

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

Институт Энергетический
Направление подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Кафедра Электропривода и электрооборудования

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

| Тема работы |
|---|
| Модернизация асинхронного электропривода компрессора Atlas Copco |
| УДК <u>62-83-523:621.514.5-048.35</u> |

Студент

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-------------------------------|---------|------|
| 5ГЗА | Чернышов Артем Константинович | | |

Руководитель

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|--------------------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент | Ланграф Сергей Владимирович | к.т.н. | | |

КОНСУЛЬТАНТЫ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|--------------------------------|---------------------------|---------|------|
| Ассистент | Грахова Елена Александровна | | | |

По разделу «Социальная ответственность»

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|----------------------------|---------------------------|---------|------|
| Доцент | Король Ирина Степановна | к.х.н. | | |

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

| Зав. кафедрой | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|------------------------------|---------------------------|---------|------|
| ЭПЭО | Дементьев Юрий Николаевич | Ph.D., к.т.н. | | |

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

Институт – Энергетический
Направление подготовки (специальность) – 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника
Кафедра – Электропривода и электрооборудования

УТВЕРЖДАЮ:
Зав. кафедрой

(Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

ЗАДАНИЕ
на выполнение выпускной квалификационной работы

В форме:

| |
|-----------------------------------|
| Выпускной квалификационной работы |
|-----------------------------------|

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

Студенту:

| Группа | ФИО |
|--------|----------------------------------|
| 5Г3А | Чернышову Артему Константиновичу |

Тема работы:

| |
|--|
| Модернизация асинхронного электропривода компрессора Atlas Copco |
|--|

| | |
|---|-----------------------|
| Утверждена приказом директора (дата, номер) | № 873/С от 13.02.2017 |
|---|-----------------------|

| | |
|--|------------|
| Срок сдачи студентом выполненной работы: | 22.06.2017 |
|--|------------|

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

| Исходные данные к работе | |
|---|---|
| <i>(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).</i> | Компрессор Atlas Copco; вентиляторная нагрузка; непрерывный режим работы; техническая документация; техническая литература. |

| | |
|--|---|
| <p>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</p> <p><i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i></p> | <p>Модернизация электропривода компрессора; общие вопросы проектирования; разработка электропривода; математическое моделирование; разработка системы векторного управления; финансовый менеджмент; социальная ответственность.</p> |
| <p>Перечень графического материала</p> <p><i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i></p> | <p>Габаритные чертежи электродвигателя; структурная схема асинхронного электродвигателя; структурная схема САУ.</p> |
| <p>Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы</p> <p><i>(с указанием разделов)</i></p> | |
| <p>Раздел</p> | <p>Консультант</p> |
| <p>Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение</p> | <p>Грахова Елена Александровна</p> |
| <p>Социальная ответственность</p> | <p>Король Ирина Степановна</p> |

| | |
|--|------------------|
| <p>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</p> | <p>6.03.2017</p> |
|--|------------------|

Задание выдал руководитель:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|---------------|------------------------------------|------------------------|---------|------------------|
| <p>Доцент</p> | <p>Ланграф Сергей Владимирович</p> | <p>к.т.н</p> | | <p>6.03.2017</p> |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|-------------|--------------------------------------|---------|------------------|
| <p>5Г3А</p> | <p>Чернышов Артем Константинович</p> | | <p>6.03.2017</p> |

Реферат

Выпускная квалификационная работа 102 с., 54 рис., 31 табл., 18 источников.

Ключевые слова: модернизация, компрессор, асинхронный электродвигатель, система управления.

Объектом исследования является асинхронный электропривод компрессора Atlas Copco.

Цель работы – модернизировать электропривод компрессора посредством внедрения системы автоматического управления.

В процессе исследования проводились работы по разработке электропривода, моделированию прямого пуска электродвигателя в различных системах координат, разработке системы векторного управления. Также были рассмотрены различные экономические и социальные вопросы.

В результате исследования был спроектирован электропривод компрессора под управлением системы векторного управления. Была повышена энергоэффективность компрессора, увеличен эксплуатационный срок.

Область применения: компрессор участвует в производстве теплоизоляционного материала – каменной ваты.

В будущем планируется разработка бездатчиковой системы векторного управления.

Оглавление

| | |
|--|----|
| Введение..... | 7 |
| 1. Общие вопросы проектирования электропривода компрессора..... | 8 |
| 1.1 Технологический процесс производства каменной ваты | 8 |
| 1.2 Технологические операции электропривода компрессора..... | 10 |
| 2. Разработка электропривода компрессора..... | 16 |
| 2.1 Выбор электродвигателя компрессора | 16 |
| 2.2 Расчет параметров двигателя..... | 18 |
| 2.3 Построение области работы электропривода | 21 |
| 2.3.1 Расчет естественной механической характеристики | 22 |
| 2.3.2 Расчет естественной электромеханической характеристики | 23 |
| 2.4 Выбор преобразователя..... | 24 |
| 2.4.1 Выбор несущей частоты инвертора..... | 26 |
| 2.5 Расчет предельных статических характеристик | 27 |
| 2.6 Проверка правильности выбора двигателя | 30 |
| 2.7 Проверка правильности выбора преобразователя..... | 31 |
| 3. Математическое моделирование асинхронного электродвигателя | 32 |
| 3.1 Моделирование прямого пуска электродвигателя в неподвижной системе координат | 32 |
| 3.2 Моделирование прямого пуска электродвигателя во вращающейся системе координат | 37 |
| 4. Разработка системы векторного управления асинхронным электроприводом..... | 42 |
| 4.1 Оптимизация контуров регулирования | 43 |
| 4.1.1 Оптимизация контура тока | 43 |
| 4.1.2 Оптимизация контура потокосцепления ротора | 46 |
| 4.1.3 Оптимизация контура скорости | 50 |
| 4.2 Общая модель электропривода во вращающейся системе координат ... | 54 |
| 4.3 Общая модель электропривода в неподвижной системе координат | 58 |

| | |
|---|-----|
| 4.4 Моделирование нелинейной системы векторного управления | 63 |
| 4.4.1 Моделирование нелинейной системы с вентиляторной нагрузкой . | 68 |
| 5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.. | 73 |
| 5.1 Технико-экономическое обоснование | 73 |
| 5.2 Планирование работ по научно-техническому исследованию | 76 |
| 5.2.1 Определение трудоемкости этапов | 78 |
| 5.2.2 Техническая готовность темы | 79 |
| 5.2.3 Построение графика работ..... | 80 |
| 5.3 Смета затрат на разработку проекта | 82 |
| 5.4 Оценка целесообразности исследования..... | 85 |
| 5.4.1 Оценка научно-технического уровня следования | 85 |
| 5.4.2 Оценка возможных рисков | 87 |
| 6. Социальная ответственность | 91 |
| 6.1 Вводная часть | 91 |
| 6.2 Вредные и опасные производственные факторы | 92 |
| 6.3 Экологическая безопасность..... | 96 |
| 6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях..... | 97 |
| 6.5 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности | 98 |
| Заключение | 100 |
| Список использованных источников и литературы | 101 |

Введение

В настоящее время рационализация производства, а в частности энергосбережение, является одной из основных стратегий технического развития в передовых странах мира. Электродвигатели потребляют больше половины всего вырабатываемого электричества, а самым часто применяемым стал асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором. Его популяризация произошла благодаря относительной простоте и очень высокой надежности.

Одним из основных решений для энергосбережения, используемых в асинхронном двигателе – это внедрение частотного регулирования. Наряду со снижением потребления электрической энергии преобразователь частоты позволяет получить более качественные переходные процессы и снизить динамические нагрузки, что приведет к увеличению эксплуатационного срока компрессора.

Большинство компрессорных установок в мире использует нерегулируемый электропривод. Это обусловлено тем, что очень малое количество устройств и агрегатов требуют поддержания постоянного давления для их корректной работы. Но существуют такие устройства, где установка регулируемого электропривода может привести не только к снижению потребляемой энергии, но и к улучшению качества выпускаемой продукции. Целью выпускной квалификационной работы является модернизация асинхронного электропривода компрессора Atlas Copco.

1. Общие вопросы проектирования электропривода компрессора

1.1 Технологический процесс производства каменной ваты

Данный компрессор участвует в производстве теплоизоляционного материала – каменной ваты.

Сырьем для производства каменной ваты выступают горные породы габбро-базальтовой группы, фенолформальдегидная смола и доломит. Они подвозятся по железной дороге, складированы и потом подаются в суточные силосы, на которых установлены дозаторы, с их помощью сырье взвешивается, мелкая фракция отсеивается.

После взвешивания и отсеивания сырье горных пород загружается в печь-вагранку, где при температуре около 1600 градусов формируется расплав нужного состава и вязкости. Расплав подается на многовалковую центрифугу, где под воздействием центробежных сил валиков, вращающихся со скоростью 7000 об/мин, капли расплавленного камня вытягиваются в волокна. Воздушным потоком волокна выдуваются в камеру осаждения, где дополнительно обрабатываются связующими, водоотталкивающими и обеспылевающими добавками.

Далее маятниковый раскладчик распределяет волокна в несколько слоев на минерально-ватном ковре. Затем волокна поступают в гофрировщик. В гофрировщике волокна подпрессовывают, вертикально ориентируют, что усиливает прочность готовой ваты. На завершающем этапе в камере термообработки производится затвердевание сырья и получается готовый продукт с заданными характеристиками.

