб} = k_{внеб} * ZП_о,$$

где $k_{внеб}$ – коэффициент отчислений на уплату пенсионных и страховых отчислений (в 2018 году $k_{внеб} = 26\%$);

$ZП_о = 2129465,52$ руб. – заработная плата всех исполнителей за весь период разработки и монтажа;

$$Z_{внеб} = 0,26 * 2129465,52 = 553661 \text{ руб.}$$

5.3.5 Расчет накладных расходов

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$Z_{накл} = (Z_м + Z_к + ZП_об + Z_{внеб}) * k_{нр},$$

где $k_{нр} = 45\%$ - коэффициент учитывающий накладные расходы;

$$Z_{накл} = (4180 + 181908 + 2129465,52 + 553661) * 0,45 = 1291146,4 \text{ руб.}$$

5.3.6 Формирование бюджета по монтажу и ПНР лифта

В таблице 31 показана общая стоимость затрат по монтажу и ПНР.

Таблица 31 – Затраты на монтаж и ПНР

Наименование затрат	Сумма затрат, руб.
Бюджет по НИР (прочие)	4180
Капитальные затраты	181908
Заработная плата исполнителей	2129465,52
Отчисления во внебюджетные фонды (26% от п.3)	553661
Накладные расходы (45 % от п.1+...+4)	1291146,4
Итого	4160360,92

Таким образом, затраты предприятия составили 4160360,92руб., из которых 181908 руб. на закупку и доставку оборудования, 2129465,52 руб. на оплату персонала предприятия, 1291146,4руб. были затрачены на накладные расходы и отчисления в пенсионный и страховой фонды.

5.3.7 Расчет расходов при эксплуатации электропривода

Расходы при эксплуатации установленного электропривода включают в себя: расходы на электроэнергию; заработная плата обслуживающего персонала; амортизационные отчисления.

Расчет силовой электроэнергии, используемой для питания привода рабочего механизма

Силовая электроэнергия рассчитывается по формуле:

$$W_{\text{сил.эн}} = \frac{P_{\text{уст}} * F_{\text{д}} * k_{\text{м}} * k_{\text{е}} * k_{\text{з}}}{k_{\text{дв}} * k_{\text{с}}},$$

где $P_{\text{уст}}$ – мощность установленного оборудования, кВт;

$F_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд времени работы оборудования, час;

$k_{\text{м}}$ – коэф. одновременного использования электродвигателей (0.7);

k_b – коэф. использования оборудования по машинному времени (0.7);

k_z – средний коэф. загрузки оборудования (0.8);

k_c – коэф., учитывающий потери в сети (0.93);

$k_{дв}$ – коэф., учитывающий потери в двигателях (0.95).

$$W_{\text{сил.эн}} = \frac{18,5 \cdot 2000 \cdot 0,7 \cdot 0,7 \cdot 0,8}{0,93 \cdot 0,95} = 16417 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Затраты на силовую энергию в денежном выражении рассчитывается:

$$C_{\text{эл}} = W_{\text{сил.эн}} \cdot C_3,$$

где C_3 – стоимость одного кВт·ч электроэнергии для промышленных предприятий (одноставочный тариф на потребляемую электроэнергию составляет 2,74 руб./кВт·ч);

$$C_{\text{эл}} = 16417 \cdot 2,74 = 44982,6 \text{ руб./год}.$$

5.3.8 Расчет амортизационных отчислений

Годовые амортизационные отчисления рассчитываются на основе норм амортизации, по следующему выражению:

$$A_{\text{год}} = K \cdot \frac{H_A}{100},$$

где K – капитальные вложения в электрооборудование;

H_A – проценты отчислений на амортизацию (для электродвигателей норма амортизации составляет 9,6%)

$$A_{\text{год}} = 19500 \cdot \frac{9,6}{100} = 1872 \text{ руб.}$$

Для преобразователя частоты норма амортизации составляет 6,4 %:

$$A_{\text{год}} = 85000 \cdot \frac{6,4}{100} = 5440 \text{ руб.}$$

Для общей системы электропривода норма амортизации составляет 9,6%:

$$A_{\text{год}} = 181908 \cdot \frac{9,6}{100} = 17463,2 \text{ руб.}$$

5.3.9 Расчет заработной платы обслуживающего персонала

Оплата труда электрика включает в себя основную и дополнительную заработную плату.

Оклад дежурного электромонтера 5 р., обслуживающего лифты, составляет 12330 руб.

Расчет основной заработной платы электрика:

$$ЗП_{эл.} = (З_c * F_d * t + k_{np} + k_{сл}) * k_p,$$

где $k_{сл} = 1000$ руб. – надбавка за сложность работы;

$$ЗП_{эл.} = (54,75 * 23 * 8 + 2014,8 + 1000) * 1,3 = 15706,6 \text{ руб./мес.}$$

Расчет дневной заработной платы электрика:

$$ЗП_{эл.д.} = \frac{ЗП_{эл.}}{F_d},$$

$$ЗП_{эл.д.} = \frac{15706,6}{23} = 682,9 \text{ руб./день.}$$

Расчет заработной платы электрика период работы:

$$ЗП_{эл.п.} = ЗП_{эл.д.} * F_{пер},$$

где $F_{пер.} = 247$ дней – количество рабочих дней в 2018 году.

$$ЗП_{эл.4р.пер.} = 682,9 * 247 = 168676,3 \text{ руб./год.}$$

Расчет дополнительной платы электрика:

$$ЗП_{доп.} = 0,15 * ЗП_o,$$

$$ЗП_{доп.} = 0,15 * 277726,8 = 25301,5 \text{ руб.}$$

Суммарная оплата труда электрика:

$$ЗП_{пол.} = ЗП_o + ЗП_{доп.},$$

$$ЗП_{пол.} = 168676,3 + 25301,5 = 193977,8 \text{ руб./год.}$$

Обслуживание электропривода хода телеги козлового крана входит в обязанности оперативно-ремонтного электрика ремонтной службы предприятия «Кузнецкие ферросплавы» и занимают 5% его рабочего времени. Получаем, что оплата труда за обслуживания электропривода хода телеги козлового крана в год составит:

$$ЗП_{обс.эл.} = ЗП_{пол} * 0,05,$$

$$ЗП_{обс.эл.} = 193977,8 * 0,05 = 9699 \text{ руб./год.}$$

5.3.10 Расчет общей суммы эксплуатационных расходов

Общая сумма эксплуатационных расходов рассчитывается по формуле:

$$P_{\text{общ.}} = C_{\text{эл}} + A_{\text{год}} + ЗП_{\text{пол.}}$$

$$P_{\text{общ.}} = 44982,6 + 17463,2 + 9699 = 72144,8 \text{ руб./год.}$$

Таким образом, общие эксплуатационные расходы в год составили 256423,6 руб./год, из которых 44982,6 руб. – затраты на электроэнергию, 17463,2 руб. – амортизационные отчисления и 9699 руб. – заработная плата обслуживающего персонала.