Далее ковер готовой каменной ваты нарезается листами нужных размеров. На этом этапе производятся замеры для проверки качества продукции, и отсеивается брак. Все технологические процессы производства полностью автоматизированы. Нарезанные и сложенные листы каменной ваты упаковываются в пленку и отгружаются на склад готовой продукции.

На предприятии применяется технология повторного использования отходов производства и некондиционной продукции, обрезки ковратщательно перемалываются и по ленточным конвейерам поступают в камеру волокноосаждения, где смешиваются с новыми волокнами. Отходы несформировавшегося волокна перемещаются на участок переработки отходов, смешиваются с цементом и формируются в брикеты, которые повторно поступают в вагранку в качестве одного из компонентов исходного сырья. Таким образом, переработка отходов производства составляет около 93%.

Готовая продукция завода собирается и готовится к отгрузке на складе готовой продукции. Его площадь составляет 60000 м² с общей емкостью хранения до 150000 м³.

1.2 Технологические операции электропривода компрессора

В технологическом процессе компрессор используется при выдуве волокна в камеру осаждения, а также в пневматических установках при нарезке, транспортировке и упаковке ковра каменной ваты по мере движения по производственной линии.



Рис. 1. Общий вид компрессора GA с воздушным охлаждением

Компрессоры GA представляют собой одноступенчатые винтовые компрессоры с впрыском масла и с механическим приводом от электродвигателя, помещенные в звукопоглощающий корпус^[17].

Схема воздушного потока

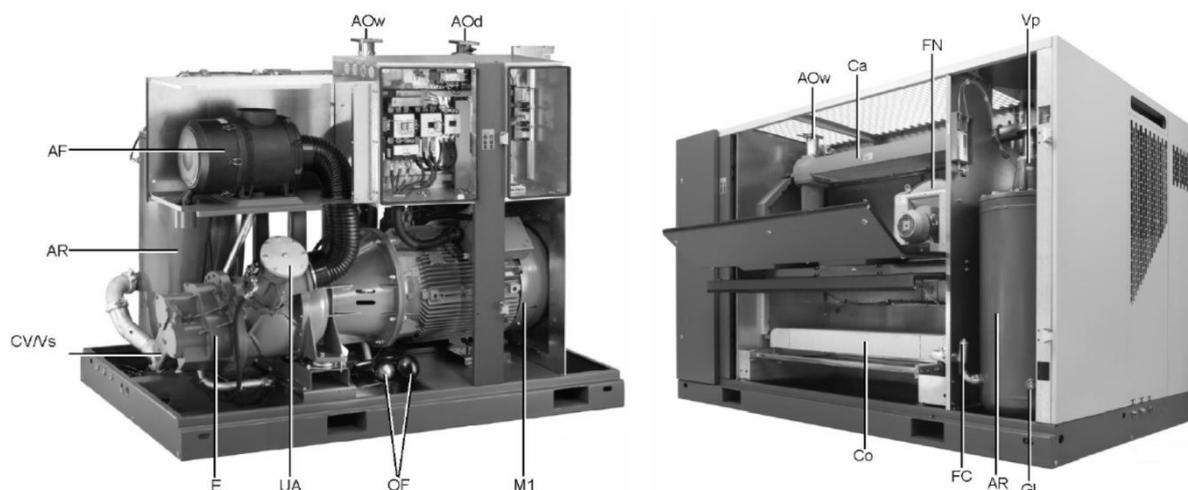


Рис. 2. Вид спереди и вид сзади компрессора GA с воздушным охлаждением

Воздух, всасываемый через фильтр (AF) и разгрузочный блок (UA), сжимается в компрессорном элементе (E). Поток сжатого воздуха и масла через обратный клапан (CV) направляется в воздушный ресивер/маслоотделитель (AR), в котором масло отделяется от сжатого воздуха. Сжатый воздух через клапан минимального давления (Vp) поступает в воздухоохладитель (Ca).

В компрессорах GA блочной модификации охлажденный воздух подается через уловитель конденсата (MTa) и выпускной патрубков (AOW) в сеть сжатого воздуха.

В компрессорах GA полнофункциональной модификации охлажденный воздух подается через уловитель конденсата (MTa) и выпускной патрубков (AOd) в сеть сжатого воздуха через встроенный осушитель воздуха.

Обратный клапан (CV) предотвращают возвращение сжатого воздуха в обратном направлении.

Клапан минимального давления (Vp) предотвращает падение давления в воздушном ресивере ниже минимального давления. В клапане минимального давления имеется встроенный обратный клапан.

Система смазки

Давление воздуха гонит масло из воздушного ресивера (AR) через маслоохладитель (Co), фильтры (OF), масляный запорный клапан (Vs) и клапан впрыска масла в компрессорный элемент (E) и к точкам смазки. Клапан впрыска масла открывается при высокой окружающей температуре, чтобы температура на выходе элемента была низкой.

Масляный запорный клапан (Vs) предотвращает заполнение компрессорного элемента маслом во время остановки компрессора.

При низком давлении впрыска путь протекания масла обходит маслоохладитель (Co). Масло проходит через байпасный клапан, что обеспечивает достаточный первоначальный поток масла к элементу при пуске компрессора или при переключении с ненагруженного состояния на нагруженное.

В установках с воздушным охлаждением температура масла контролируется путем регулирования скорости вращения вентиляторов (FN), чтобы предотвратить переохлаждение и соответственно конденсацию в воздушном ресивере (AR).

Система слива конденсата

В компрессоре после воздухоохладителя установлен уловитель конденсата, предотвращающий попадание конденсата в выпускной трубопровод сжатого воздуха. Уловитель конденсата оснащен поплавковым клапаном для автоматического слива конденсата и вентилем для слива ручную.

В компрессорах полнофункциональной модификации уловитель конденсата также установлен после осушителя. Этот уловитель также оснащен поплавковым клапаном для автоматического слива конденсата и вентилем для слива ручную.

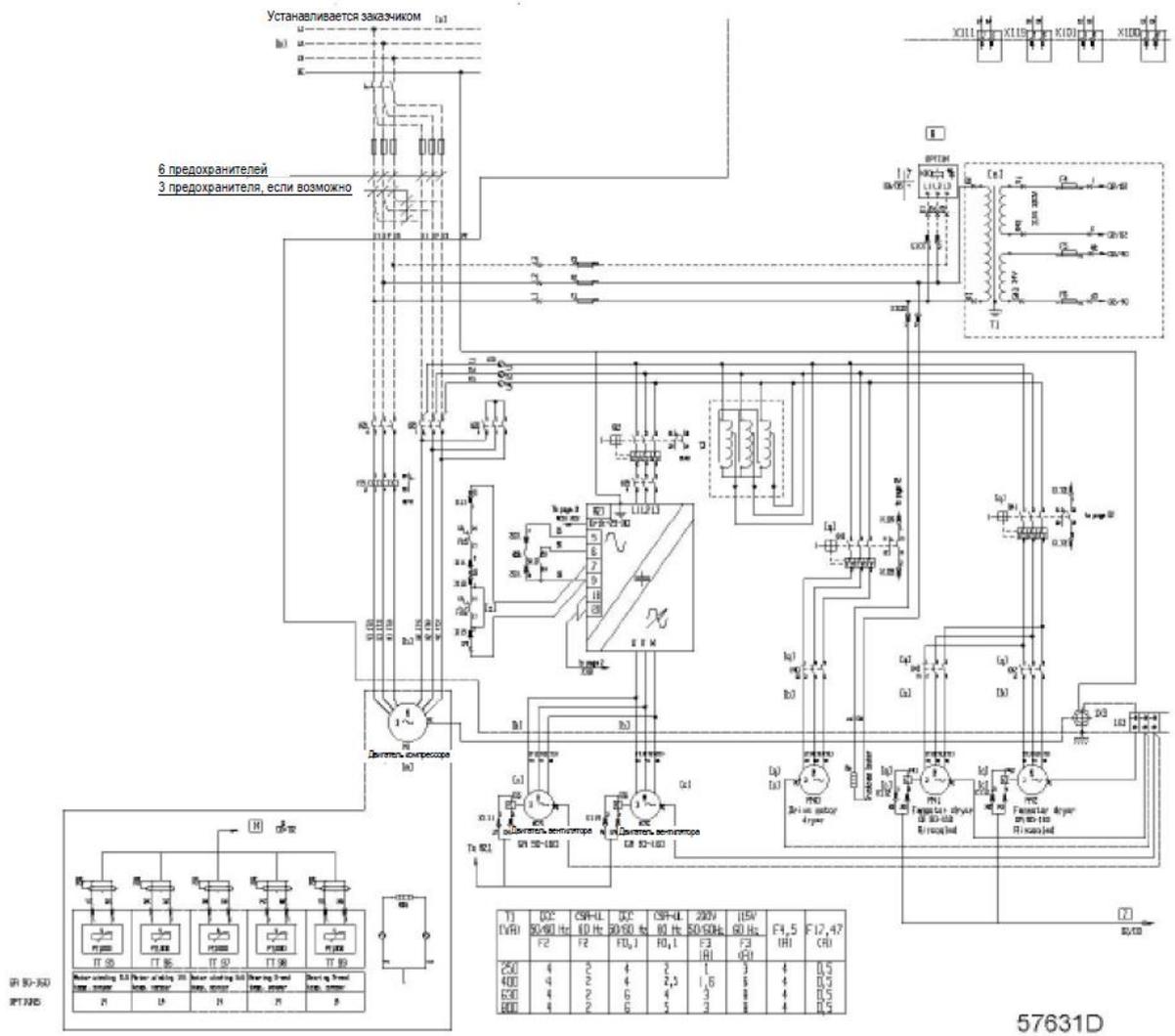


Рис. 3. Схема электрических подключений компрессора

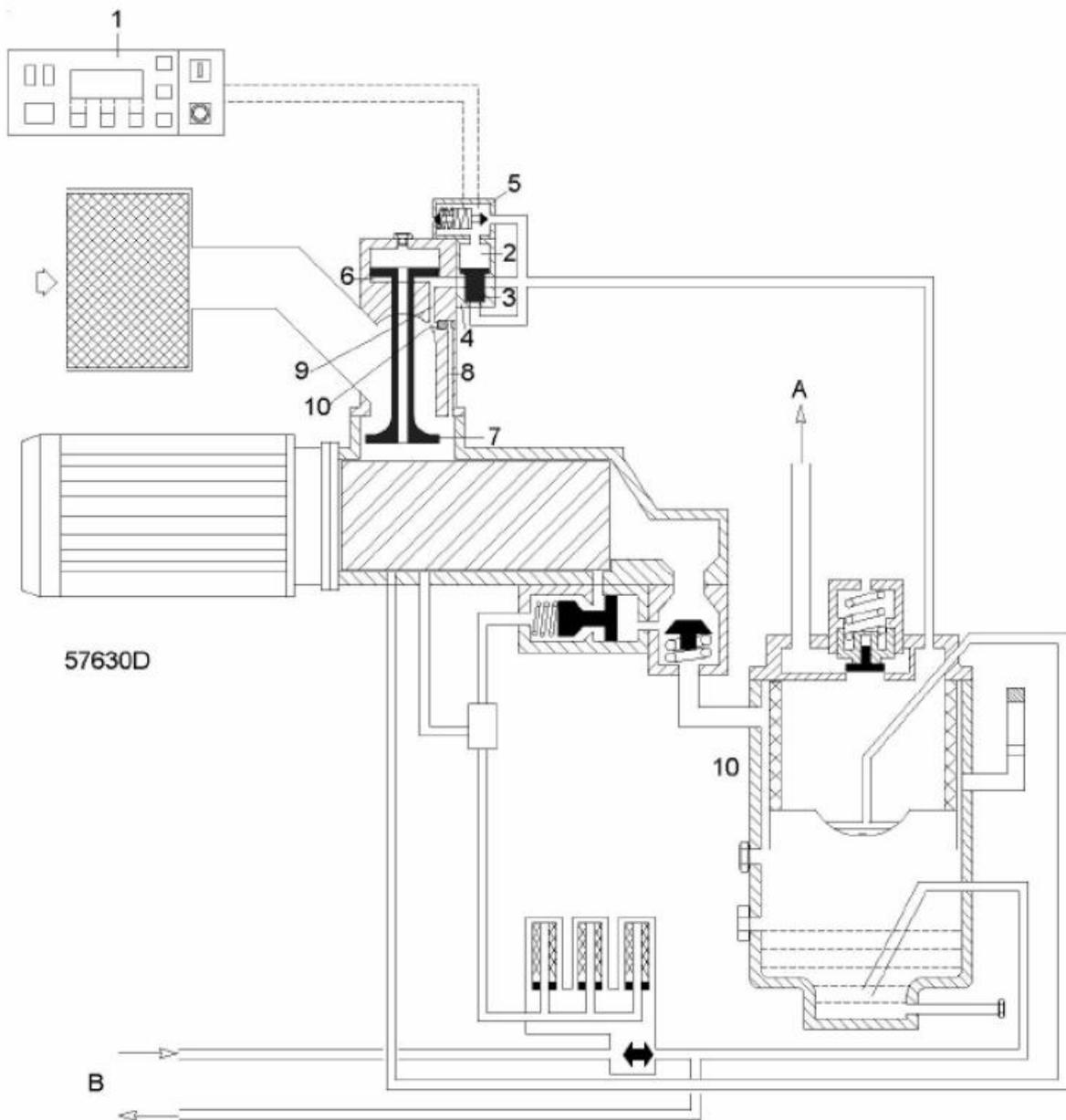


Рис. 4. Схема потоков компрессора

А – К воздухоохладителю;

В – К маслоохладителю/от маслоохладителя.

Разгрузка компрессора

Если потребление сжатого воздуха меньше производительности компрессора, давление в сети повышается. Когда давление в сети достигает верхнего предела рабочего давления (давления разгрузки), регулятор (1) отключает электропитание электромагнитного клапана (5). Под действием пружины якорь электромагнитного клапана (5) движется вниз.

| Этап | Описание |
|------|---|
| 1 | Якорь электромагнитного клапана (5) перекрывает подачу давления из воздушного ресивера в камеру (2). |
| 2 | Управляющее давление, имеющееся в камере (2), стравливается на атмосферу. Плунжер (3) выпускного клапана (4) перемещается под действием давления воздушного ресивера и открывает путь давлению в камеру (6). |
| 3 | Клапан (7) проталкивается вверх, закрывая вход воздуха. |
| 4 | Небольшой поток воздуха продолжает всасываться по каналу (8). Этот поток выдувается окончательно из ресивера через канал (10) в направлении входа воздуха. |
| 5 | Подача воздуха прекращается (0 %), компрессор работает полностью разгруженным, пока в камере (6) поддерживается постоянное давление выше уставки (давление разгрузки ресивера минус падение давления на выпускном клапане (4)). |

Нагрузка компрессора

Когда давление в сети сжатого воздуха понижается до нижнего предела рабочего давления (давления нагрузки), подается электропитание на электромагнитный клапан (5). Якорь клапана (5) движется вверх, преодолевая усилие пружины.

| Этап | Описание |
|------|--|
| 1 | Якорь электромагнитного клапана (5) открывает подачу давления из воздушного ресивера в камеру (2). Плунжер (3) выпускного клапана (4) перемещается и закрывает подачу воздуха под давлением в направлении камеры (6).. |
| 2 | Клапан (7) перемещается вниз, так как давление в камере (6) падает ниже атмосферного, открывая тем самым вход воздуха к компрессорному элементу. |
| 3 | Подача воздуха возобновляется (100 %), компрессор работает нагруженным, пока узел плунжер-шток-клапан окружен только воздухом при атмосферном давлении. |

2. Разработка электропривода компрессора

2.1 Выбор электродвигателя компрессора

Электродвигатель, приводящий в действие винт компрессора, поставляется шведско-швейцарской компанией АВВ. Марка двигателя **M2CA 315 MB**. Двигатель производится в стальном корпусе, имеет стандарты защиты IP 55, IC 411; класс изоляции F, класс нагревостойкости В.

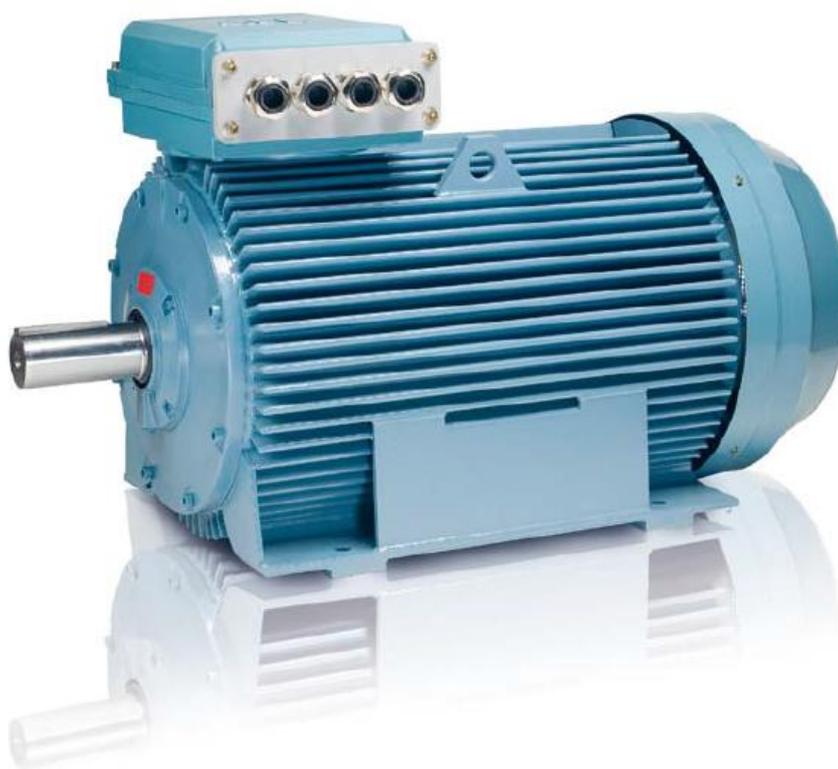


Рис. 5. Общий вид асинхронного двигателя

Технические данные трехфазного электродвигателя с короткозамкнутым ротором:

$P_n = 160 \text{ кВт}$ – номинальная мощность двигателя;

$U_{1н} = 380 \text{ В}$ – номинальное линейное напряжение;

$n_0 = 1500 \text{ об / мин}$ – синхронная частота вращения;

$s_n = 0,93 \%$ – номинальное скольжение двигателя;

$\eta_n = 0,955$ – КПД в режиме номинальной мощности (100 %-я нагрузка);

$\cos \varphi_n = 0,86$ – коэффициент мощности;

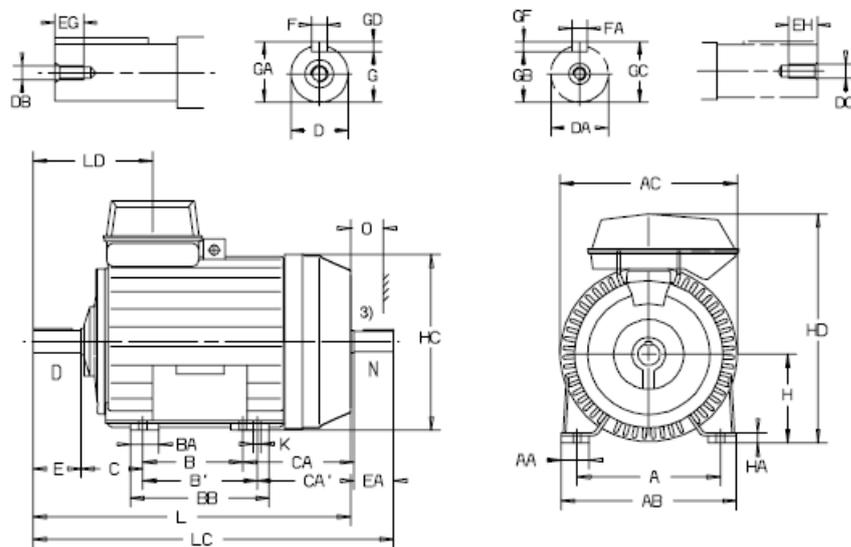
$k_i = \frac{I_n}{I_H} = 7,2 \text{ о.е.}$ – кратность пускового тока;

$k_n = \frac{M_n}{M_H} = 2,4 \text{ о.е.}$ – кратность пускового момента;

$k_{\max} = \frac{M_{\kappa}}{M_H} = 2,9 \text{ о.е.}$ – кратность максимального момента;

$J_{\text{дв}} = 2,9 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$ – динамический момент инерции;

$p = 4$ – число полюсов^[18].



| Motor size | Poles ¹⁾ | A | AA | AB | AC | B | B' | BA | BB | C | CA | CA' | D | DA | DB | DC | E | EA | EG | EH |
|------------|---------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|------|------|-----|-----------------|----|----|
| 315 MB | 2 | 508 | 100 | 622 | 624 | 457 | - | 100 | 539 | 216 | 392 | - | 65 | 60 | M20 | M20 | 140 | 140 | 40 | 40 |
| | 4-8 | 508 | 100 | 622 | 624 | 457 | - | 100 | 539 | 216 | 392 | - | 80 | 75 | M20 | M20 | 170 | 140 | 40 | 40 |
| Motor size | Poles ¹⁾ | F | FA | G | GA | GB | GC | GD | GF | H | HA | HC | HD | K | L | LC | LD | O ²⁾ | | |
| 315 MB | 2 | 18 | 18 | 58 | 69 | 53 | 64 | 11 | 11 | 315 | 32 | 627 | 820 | 28 | 1195 | 1345 | 390 | 115 | | |
| | 4-8 | 22 | 20 | 71 | 85 | 67.5 | 79.5 | 14 | 12 | 315 | 32 | 627 | 820 | 28 | 1225 | 1375 | 420 | 115 | | |

Рис. 6. Габаритные чертежи электродвигателя M2CA 315 MB

2.2 Расчет параметров двигателя

Синхронная угловая частота вращения двигателя:

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

Номинальная частота вращения двигателя:

$$n_{\text{дв.ном}} = (1 - s_H) \cdot n_0 = (1 - 0,0093) \cdot 1500 = 1486 \frac{\text{об}}{\text{мин}}$$

или
$$\omega_{\text{дв.ном}} = (1 - s_H) \cdot \omega_0 = (1 - 0,0093) \cdot 157,08 = 155,61 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Номинальный момент двигателя:

$$M_{\text{дв.ном}} = \frac{P_{\text{дв.ном}}}{\omega_{\text{дв.ном}}} = \frac{160000}{155,61} = 1028,21 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Номинальное фазное напряжение и номинальный фазный и линейный ток статора (действующее значение) при схеме соединения обмоток звездой:

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

$$I_{1\text{фн}} = I_{1\text{лн}} = \frac{P_{\text{дв.ном}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot \cos \varphi_n \cdot \eta_n} = \frac{160000}{3 \cdot 220 \cdot 0,86 \cdot 0,955} = 295,17 \text{ А}.$$

Максимально потребляемый ток двигателя при прямом пуске:

$$I_{1\text{мах}} = k_{i\text{дв}} \cdot I_{1\text{лн}} = 7,2 \cdot 295,17 = 2125,22 \text{ А}.$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике:

$$M_K = m_K \cdot M_{\text{дв.ном}} = 2,9 \cdot 1028,21 = 2981,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске:

$$M_{\text{дв.пуск}} = m_{II} \cdot M_{\text{дв.ном}} = 2,4 \cdot 1028,21 = 2467,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Ток холостого хода асинхронного двигателя:

$$I_0 = \sqrt{\frac{I_{11}^2 - (p_* \cdot I_{1H} \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}{1 - (p_* \cdot (1 - s_H) / (1 - p_* \cdot s_H))^2}} = 71,49 \text{ А},$$

где $I_{11} = \frac{P_* \cdot P_H}{3 \cdot U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{p*} \cdot \eta_{p*}} = 225,89 \text{ А}$ – ток статора двигателя при частичной

загрузке;

$\eta_{p*} = \eta_H$ – КПД при частичной нагрузке;

$\cos \varphi_{p*} = 0,98 \cdot \cos \varphi_H$ – коэффициент мощности при частичной нагрузке;

$p_* = \frac{P}{P_H} = 0,75$ – коэффициент загрузки двигателя.

Из формулы Клосса определим соотношение для расчета критического скольжения. В первом приближении принимаем $\beta=1$ (коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора):

$$s_K = s_H \cdot \frac{k_{\max} + \sqrt{k_{\max}^2 - (1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1))}}{1 - 2 \cdot s_H \cdot \beta \cdot (k_{\max} - 1)} = 0,054.$$

Далее определяем ряд промежуточных коэффициентов:

$$C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1H}} = 1 + \frac{71,49}{2 \cdot 7,2 \cdot 295,17} = 1,017;$$

$$A_1 = \frac{m \cdot U_{1\phi}^2 \cdot (1 - s_H)}{2 \cdot C_1 \cdot k_{\max} \cdot P_H} = 0,152.$$

Активное сопротивление ротора, приведенное к обмотке статора:

$$R'_2 = \frac{A_1}{\left(\beta + \frac{1}{s_K} \right) \cdot C_1} = 0,0077 \text{ Ом.}$$

Активное сопротивление статорной обмотки:

$$R_1 = C_1 \cdot R'_2 \cdot \beta = 0,0078 \text{ Ом.}$$

Определим параметр γ , который позволяет найти индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{s_K^2} - \beta^2} = 18,4.$$

Тогда сопротивление короткого замыкания:

$$X_{\text{кн}} = \gamma \cdot C_1 \cdot R'_2 = 0,144 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния роторной обмотки, приведенное к статорной:

$$X'_{2\text{н}} = \frac{0,58 \cdot X_{\text{кн}}}{C_1} = 0,082 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление рассеяния статорной обмотки:

$$X_{1\text{н}} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,061 \text{ Ом.}$$

ЭДС ветви намагничивания, наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме:

$$E_m = \sqrt{\left(U_{1\phi} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} - R_1 \cdot I_{1\text{н}} \right)^2 + \left(U_{1\phi} \cdot \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{\text{н}}} - X_{1\text{н}} \cdot I_{1\text{н}} \right)^2} = 209,35 \text{ В.}$$

Тогда индуктивное сопротивление намагничивания определится как:

$$X_{\mu\text{н}} = \frac{E_m}{I_0} = 2,928 \text{ Ом.}$$

По найденным значениям C_1 , R'_2 и $X_{\text{кн}}$ определим критическое скольжение:

$$s_{\text{к1}} = \frac{C_1 \cdot R'_2}{\sqrt{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = \frac{1,017 \cdot 0,0077}{\sqrt{0,0078^2 + 0,144^2}} = 0,054.$$

Индуктивность рассеяния статорной обмотки:

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\text{н}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = 1,94 \cdot 10^{-4}, \text{ Гн.}$$

Индуктивность рассеяния роторной обмотки, приведенной к статорной:

$$L'_{2\sigma} = \frac{X'_{2\text{н}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = 2,61 \cdot 10^{-4}, \text{ Гн.}$$