5.4. Определение ресурсосберегающей и экономической эффективности проекта

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

5.4.1 Расчет интегрального финансового показателя

Интегральный финансовый показатель рассчитывается на основании таблицы 1 по формуле:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{\text{р.}i}}{\Phi_{\text{max}}},$$

где $\Phi_{\text{р.}i}$ – стоимость итого варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения проекта;

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}1} = \frac{387402,3}{412378,5} = 0,94;$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}2} = \frac{412378,5}{412378,5} = 1.$$

5.4.2 Интегральный показатель ресурсоэффективности

Интегральный показатель ресурсоэффективности рассчитывается по формуле:

$$I_{\text{рi}} = \sum a^i * b^i,$$

где a^i – весовой коэффициент i -го варианта исполнения разработки;
 b^i – бальная оценка i -го варианта исполнения разработки (устанавливается экспертным путем по выбранной шкале оценивания)

Расчет интегрального показателя ресурсоэффективности приведен в таблице 32.

Таблица 32 – Оценка характеристик вариантов исполнения

Критерии	Весовой коэф.	Исп. 1	Исп. 2
Простота и удобство эксплуатации	0,15	10	10
Помехоустойчивость	0,15	9	8
Энергосбережение	0,25	10	10
Надежность	0,2	10	10
Ремонтопригодность	0,15	10	10
Материалоемкость	0,1	10	9
Итого	1	9,85	9,6

$$I_{исп.1} = 10*0,15 + 9*0,15 + 10*0,25 + 10*0,2 + 10*0,15 + 10*0,1 = 9,85;$$

$$I_{исп.2} = 10*0,15 + 8*0,15 + 10*0,25 + 10*0,2 + 10*0,15 + 9*0,1 = 9,6;$$

5.4.3 Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения проекта

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения проекта лифта определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{исп.i} = \frac{I_{р-исп.i}}{I_{финр}^{исп.i}},$$

$$I_{исп.1} = \frac{9,85}{0,94} = 10,48;$$

$$I_{исп.2} = \frac{9,6}{1} = 9,6.$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта рассчитывается по формуле:

$$\mathcal{E}_{cp.i} = \frac{I_{исп.i}}{I_{исп.max}},$$

$$\mathcal{E}_{cp.исп.1} = \frac{10,48}{10,48} = 1;$$

$$\mathcal{E}_{cp.исп.2} = \frac{9,6}{10,48} = 0,92.$$

Таблица 33 – Сравнительная эффективность проекта

№	Показатель	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель проекта	0,94	1
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности проекта	9,85	9,6
3	Интегральный показатель эффективности проекта	10,48	9,6
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0,92

Сравнение значений финансовой эффективности и ресурсоэффективности указывает на первый вариант исполнения, как наиболее эффективный, с использованием ПЧVLT 5023 Danfoss. Использование выбранного ПЧ позволило снизить потребляемую мощность электропривода телеги крана с 129 кВт до 80 кВт; позволило плавно регулировать значение нагрузки на двигатель, что приводит к уменьшению нагрузки на механическую часть крана, а также к повышению производительности и сроку службы крана.

В экономической части ВКР было проведено экономическое обоснование выбранного оборудования и принятого способа управления механизмом передвижения телеги хода моста козлового крана. Согласно полученной величине общей оценки качества, подтверждена необходимость

замены старой системы управления, и высокая эффективность системы частотного регулирования.

Также было проведено планирование и составлены графики проектных и пусконаладочных работ. Всего потребуется 45 рабочих дней на реализацию проекта.

Составлена смета затрат на проектирование. Проведен расчет капитальных и амортизационных вложений, расчет заработной платы исполнителей проекта и обслуживающего персонала, также были рассчитаны эксплуатационные и накладные расходы. Величина затрат на реализацию проекта составила 4160360,92 рублей.

На основании расчета интегрального показателя разработанного проекта, а также по итогам сравнения финансовой и ресурсоэффективности наиболее эффективным получается первый электропривод с преобразователем частоты VLT 5023 Danfoss.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
3-5Г3А1	Маленко Максиму Тимофеевичу

Школа	Инженерная школа энергетики	Отделение	Электроэнергетики и электротехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	Электроэнергетика и электротехника

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Рабочая зона – электропривод козлового крана в помещении тележки моста.
--	---

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<p>1. Производственная безопасность</p> <p>1.1. Анализ выявленных вредных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – физико-химическая природа вредности, её связь с разрабатываемой темой; – действие фактора на организм человека; – приведение допустимых норм с необходимой размерностью (со ссылкой на соответствующий нормативно-технический документ); – предлагаемые средства защиты; – (сначала коллективной защиты, затем – индивидуальные защитные средства). <p>1.2. Анализ выявленных опасных факторов при разработке и эксплуатации проектируемого решения в следующей последовательности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – механические опасности (источники, средства защиты); – термические опасности (источники, средства защиты); – электробезопасность (в т.ч. статическое электричество, молниезащита – источники, средства защиты); – пожаровзрывобезопасность (причины, профилактические мероприятия, первичные средства пожаротушения). 	<p>1. Анализ вредных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> – отклонение параметров микроклимата; – защита от шума и вибрации; – производственное освещение. <p>2. Анализ опасных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> – поражение электрическим током; – механические травмы; – термический ожог.
<p>2. Экологическая безопасность:</p> <ul style="list-style-type: none"> – защита селитебной зоны – анализ воздействия объекта на атмосферу (выбросы); – анализ воздействия объекта на гидросферу (сбросы); – анализ воздействия объекта на литосферу (отходы); 	<p>Анализ воздействия на литосферу (отходы) в процессе работы козлового крана на предприятии.</p>

<ul style="list-style-type: none"> – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. 	
<p>3. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</p> <ul style="list-style-type: none"> – перечень возможных ЧС при разработке и эксплуатации проектируемого решения; – выбор наиболее типичной ЧС; – разработка превентивных мер по предупреждению ЧС; – разработка действий в результате возникшей ЧС и мер по ликвидации её последствий. 	<p>Наиболее вероятной ЧС является пожар. Разработка превентивных мер, действий во время ЧС. (источники, необходимое оснащение, эвакуация людей, пожарно-профилактические мероприятия).</p>
<p>4. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</p> <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Анализ правовых норм трудового законодательства, организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.</p>

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Мезенцева Ирина Леонидовна			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
3-5ГЗА1	Маленко Максим Тимофеевич		

6. Социальная ответственность

6.1 Введение.

Безопасность жизнедеятельности (БЖД) представляет собой область научных знаний, охватывающих теорию и практику защиты человека от опасных и вредных факторов в среде обитания, во всех сферах человеческой деятельности, в том числе и на производстве.

Козловой кран предназначен для разгрузки хлыстов или деревьев с лесовозного транспорта, при создании запасов на нижних складах леспромхозов, для подачи их к раскряжёвочным агрегатам, а также для погрузки на лесовозный транспорт и других погрузо-разгрузочных работ.

6.2 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Грузоподъёмный кран ЛТ-62 в соответствии с Федеральным законом 116 ФЗ относится к опасным производственным объектам. Наиболее травмоопасными факторами являются механические и электрические.