Индуктивность ветви намагничивания:

$$L_{\mu\text{н}} = \frac{X_{\mu\text{н}}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = 0,009 \text{ Гн.}$$

Значение номинального потокосцепления двигателя:

$$\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = 0,9 \text{ Вб}.$$

Значение номинального электромагнитного момента двигателя:

$$M_{\text{эм.н}} = M_{\text{эм.н}}(s_H) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[(X_{\text{кн}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_H \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = 1062 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент трения на валу двигателя:

$$M_{\text{с.дв}} = M_{\text{эм.н}} - M_{\text{дв.н}} = 33,79 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Момент инерции механизма, приведенный к валу двигателя:

$$J_M = 0,5 \cdot J_{\text{дв}} = 1,45 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Эквивалентный момент инерции привода:

$$J_{\text{э}} = J_{\text{дв}} + J_M = 4,35 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

2.3 Построение области работы электропривода

Область работы электропривода задана в первом квадранте плоскости координат:

- область длительной работы ограничена максимальной скоростью электропривода $\omega_{\text{эп.макс}}$, рад/с и интервалом изменения момента полезной нагрузки в длительном режиме $M_{\text{с.макс}} \div M_{\text{с.мин}}$, Нм;
- область кратковременной работы ограничена максимальной скоростью электропривода $\omega_{\text{эп.макс}}$, рад/с и значением максимального момента электропривода в пуско-тормозных режимах $M_{\text{эп.макс}}$, Нм.

Максимальная скорость электропривода:

$$\omega_{\text{эп.макс}} = 0,95 \cdot \omega_{\text{дв.ном}} = 147,82 \frac{\text{рад}}{\text{сек}}.$$

Максимальный момент нагрузки электропривода:

$$M_{с.макс} = 1000 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Минимальный момент нагрузки электропривода:

$$M_{с.мин} = 0,1 \cdot M_{с.макс} = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Максимальный момент электропривода:

$$M_{эп.макс} = 2 \cdot M_{с.макс} = 2000 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

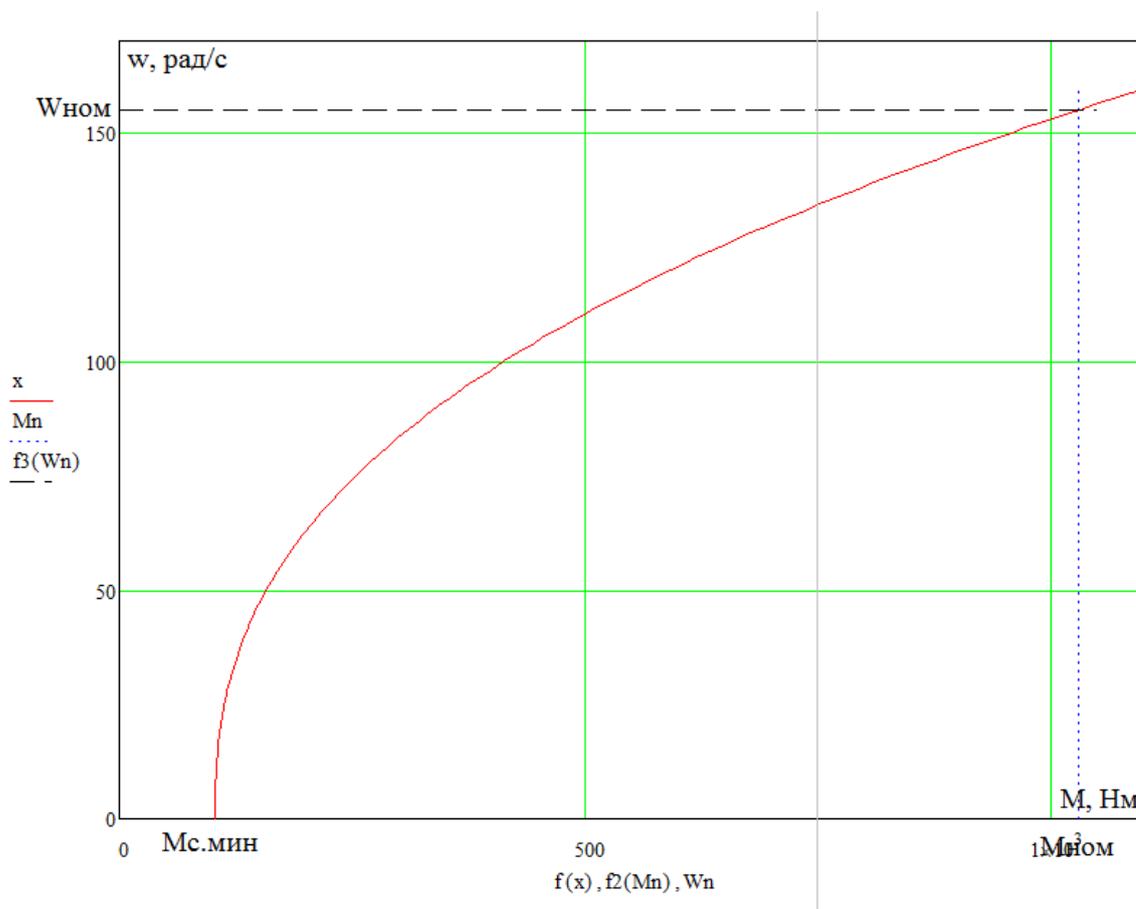


Рисунок 7 – Область работы электропривода

2.3.1 Расчет естественной механической характеристики

Механическая характеристика $M(s)$ асинхронного двигателя рассчитывается для частоты $f_{1H} = 50 \text{ Гц}$ по выражению:

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

По результатам расчета строится механическая характеристика $\omega(M)$,
 где $\omega = \omega_0 \cdot (1 - s)$.

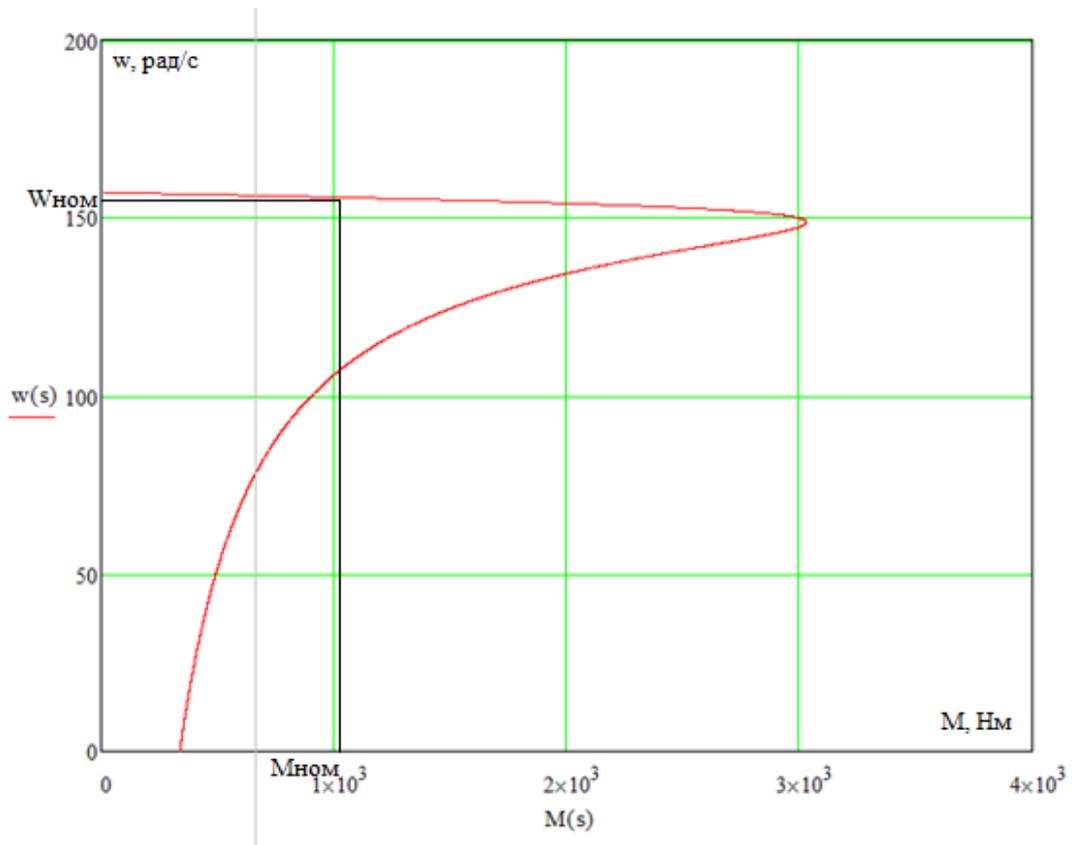


Рисунок 8 – Механическая характеристика электродвигателя $\omega(M)$

2.3.2 Расчет естественной электромеханической характеристики

Электромеханическая характеристика $I_1(s)$ асинхронного двигателя рассчитывается для значения частоты $f_{1H} = 50$ Гц по выражению:

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

где

$$I_2'(s) = \frac{U_{1\phi H}}{\sqrt{(X_{KH})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2}}; \quad \sin \varphi_2(s) = \frac{X_{KH}}{\sqrt{(X_{KH})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2}}$$

По результатам расчета строим электромеханическую характеристику $\omega(I_1)$.

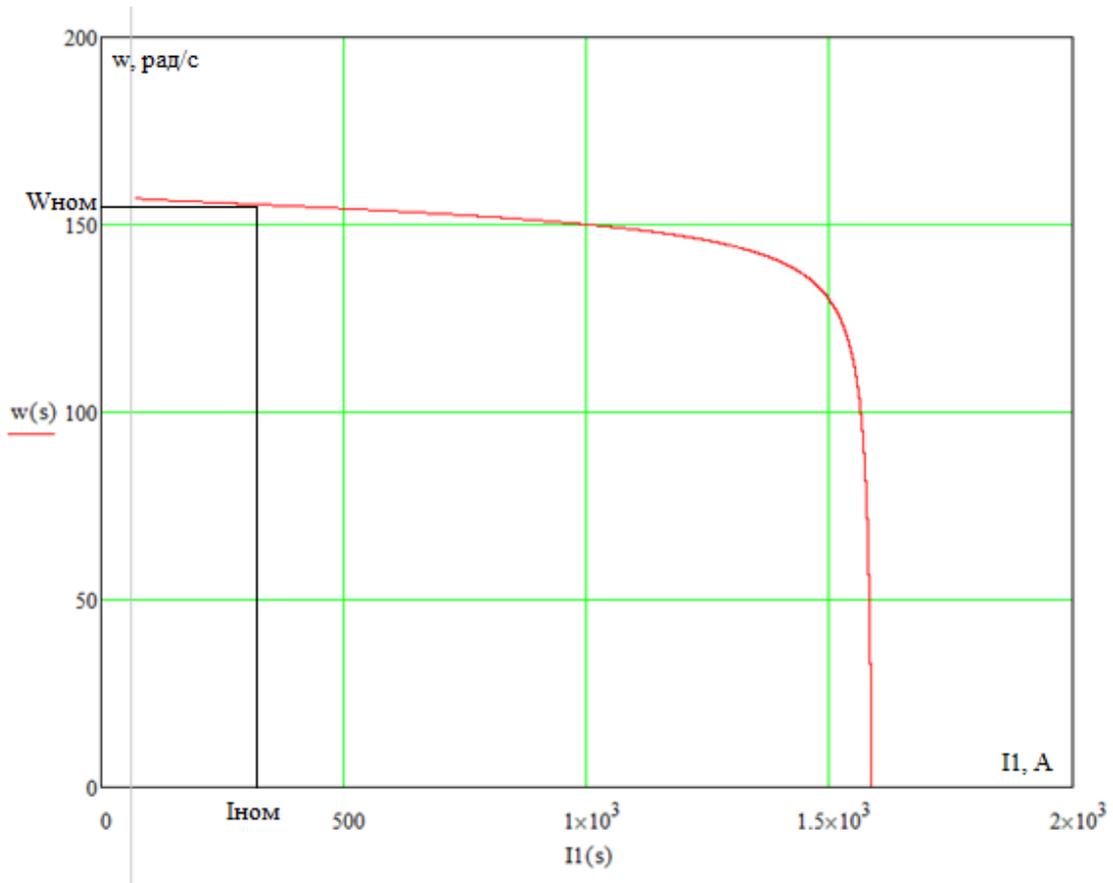


Рисунок 9 – Электромеханическая характеристика $\omega(I_1)$

2.4 Выбор преобразователя

Выбор преобразователя частоты производим по следующим рекомендациям:

1. Параметры питающей сети: 3-х фазная сеть 380/220В, 50 Гц.
2. Выходные параметры преобразователя частоты:
 - 3 фазы;
 - максимальное выходное (линейное) напряжение 380В;
 - максимальная выходная частота преобразователя

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

$$f_{п.макс} > 49,75 \text{ Гц};$$

– минимальная выходная частота преобразователя

$$f_{п.мин} < 50 \cdot \frac{\omega_{эп.мин}}{\omega_0}, \text{ Гц};$$

$$f_{п.мин} < 9,91 \text{ Гц};$$

$$\omega_{эп.мин} = 0,2 \cdot \omega_{дв.ном}$$

3. Преобразователь выбирается по номинальному (длительно допустимому) току $I_{ин}$ и максимальному (кратковременно допустимому) току $I_{и.макс}$ по следующим условиям:

$$I_{ин} \geq I_{1лн} \cdot \frac{M_{с.макс}}{M_{дв.ном}}, \text{ А};$$

$$I_{ин} \geq 287,13 \text{ А};$$

$$I_{и.макс} \geq I_{1лн} \cdot \frac{M_{эп.макс}}{M_{дв.ном}}, \text{ А};$$

$$I_{и.макс} \geq 574,26 \text{ А}.$$

Параметры выбранного преобразователя частоты приведены в таблице.

Таблица 1 – Параметры преобразователя частоты

| Тип | Параметры питающей сети | | Выходное напряжение $U_{и}, \text{ В}$ | Выходная частота $f_{и}, \text{ Гц}$ | Выходной ток | | Рекомендуемая мощность двигателя $P_2, \text{ кВт}$ |
|---|-------------------------|-------------------|---|---|---------------------|-------------------------|--|
| | $U_{1л}, \text{ В}$ | $f_c, \text{ Гц}$ | | | $I_{ин}, \text{ А}$ | $I_{и.макс}, \text{ А}$ | |
| Danfoss VLT 5302 FLUX ^[1] | 380÷500 | 50 | 380 | 1÷300 | 395 | 593 | 200 |

2.4.1 Выбор несущей частоты инвертора

Выбор несущей частоты инвертора $f_{\text{ШИМ}}$ осуществляется в соответствии с рекомендациями фирмы производителя для выбранного типа преобразователя с учетом фактического тока загрузки. Если для выбранного преобразователя частоты отсутствуют рекомендации по выбору несущей частоты, то для её выбора можно воспользоваться приведенными на рисунке 10 обобщенными зависимостями несущей частоты для преобразователей малой и средней мощности фирмы *Siemens*. Рекомендуемое максимальное значение несущей частоты зависит от номинальной выходной мощности преобразователя и фактического тока загрузки инвертора при максимальной нагрузке привода.

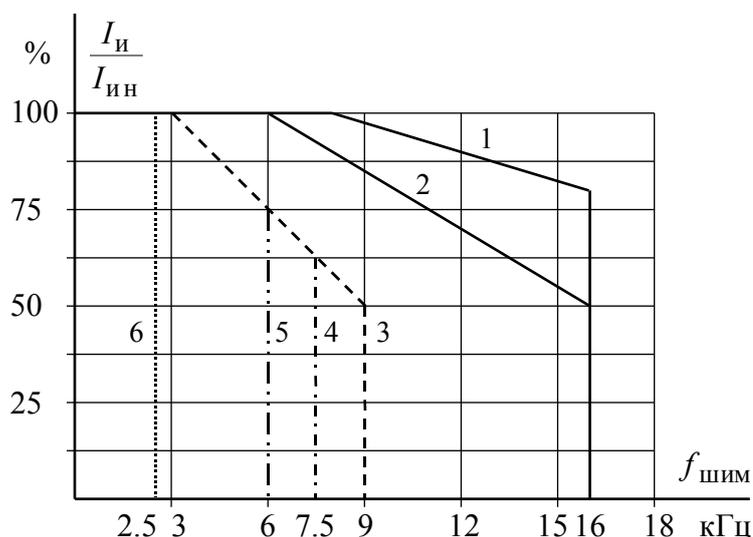


Рисунок 10 – Зависимости максимального значения несущей частоты инвертора от номинальной выходной мощности и загрузки преобразователя: 1 – до 3 кВт; 2 – до 55 кВт; 3 – до 90 кВт; 4 – до 132 кВт; 5 – до 250 кВт; 6 – до 900 кВт

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

2.5 Расчет предельных статических характеристик

1. В плоскости механических характеристик $\omega(M)$ (рисунок 11) строим граничные характеристики для длительного и кратковременного режимов работы:

$$M_{C.мин}(\omega) = 100 \text{ Нм} (m.1 - 2 - 3);$$

$$M_{C.макс}(\omega) = 1000 \text{ Нм} (m.4 - 5 - 6);$$

$$M_{ЭП.макс}(\omega) = 2000 \text{ Нм} (m.13 - 14 - 15).$$

2. Рассчитываем и строим зависимость длительно-допустимого момента электродвигателя $M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$ (m.8-9-10-11) для частоты $f_H = f_{1H} = 50 \text{ Гц}$:

$$M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}} \cdot \left(0,5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right) \text{ при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}};$$

$$M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = M_{\text{дв.н}} \text{ при } 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} < \omega \leq \omega_{\text{дв.н}}.$$

Результаты расчета сводим в таблицу 2.