Опасные и вредные производственные факторы [1] подразделяются на следующие группы: физические, химические, биологические, психофизиологические.

К опасным физическим производственным факторам на кранах относятся: движущиеся части механизмов, механизмы подъёма и передвижения, перемещаемые грузы. К вредным производственным факторам относятся: повышенная или пониженная температура рабочей зоны; высокая скорость движения воздуха (например, 15м/с); влажность воздуха, недостаточная освещённость рабочих мест, проходов и проездов.

Исследуемый электропривод работает в помещении тележки моста, которое можно характеризовать как помещение особо опасное, вследствие наличия двух условий, создающих повышенную опасность:

- сырости или проводящей пыли;
- токопроводящих полов.

6.2.1 Микроклимат рабочей зоны

Неблагоприятные условия окружающей среды вредно воздействуют на организм работающего, снижают реакцию, повышают утомленность. К таким условиям относятся:

- неблагоприятный микроклимат;
- производственные пыли;
- вредные газы и пары;
- недостаточная освещенность.

Для обеспечения санитарно — гигиенических условий на рабочем месте и обеспечения требований нормативных документов к выявленным вредным факторам, предусмотрены такие технические устройства, как вентиляция помещения с фильтрацией воздуха, системы отопления и освещения, изоляции токопроводящих полов. Категория выполняемых работ по [11] - П б.

К категории Пб (средней тяжести физические работы) относятся; работы, связанные с ходьбой, перемещением и переноской тяжести до 10 кг и сопровождающиеся умеренным физическим напряжением.

Для данной категории работ микроклимат производственного помещения характеризуется следующими показателями:

- температура воздуха $15^{\circ} \div 27^{\circ} \text{C}$ - холодный период года, $16^{\circ} \div 27^{\circ} \text{C}$ - в теплый период года;
- влажность воздуха $40 \div 60 \%$;
- скорость движения воздуха $0,2 \div 0,3 \text{ м/с}$

Система вентиляции - механическая, приточно-вытяжная. Она обеспечивает выполнение данных требований.

Система отопления электрическая: на стенах установлены электрические печи, работающие в системе с тепловым реле.

Площадь помещения удовлетворяет требованиям, то есть более 4,5 м² на одного человека.

6.2.2 Защита от шума и вибрации

Основные производственные процессы, сопровождающиеся шумом, — это работа электроприводов крана.

Говоря о действии шума на организм, следует иметь в виду, что он оказывает как местное, так и общее воздействие. При этом учащается пульс, дыхание, повышается артериальное давление, изменяются двигательная и секреторная функции желудка и других органов. Неблагоприятно отражается шум на нервной системе, вызывая головные боли, бессонницу, ослабление внимания, замедление психических реакций, что в конечном счете приводит к понижению работоспособности.

Длительное воздействие вибрации на организм человека приводит к серьезным последствиям под названием «вибрационная болезнь». Это профессиональная патология, которая возникает в результате длительного влияния на организм человека производственной вибрации, превышающей предельно допустимый уровень.

Для защиты от шума и вибрации по [6] предусматриваются:

- обеспечение персонала индивидуальными средствами защиты по ГОСТ 12.4.011 – 89;
- установка звукоизолирующих кабин;
- звукоизолирующие кожухи и экраны;
- виброизолирующие материалы под оборудование (пружины, резины и другие прокладочные материалы).

6.2.3 Производственное освещение

Согласно [15] примем при производстве работ на кране следующие показатели:

- характеристика работ - средней точности;
- разряд зрительной работы - 1У в (наименьший размер объекта различения 1 мм);

- освещенность искусственного освещения - 200 лк при общем освещении.

Помещение, в котором производятся работы, не является помещением с постоянным пребыванием людей, поэтому естественное освещение не нормируется.

6.3 Электробезопасность

Анализ электротравматизма показывает, что большинство несчастных случаев с работниками, обслуживающими электроустановки, происходит в результате потери им ориентировки при осмотрах, ремонтах и испытании. Электрические блокировки являются наиболее надёжным средством защиты обслуживающего персонала от поражения электрическим током. Они препятствуют доступу работающих к токоведущим частям электроустановок, находящихся под напряжением. Ограничители так же как электрические блокировки, служат для защиты людей и оборудования при неправильных действиях в процессе работы. Сигнализация является средством, позволяющим работникам ориентироваться в случае аварийной ситуации и принять необходимые меры предосторожности. На кранах обычно применяют звуковую сигнализацию, срабатывающую при сильном ветре. защиты от травмоопасных и вредных производственных факторов на козловом кране являются приборы и устройства безопасности: ограничители грузоподъёмности – осуществляют ограничение грузоподъёмности при помощи конечных выключателей типа ВК-300А, установленных на ограничителях, см. рис.1.; ограничители крайнего верхнего положения траверсы – осуществляют два конечных выключателя типа ВУ-250М или четыре ВПК-1110, соединёнными с валами грузовых лебёдок; ограничитель концов рабочего участка рельсового пути при передвижении козлового крана – осуществляет ограничение пути крана конечным выключателем типа КУ-701; блокировка двери кабины – препятствует включению козлового крана в работу при открытой двери кабины, осуществляется конечным выключателем ВПК-1110.

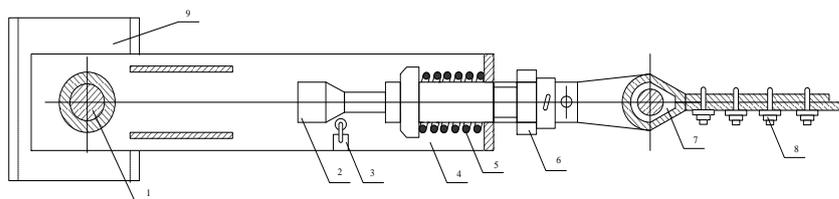


Рисунок 51 – Крепление конца каната на барабане грузовой лебёдки

(1 – ось на балке ригеля; 2 – регулирующий винт настройки конечного выключателя(толкатель); 3 – конечный выключатель; 4 – корпус; 5 – пружина; 6 – гайка нажатия пружины; 7 – коуш; 8 – зажим винтовой; 9 – торцевая балка ригеля; 10 – барабан грузовой лебёдки)

Нулевая блокировка (блокировка от самопуска электродвигателей) – препятствует включению двигателей в работу после выхода из аварийной ситуации или ремонта, если контроллеры не установлены в нулевое положение, осуществляется при помощи нулевых контактов контроллеров КГ-К10, КД-К10, КТ-К12, включенных в цепь питания катушки главного контактора.

При превышении на 10% установленной грузоподъёмности козлового крана пружина ограничителя грузоподъёмности сжимается, происходит срабатывание выключателя и отключается контактор-реверса движения «Подъём» - ПВ1. Ограничение концов рабочего участка передвижения тележки осуществляется конечным выключателем типа ВУ-250М или двумя путевыми выключателями типа ВПК-1110. Конечный выключатель соединён с валом лебёдки передвижения тележки. При повороте барабана лебедки на определённое количество оборотов, что соответствует крайнему положению лебёдки: «вперёд» или «назад», происходит срабатывание конечного выключателя, контакт «ВК1-1» или «ВК2-1» размыкается и включается контактор защитной панели.

Блокировка двери кабины, препятствующая работе на козловом кране при открытой двери осуществляется конечным выключателем «ВК4» (типа ВПК-1110). Контакт конечного выключателя «ВК4» включен в цепь питания катушки контактора защитной панели. При открытой двери, контакт «ВК4» разомкнут и работать на кране невозможно. Таким образом, приборами

безопасности для козлового крана являются: ограничители грузоподъёмности, конечные выключатели для крайнего положения траверсы и выключатели для ограничения конца рабочего пути, выключатель блокировки двери кабины.

6.3.1 Средства защиты от поражения электрическим током.

Средства защиты от поражения электрическим током согласно [2], делятся на основные и дополнительные. Основные изолирующие электротехнические средства обладают изоляцией, способной выдерживать рабочее напряжение установки, поэтому ими разрешается касаться токоведущих частей, находящихся под напряжением. К основным средствам защиты от поражения электрическим током относятся:

в электроустановках до 1000В: диэлектрические перчатки; изолирующие штанги; изолирующие и электроизмерительные клещи; слесарно-монтажный инструмент с изолирующими рукоятками; указатели напряжения;

К дополнительным средствам защиты до 1000В относятся: диэлектрические галоши; диэлектрические ковры; изолирующие подставки.

6.3.2 Защитное заземление

В качестве защитного средства от поражения электротоком также применяется защитное заземление. Цель защитного заземления – снизить до безопасной величины напряжение на металлических частях оборудования, нормально не находящихся под напряжением, но могущих оказаться под напряжением вследствие нарушения изоляции электроустановок. Все металлические нетоковедущие части электрооборудования крана: корпуса электродвигателей, контроллеров, конечных выключателей и остальной аппаратуры, а также металлические трубы электропроводок заземляются на металлическую конструкцию крана. Заземление осуществляется перемычками из гибкого медного провода. Для заземления металлоконструкции крана рельсовые пути должны быть заземлены на собственный контур заземления не более 4 Ома (для установок до 1000В). Для выполнения этого условия выполним расчёт заземления. Расчёт заземления сводится к определению

длины горизонтального заземлителя (обвязка) и числа вертикальных заземлителей (стержней) при заданных условиях.

6.3.3 Расчёт искусственного заземления

Данные для расчёта приведены в таблице 25

Таблица 24 – Данные для расчёта

Тип заземления	Длина, l, м	Диаметр, d, мм	Глубина заложения заземлителя, H ₀ , м	Расстояние между одинарными заземлителями, а, м	Удельное сопротивление грунта для супеска, ρ _{гр} , Ом · м	Доп. сопр. R _з , Ом
Стальная труба	2,5м	50мм	0,8м	2,5м	400 Ом · м	4 Ом

Тип обвязки вертикальных заземлителей, расположенных по контуру: стальная полоса. Определим общее сопротивление одиночных заземлителей для вертикально заглублённых в грунте и глубину заложения середины электрода от поверхности грунта:

$$R_{об} = \frac{\rho_{гр}}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{4H+1}{4H-1} \right);$$

$$H = 0,8 + \frac{1}{2} 2,5 = 2,05\text{м};$$

$$R_{об} = \frac{400}{2 \cdot 3,14 \cdot 2,5} \left(\ln \frac{2 \cdot 2,5}{0,05} + \frac{1}{2} \ln \frac{4 \cdot 2,05 + 1}{4 \cdot 2,05 - 1} \right) = 120\text{ом}, \quad (8.3)$$

где l, d и H – длина, диаметр и глубина заложения середины электрода от поверхности грунта, м.

Так как общее сопротивление заземлителя больше допустимого, то необходимо принять несколько заземлителей. Определим количество заземлителей по формуле:

$$n = \frac{R_{об}}{R \cdot \eta_B} = \frac{120}{4 \cdot 0,72} = 42\text{шт.},$$

где η_в- коэффициент использования вертикальных заземлителей, определяемый из таблицы 4.

Примем η_в = 0,72 при размещении по контуру.

Коэффициенты использования η_B заземлителей из труб или уголков без учёта влияния полосы связи приведены в таблице 26

Таблица 25 – Данные коэффициента η_B

Отношение расстояния между трубами (уголками к их длине)	При размещении в ряд		При размещении по контуру	
	Число труб (уголков)	η_B	Число труб (уголков)	η_B
1	2	0,84-0,87	4	0,66-0,72
	3	0,76-0,8	6	0,58-0,65
	5	0,67-0,72	10	0,52-0,58
	10	0,56-0,62	20	0,44-0,5
	15	0,51-0,56	40	0,38-0,44
	20	0,47-0,5	60	0,36-0,42

Коэффициенты использования η_{Γ} параллельно уложенных полос приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Данные коэффициента η_{Γ}

Длина каждой полосы, м	Число параллельных полос	Расстояние между параллельными полосами, м				
		1	2,5	5	10	15
15	2	0,56	0,65	0,75	0,80	0,85
	15	0,37	0,49	0,60	0,73	0,79
	10	0,25	0,37	0,49	0,64	0,72

Определим сопротивление соединительной полосы заземлителей в грунте по формуле:

$$R_{\text{пол}} = \frac{\rho_{\text{гр}}}{2\pi l_{\text{пол}}} \ln \frac{2l_{\text{пол}}^2}{b \cdot H_0}, \quad l_{\text{пол}} = 1,05 \cdot a \cdot (n - 1),$$

где a – расстояние между заземлителями, ;

n – количество заземлителей, принимаемое из расчёта;

$l_{\text{пол}}$ – длина соединительной полосы.

Примем $a = 1$ м, тогда $\eta_{\Gamma} = 0,25$ при числе полос: $n_{\text{п}} = 10$.

Длина полосы равна:

$$l_{\text{пол}} = 1,05 \cdot 1 \cdot (42 - 1) = 43,05 \text{ м}.$$

Сопротивление соединительной полосы:

$$R_{\text{пол}} = \frac{400}{2 \cdot 3,14 \cdot 43,05} \ln \frac{2 \cdot 43,05^2}{0,02 \cdot 0,8} = 17,2 \text{ Ом.}$$

Определим общее сопротивление заземляющего устройства (заземлителей и соединительных полос) по формуле:

$$R_{\text{общ}} = \frac{R_{\text{об}} \cdot R_{\text{пол}}}{R_{\text{об}} \cdot \eta_{\text{пол}} + R_{\text{пол}} \cdot \eta_{\text{в,г}} \cdot n};$$

$$R_{\text{общ}} = \frac{120 \cdot 17,2}{120 \cdot 0,21 + 17,2 \cdot 0,71 \cdot 42} = 3,78 \text{ Ом.}$$

где $\eta_{\text{пол}}$ - коэффициент использования соединительной полосы, определяется по таблице 11, $\eta_{\text{в,г}}$ - коэффициент использования заземлителей ($\eta_{\text{в}} = 0,72$).