Таблица 2 – Результаты расчета зависимости $M_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$

| $\omega, \text{ рад/с}$ | 0 | $\omega_{\text{ЭП.мин}}$ | $0,5\omega_{\text{дв.н}}$ | $\omega_{\text{ЭП.макс}}$ | $\omega_{\text{дв.н}}$ |
|--------------------------------------|-------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| $M_{\text{дв.длит.доп}}, \text{ Нм}$ | 514,1 | 719,74 | 1028,21 | 1028,21 | 1028,21 |

3. Рассчитываем и строим зависимость максимально допустимого момента $M_{\text{дв.макс}}(\omega)$ для частоты $f_H = f_{1H} = 50 \text{ Гц}$:

$$M_{\text{дв.макс}}(\omega) = M_K = 3024 \text{ Нм},$$

$$M_K = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{кн}^2) \left[1 + \left(\frac{R_1'}{X_\mu} \right)^2 \right]} \right\}} = 3024 \text{ Нм}.$$

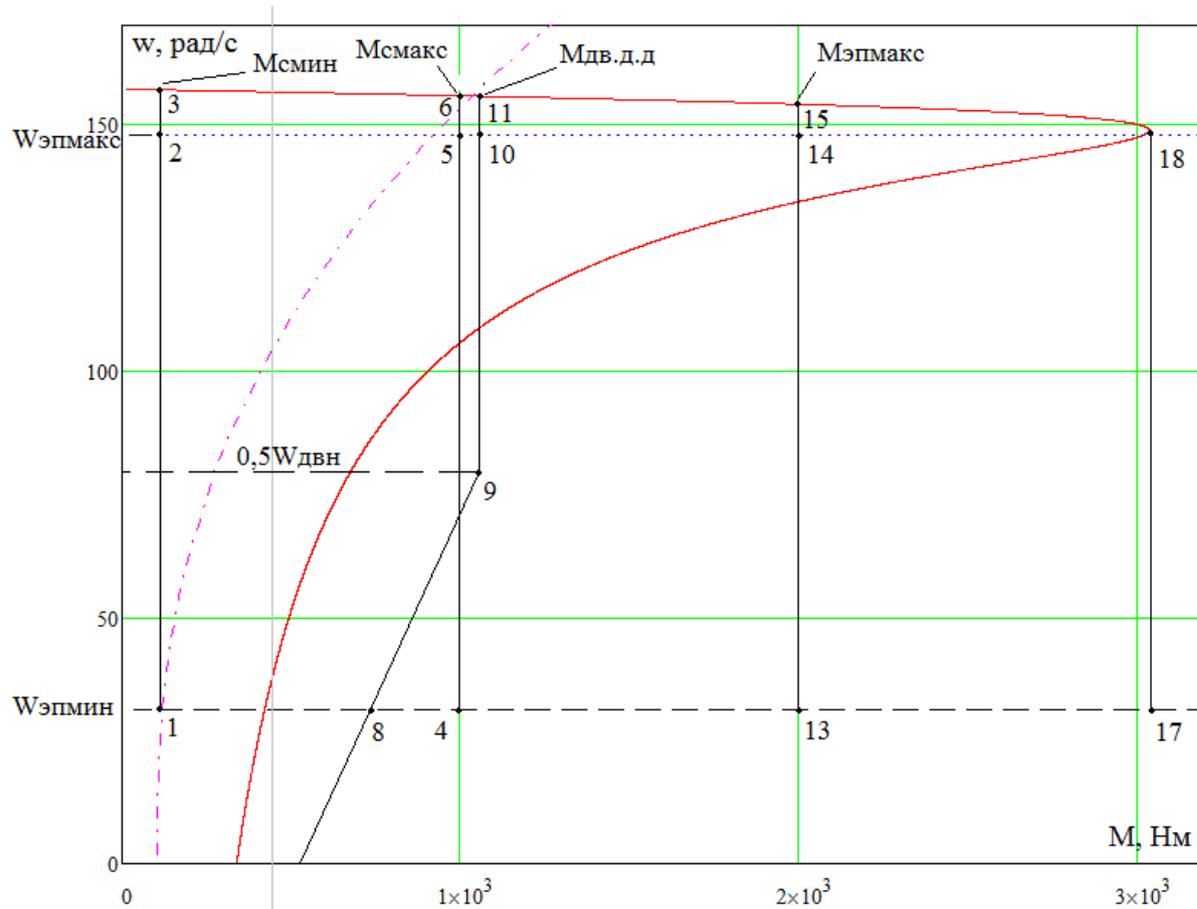


Рисунок 11 – Механические характеристики электропривода и нагрузки

4. В плоскости электромеханических характеристик $\omega(I_1)$ (рисунок 12) рассчитываем и строим зависимость длительно-допустимого тока электродвигателя $I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$ (т.8–9–10–11):

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = I_{\text{дв.н}} \cdot \left(0,5 + \frac{\omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right) \text{ при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} ;$$

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) = I_{\text{дв.н}} \text{ при } 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}} < \omega \leq \omega_{\text{дв.н}} .$$

Результаты расчета сводим в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты расчета зависимости $I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega)$

| $\omega, \text{ рад/с}$ | 0 | $\omega_{\text{ЭП.мин}}$ | $0,5\omega_{\text{дв.н}}$ | $\omega_{\text{ЭП.макс}}$ | $\omega_{\text{дв.н}}$ |
|-------------------------------------|--------|--------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|
| $I_{\text{дв.длит.доп}}, \text{ А}$ | 147,58 | 206,61 | 295,17 | 295,17 | 295,17 |

5. Рассчитываем и строим зависимость $I_C(\omega)$ (m.4–5–6), соответствующую нагрузке $M_C(\omega)$. Для этого на естественной характеристике $M(\omega)$ определяем соответствующие M_C значения скольжения s , решив относительно s уравнение:

$$\frac{3 \cdot U_{1\phiн}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(X_{кн})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = M_C.$$

Решив данное уравнение с помощью Mathcad, получаем $s_{w\max} = 0,00872$, $s_{0,5w\max} = 0,0021$, $s_{\min} = 0,000837$

Далее рассчитываем значение значение тока I_C :

$$I_C = I_1(s_{w\max}) = 264,27 \text{ A.}$$

$$I_C = I_1(s_{0,5w\max}) = 94,92 \text{ A.}$$

$$I_C = I_1(s_{\min}) = 75,72 \text{ A.}$$

6. Рассчитываем и строим зависимость $I_{ЭП.макс}(\omega)$ (m.13–14–15), соответствующую кратковременной максимальной нагрузке $M_{ЭП.макс}(\omega) = 2000 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Для этого на естественной характеристике $M(\omega)$ определяем соответствующее $M_{ЭП.макс}$ значение скольжения $s_{m.15}$, решив относительно s уравнение:

$$\frac{3 \cdot U_{1\phiн}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[(X_{кн})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = M_{ЭП.макс}.$$

Решив данное уравнение с помощью Mathcad, получаем $s_{m.15} = 0,01962$.

Далее рассчитываем значение скорости $\omega_{m.15} = \omega_0 \cdot (1 - s_{m.15}) = 153,9 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ и

значение тока $I_{ЭП.макс}$:

$$I_{ЭП.макс} = I_1(\omega_{m.15}) = 544,39 \text{ A.}$$

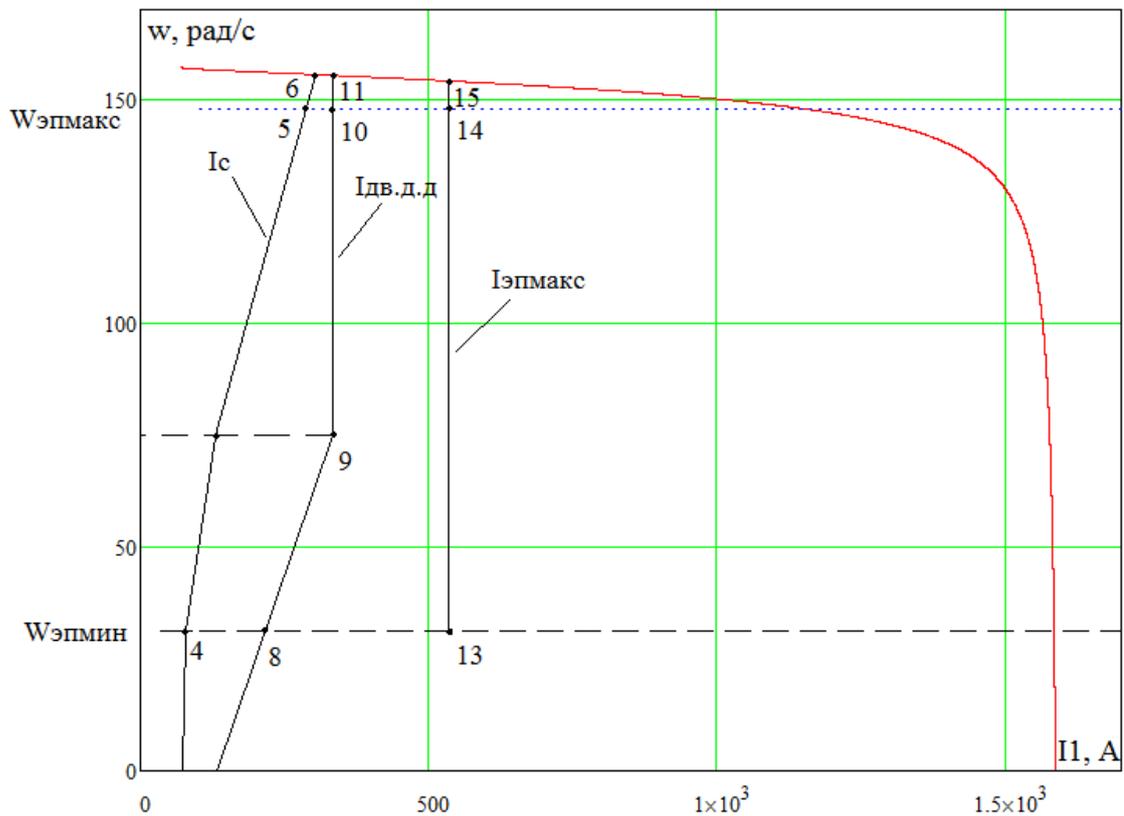


Рисунок 12 – Электромеханические характеристики электропривода и нагрузки

2.6 Проверка правильности выбора двигателя

По результатам построения механических характеристик электропривода и нагрузки проверяем правильность выбора двигателя по моменту. Во всем диапазоне регулирования должны выполняться условия:

$$\left. \begin{aligned} M_{дв.длит.доп}(\omega) &\geq M_{с.макс} \\ M_{дв.макс}(\omega) &\geq M_{эп.макс} \end{aligned} \right\}$$