При расположении полосы по контуру труб выбираем $\eta_{\text{пол}} = 0,21$.
Полученное значение полного сопротивления защитного заземления

удовлетворяет условию: $R_{\text{общ}} \leq R_3 = 4 \text{ Ом}$.

Защитное заземление представлено на рисунке 52.

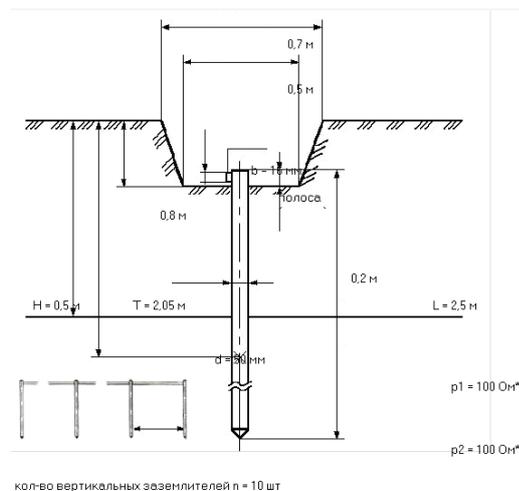


Рисунок 52 – Расчет защитного заземления

6.4 Экологическая безопасность

Рабочий механизм содержит огромное количество компонентов, которые содержат вредные вещества и представляют угрозу, как для человека, так и для окружающей среды.

К таким веществам относятся: свинец (накапливается в организме, поражая почки, нервную систему); никель и цинк (могут вызывать дерматит); щелочи (прожигают слизистые оболочки и кожу).

Поэтому электродвигатель требует специальных комплексных методов утилизации. В этот комплекс мероприятий входят [12]: отделение металлических частей от неметаллических; металлические части переплавляются для последующего производства; неметаллические части подвергаются специально переработке.

6.5 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

6.5.1 Пожарная безопасность

Пожароопасными называются установки, в которых применяются или хранятся горючие вещества.

Согласно классификации кран относится к классу П-111 (расположена в не помещения, в зоне в которой обращаются горючие жидкости с t вспышки 61°C и выше или в зоне, где хранятся твердые горючие вещества) [9].

Для обеспечения безопасности при пожаре на кране - перегружателе предусмотрены:

- система оповещения о пожаре;
- система автоматической пожарной сигнализации;
- первичные средства пожаротушения.

Возгорания, пожары и воспламенения часто сопровождаются взрывами и могут быть очень опасными для людей. Поэтому пожарная безопасность является одним из важнейших разделов охраны труда на производстве. Существенную роль в профилактике и предотвращении пожаров играет правильный выбор режима работы электрооборудования с учетом класса размещения по пожароопасности.

Пожарная безопасность должна обеспечиваться: системой предотвращения пожара; системой противопожарной защиты; организационно - техническими мероприятиями.

Автоматические установки пожаротушения и установки пожарной сигнализации должны удовлетворять требованиям проектной документации и отраслевым стандартам. Применяемые на кране переносные углекислотные огнетушители ОУ-5 должны иметь бирки и маркировки и должны быть

окрашены в красный цвет. Перезарядка огнетушителей выполняется в соответствии с инструкцией по безопасности. Огнетушители должны располагаться в заметных и легкодоступных местах и подлежат периодическому обслуживанию, включающему в себя следующее:

- очистка от пыли и грязи;
- восстановление окраски и соответствующих подписей.

Для курения должны быть отведены специальные места, оборудованные средствами пожаротушения, и предусматривающие возможные способы эвакуации людей и оборудования.

При поступлении сигнала противопожарной сигнализации машинист обязан произвести остановку работы, попытаться обесточить кран и приступить к тушению пожара. Если эти действия невозможны из-за сложности пожара, то ему необходимо покинуть рабочее место (кран), уйти в специально отведенное место и сообщить о случившемся старшему смены (бригадиру) и ждать дальнейших указаний.

6.6 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

6.6.1 Специальные правовые нормы трудового законодательства

Обеспечение безопасности на рабочем месте подразумевает собой различные правовые и организационные решения. Для осуществления практической деятельности в области обеспечения безопасности жизнедеятельности необходимо соблюдение нормативов и правил ведения соответствующих работ, позволяющие их обеспечить. Соблюдение рабочего режима, правил ведения работ и т.д.

При решении организационных вопросов следует учитывать антрометрические данные работника.

В течение рабочего дня (смены) работникам в соответствии со ст. 108 [12] предоставляется перерыв для отдыха и питания продолжительностью не более двух часов и не менее 30 минут, который в рабочее время не включается.

Такой перерыв получил название "перерыв на обед", или "обеденный перерыв".

6.6.2 Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны

К работе машинистом козлового крана допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование, проверку знаний требований охраны труда в установленном порядке и получившие допуск к самостоятельной работе.

Рабочее место должно быть организовано в соответствии с требованиями стандартов и должно обеспечивать выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля. Организация рабочего места и конструкция оборудования должны обеспечивать прямое и свободное положение тела работающего или наклон его вперёд не более 15°.

Машинист козлового крана должен:

- убедиться в наличии инвентаря, инструмента и средств защиты (диэлектрических ковриков, галош, перчаток);
- проверить наличие смазки механизмов и в случае необходимости произвести их смазку;
- убедиться в отсутствии на кране и подкрановых путях ремонтного персонала или посторонних лиц, лишнего имущества, которые при движении могут упасть вниз;
- получить ключ-марку, включающий электрическую цепь управления краном;
- получить разрешение на работу краном от лица, ответственного за безопасное производство работ кранами;
- после осмотра крана произвести опробование механизмов на холостом ходу без груза;
- ознакомиться с порядком и габаритами складированного груза, с условиями производства работ.

Заключение

В представленной ВКР был рассчитан и спроектирован регулируемый электропривод перемещения тележки козлового крана на основе системы ПЧ-АД с векторным управлением. На основе заданных максимальных значений массы перемещаемого груза и скорости перемещения тележки крана, был произведен выбор мощности асинхронного двигателя 4А200L4У3. Затем был произведен выбор преобразователя частоты с векторным управлением – VLT5032 «Danfoss».

Рассчитаны параметры схемы замещения двигателя, механические и электромеханические характеристики разомкнутой системы преобразователь частоты – двигатель. На основе полученных характеристик была произведена проверка обеспечения заданной области работы электропривода, проверка правильности выбора двигателя, проверка правильности выбора преобразователя частоты.

Далее на основе схемы замещения и структурной схемы линеаризованной системы автоматического управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода с векторным управлением была выполнена оптимизация имеющихся в системе управления контуров и на основе структурных схем выполнено моделирование САУ в среде MatLAB Simulink.

По итогам оптимизации и моделирования можно сказать, что линеаризованная САУ полностью выполняет требования технического задания.

При выполнении моделирования нелинейной САУ были учтены основные нелинейности элементов системы управления электропривода. Оказалось, что нелинейная система не позволяет полностью обеспечить требования технического задания, поэтому следует сделать вывод о значительном влиянии нелинейности на работу систем управления переменного тока.

Conclusion

An adjustable electric drive of the gantry crane truck carriage based on the vector-controlled IF-AD system is calculated and designed. Based on the set maximum values of the mass of the cargo being moved and the speed of the crane carriage, the power of the induction motor 4A200L4UZ was selected. Then the choice of frequency converter with vector control - VLT5032 "Danfoss" was made.

The parameters of the motor replacement circuit, mechanical and electromechanical characteristics of the open system, frequency converter - motor are calculated. Based on the received characteristics, a check was made to ensure the specified area of operation of the electric drive, checking the correctness of the motor selection, checking the correctness of the selection of the frequency converter.

Further on, based on the substitution scheme and the structural scheme of the linearized system for automatic control of a frequency-controlled asynchronous electric drive with vector control, optimization of the contours available in the control system was carried out and modeling of the ACS in the MatLAB Simulink environment was performed on the basis of the structural schemes.

Based on the results of optimization and modeling, it can be said that the linearized ACS completely fulfills the requirements of the technical assignment.

When performing the simulation of the nonlinear automatic control system, the main nonlinearities of the control system elements of the electric drive were taken into account. It turned out that the non-linear system does not allow to fully satisfy the requirements of the technical specification, therefore, it should be concluded that the nonlinearity has a significant effect on the operation of AC control systems.

Перечень использованных источников

1. Белов М.П., Новиков В.А., Рассудов Л.Н., Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов, М.:Академия, 2004.
2. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Под общ. ред. Копылова И.П. Т.1. М., «Энергоатомиздат», 1988
3. Москаленко В.П. Электрический привод. М., «Высшая школа», 2000.
4. Ланграф С.В., Асинхронный электропривод, ТПУ Томск, 2003 г.
5. Фираго Б.И., Павлячик Л. КПД асинхронного электродвигателя при частотном управлении с различными видами нагрузок//Изв. ВУЗов и энерг. объедин. СНГ. Энергетика. 2001. №3. С 52 –59.
6. Мощинский Ю. А., Беспалов В. Я., Кирякин А. А. Определение параметров схемы замещения асинхронной машины по каталожным данным. – Электричество, 1998.
7. Чернышев А. Ю., Ланграф С. В., Чернышев И. А. Исследование систем «Преобразователь частоты – асинхронный двигатель»: Методические указания. – Томск: Изд. ТПУ, 2003. – 24с.
8. Чернышев А. Ю., Ланграф С. В., Чернышев И. А. Исследование систем скалярного частотного управления асинхронным двигателем: Методические указания. – Томск: Изд. ТПУ, 2003. – 23с.
9. Белов М. П., Новиков В. А., Рассудов Л. Н. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов. М: Издательский центр «Академия», 2004. – 576 с.
10. Яуре А. Г., Певзнер Е.М., Крановый электропривод, справочник, – М.:Энергоатомиздат, 1988 – 342с.: ил.
11. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами, под ред. Круповича, Москва, Энергоатомиздат, 1982г.;

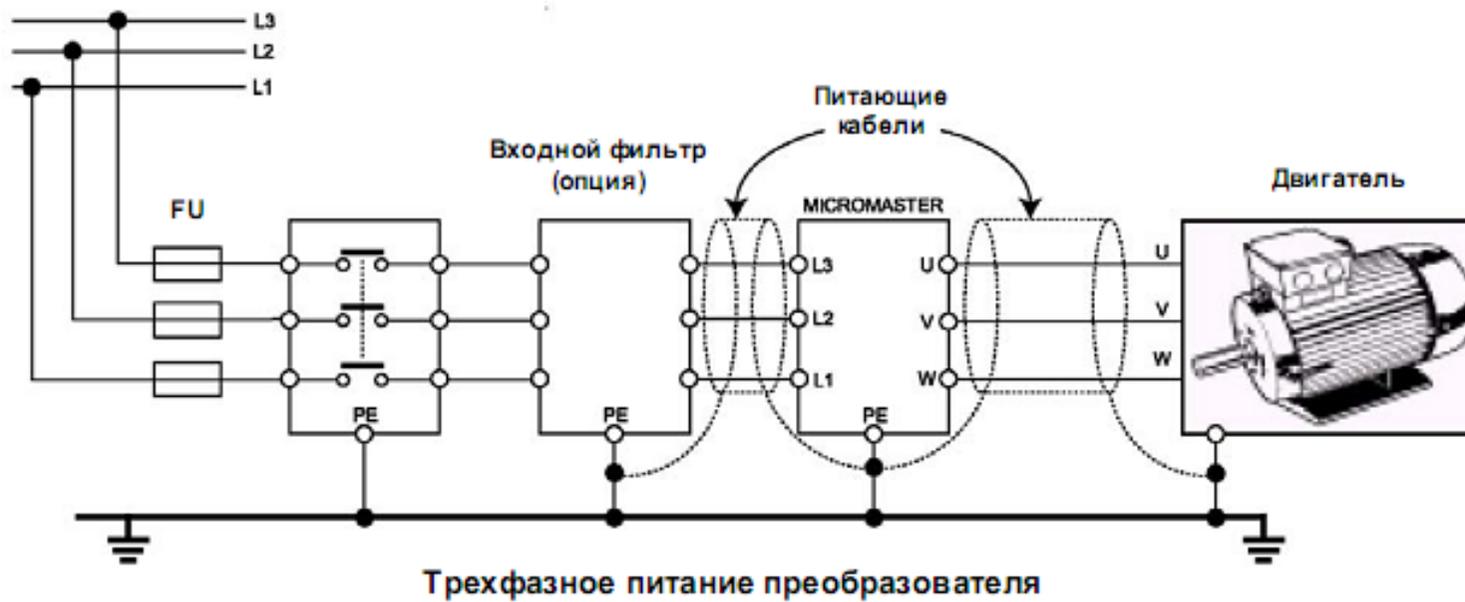
12. Безопасность жизнедеятельности./ Под ред. С.В. Белов. – М.: Высш. шк., 1999. – 448 с.
13. Пожарная безопасность. Взрывобезопасность. Справочник/ Под ред. А.Н. Баратова – М.: Энергия, 1987.
14. Правила устройства электроустановок, М.: Энергоатомиздат, 1999.
15. Алиев И.И. Электротехнический справочник. – 4-е изд., испр. – М.: ИП РадиоСофт, 2002. – 384 с.
16. А.И. Ильин «Экономика предприятия» 2 издание. Новое издание, 2008г.
17. Н.И. Королёва. Организация производства на предприятии: Учебное пособие. Томск Издание ТПУ, 2005г.
18. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Методы поиска новых идей и решений "Методы менеджмента качества" №1 2003 г.
19. Кузьмина Е.А, Кузьмин А.М. Функционально-стоимостный анализ. Экскурс в историю. "Методы менеджмента качества" №7 2002 г.
20. Основы функционально-стоимостного анализа: Учебное пособие / Под ред. М.Г. Карпунина и Б.И. Майданчика. - М.: Энергия, 1980. - 175 с.
21. Скворцов Ю.В. Организационно-экономические вопросы в дипломном проектировании: Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2006. – 399 с.

Приложение А
Графический материал

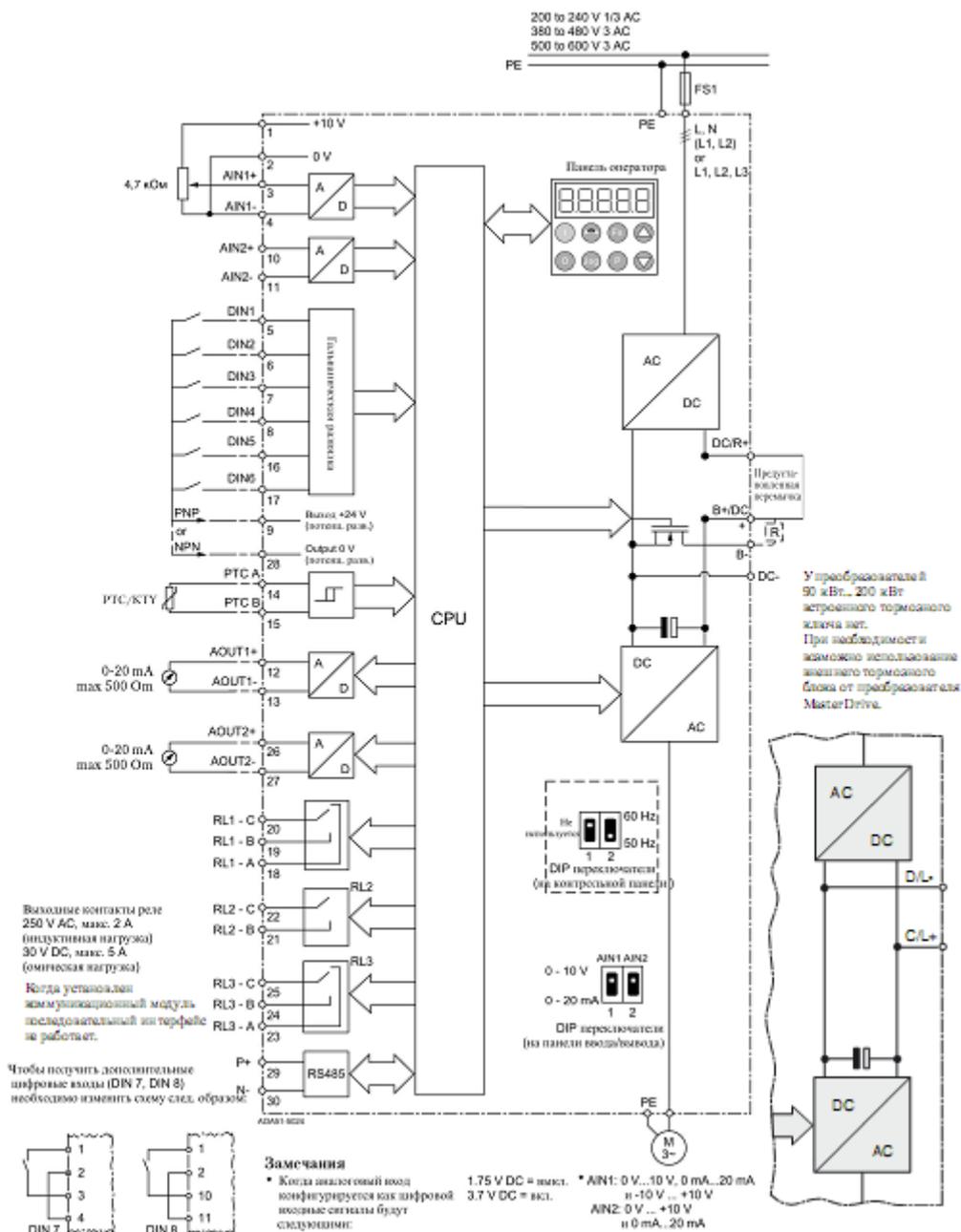
Козловой кран



Функциональная схема



Принципиальная схема преобразователя.



Структурная схема нелинейной непрерывной САУ частотно-регулируемого асинхронного электропривода при векторном управлении

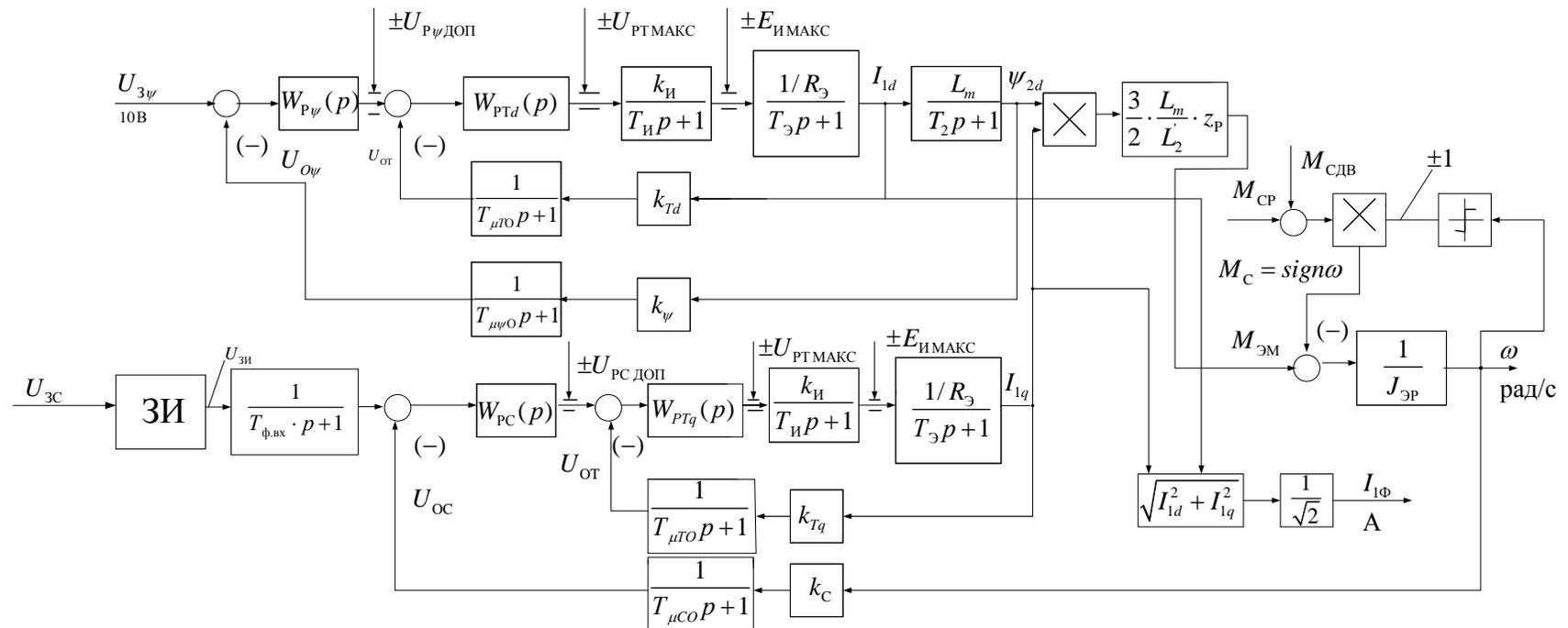
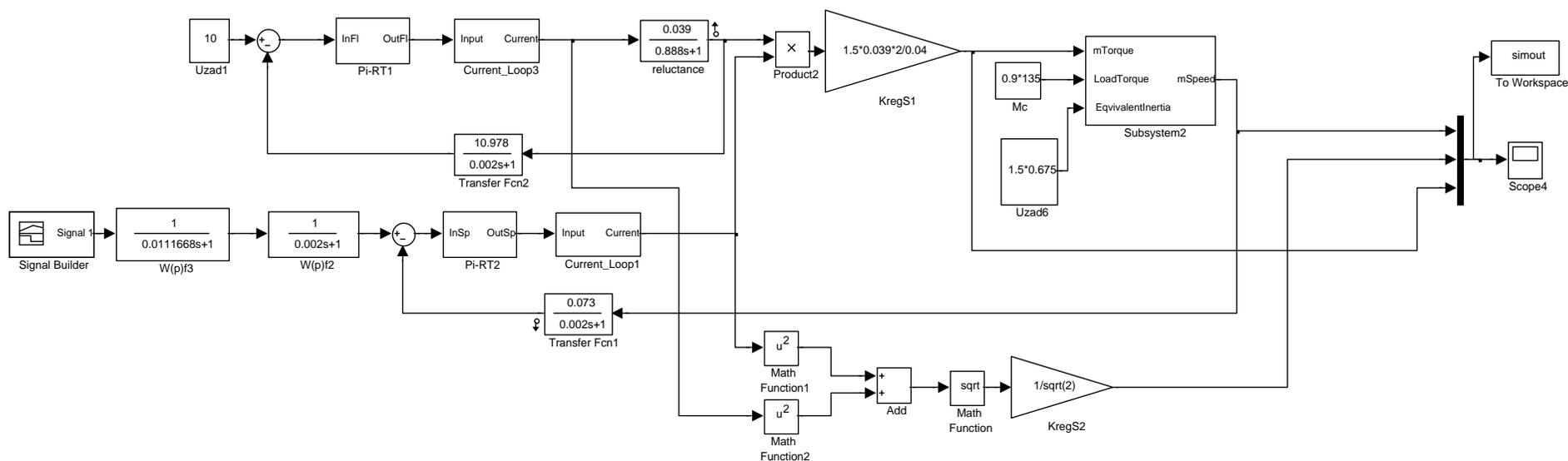
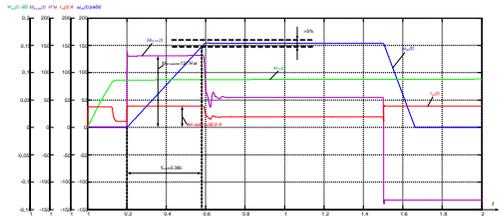


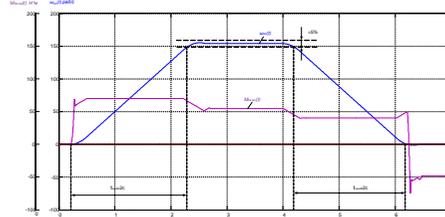
Схема имитационной модели в программной среде *MATLAB*



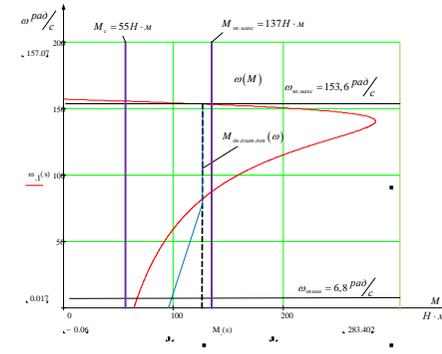
Демонстрационный лист



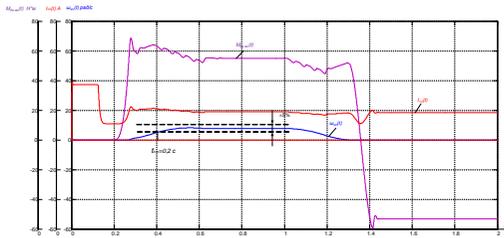
Переходная характеристика пуска на максимальную скорость и торможения нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55 \text{ Нм}$



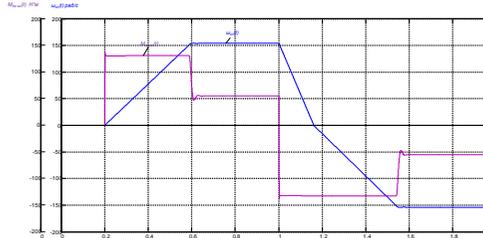
Переходная характеристика пуска на максимальную скорость и торможения нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55 \text{ Нм}$ с задатчиком интенсивности.



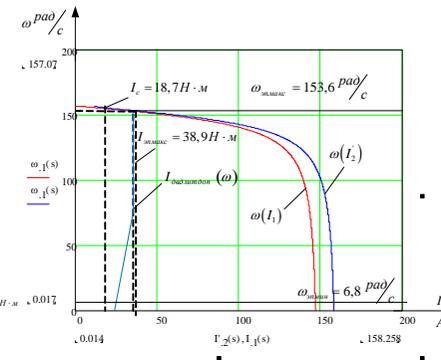
Области работы электропривода в плоскости механических характеристик двигателя



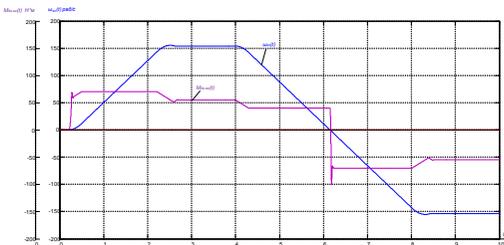
Переходная характеристика пуска на минимальную скорость и торможения нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55 \text{ Нм}$ с задатчиком интенсивности.



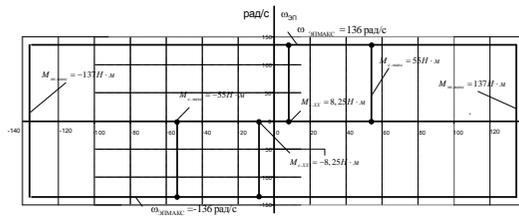
Переходная характеристика реверса на максимальную скорость нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55 \text{ Нм}$ с.



Области работы электропривода в плоскости электромеханических характеристик двигателя



Переходная характеристика реверса на максимальную скорость нелинейной САУ РЭП при $M_c = 55 \text{ Нм}$ с задатчиком интенсивности.



Заданная область работы электропривода

Статьи расходов на внедрение и содержание частотно-регулируемого электропривода