ИЛИ

$$\left. \begin{aligned} M_{Т.8} &\geq M_{с.макс} \\ M_{Т.9} &\geq M_{с.макс} \\ M_{Т.10} &\geq M_{с.макс} \\ M_{Т.11} &\geq M_{с.макс} \\ M_{к} &\geq M_{эп.макс} \end{aligned} \right\}$$

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода и нагрузки проверяется правильность выбора двигателя по току. Во всем диапазоне регулирования скорости должно выполняться условие:

$$I_{\text{дв.длит.доп}}(\omega) \geq I_{\text{с.макс}}$$

или

$$\left. \begin{array}{l} I_{\text{т.8}} \geq I_{\text{с.макс}} \\ I_{\text{т.9}} \geq I_{\text{с.макс}} \\ I_{\text{т.10}} \geq I_{\text{с.макс}} \\ I_{\text{т.11}} \geq I_{\text{с.макс}} \end{array} \right\}$$

2.7 Проверка правильности выбора преобразователя

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода и нагрузки проверяется правильность выбора преобразователя. Во всем диапазоне регулирования должны выполняться условия:

$$\left. \begin{array}{l} I_{\text{с.макс}}(\omega) \leq I_{\text{ин}} \\ I_{\text{эп.макс}}(\omega) \leq I_{\text{и.макс}} \end{array} \right\}$$

Вывод по анализу полученных характеристик (рисунки 11 и 12): система преобразователь частоты – асинхронный двигатель с векторным управлением может обеспечить длительную работу в интервале изменения нагрузки от $M_{\text{с.мин}} = 100 \text{ Н} \cdot \text{м}$ до $M_{\text{с.макс}} = 1000 \text{ Н} \cdot \text{м}$ и заданный кратковременный максимальный момент $M_{\text{эп.макс}} = 2000 \text{ Н} \cdot \text{м}$ во всем диапазоне регулирования скорости от $\omega_{\text{эп.мин}} = 33,1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$ до $\omega_{\text{эп.макс}} = 147,8 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$.

3. Математическое моделирование асинхронного электродвигателя

3.1 Моделирование прямого пуска электродвигателя в неподвижной системе координат

При построении векторных систем управления асинхронными электроприводами используется, в основном, математическое описание АД относительно векторов тока статора и потокосцепления ротора. Для анализа динамики произвольно вращающуюся систему координат целесообразней заменить неподвижной (стационарной), наиболее адекватно соответствующей процессам в реальном двигателе.

Математическое описание АД в неподвижной системе координат $\alpha\text{-}\beta$ ^[1]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{di_{s\alpha}(t)}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot \left[U_{s\alpha}(t) - R_e \cdot i_{s\alpha}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\alpha}(t) + K_r \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\beta}(t) \right] \\ \frac{di_{s\beta}(t)}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot \left[U_{s\beta}(t) - R_e \cdot i_{s\beta}(t) + K_r \cdot A_r \cdot \psi_{r\beta}(t) - K_r \cdot z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\alpha}(t) \right] \\ \frac{d\psi_{r\alpha}(t)}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot i_{s\alpha}(t) - A_r \cdot \psi_{r\alpha}(t) - z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\beta}(t) \\ \frac{d\psi_{r\beta}(t)}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot i_{s\beta}(t) - A_r \cdot \psi_{r\beta}(t) + z_p \cdot \omega(t) \cdot \psi_{r\alpha}(t) \\ \frac{d\omega(t)}{dt} = \frac{1}{J} \cdot \left\{ K_m \cdot \left[\psi_{r\alpha}(t) \cdot i_{s\beta}(t) - \psi_{r\beta}(t) \cdot i_{s\alpha}(t) \right] - M_c \right\} \end{array} \right.$$

Здесь $i_{s\alpha}(t)$, $i_{s\beta}(t)$, $U_{s\alpha}(t)$, $U_{s\beta}(t)$ – компоненты пространственных векторов тока и напряжения статора; $\psi_{r\alpha}(t)$, $\psi_{r\beta}(t)$ – компоненты пространственного

вектора потокосцепления ротора; $R_e = R_s + R_r \cdot K_r^2$, $L_e = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$, $K_r = \frac{L_m}{L_r}$,

$A_r = \frac{R_r}{L_r}$, $K_m = 1,5 \cdot K_r \cdot z_p$ – коэффициенты, учитывающие параметры АД;

$L_s = L_{s\sigma} + L_m$, $L_r = L_{r\sigma} + L_m$ – полные индуктивности обмоток статора и ротора; $L_{s\sigma}$, $L_{r\sigma}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора.

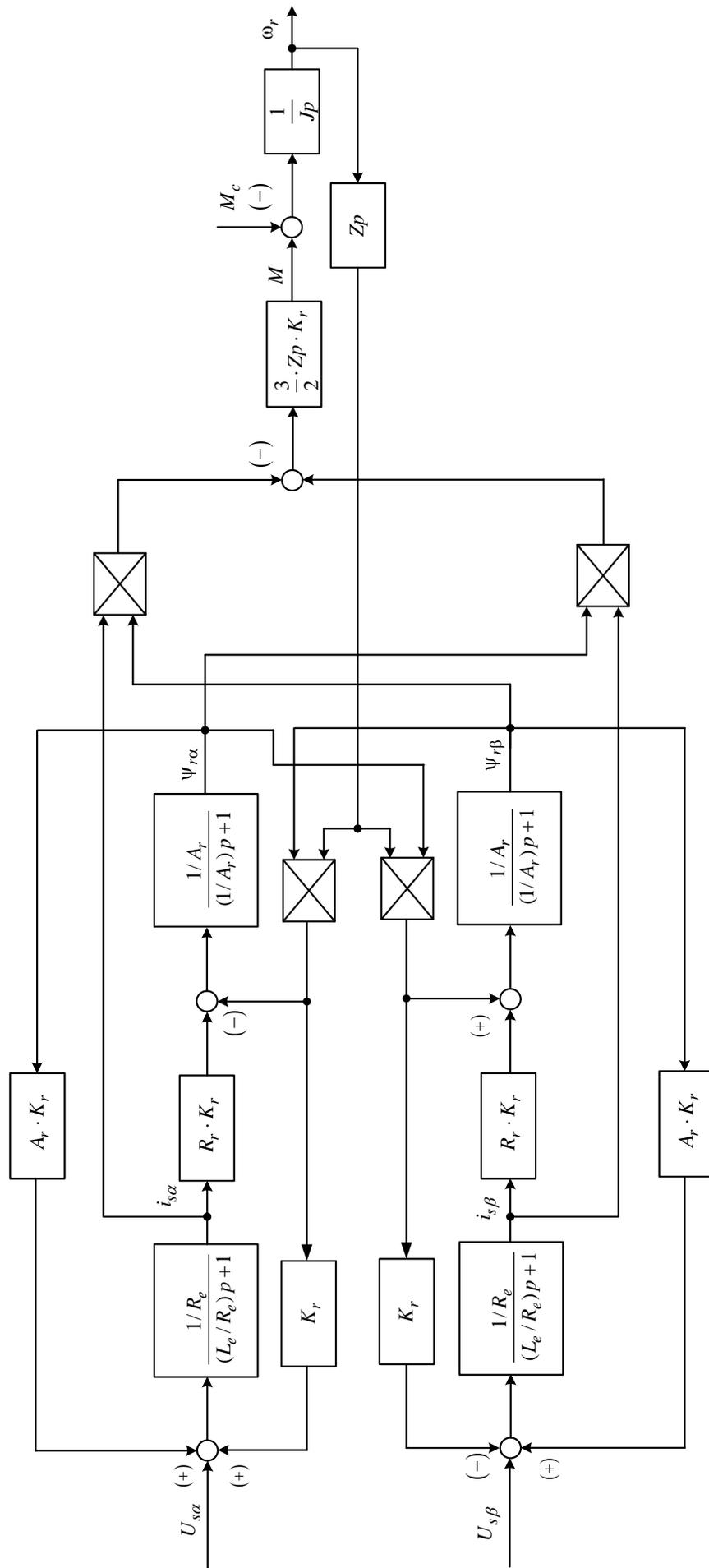


Рисунок 13 – Структурная схема асинхронного двигателя в неподвижной системе координат α - β

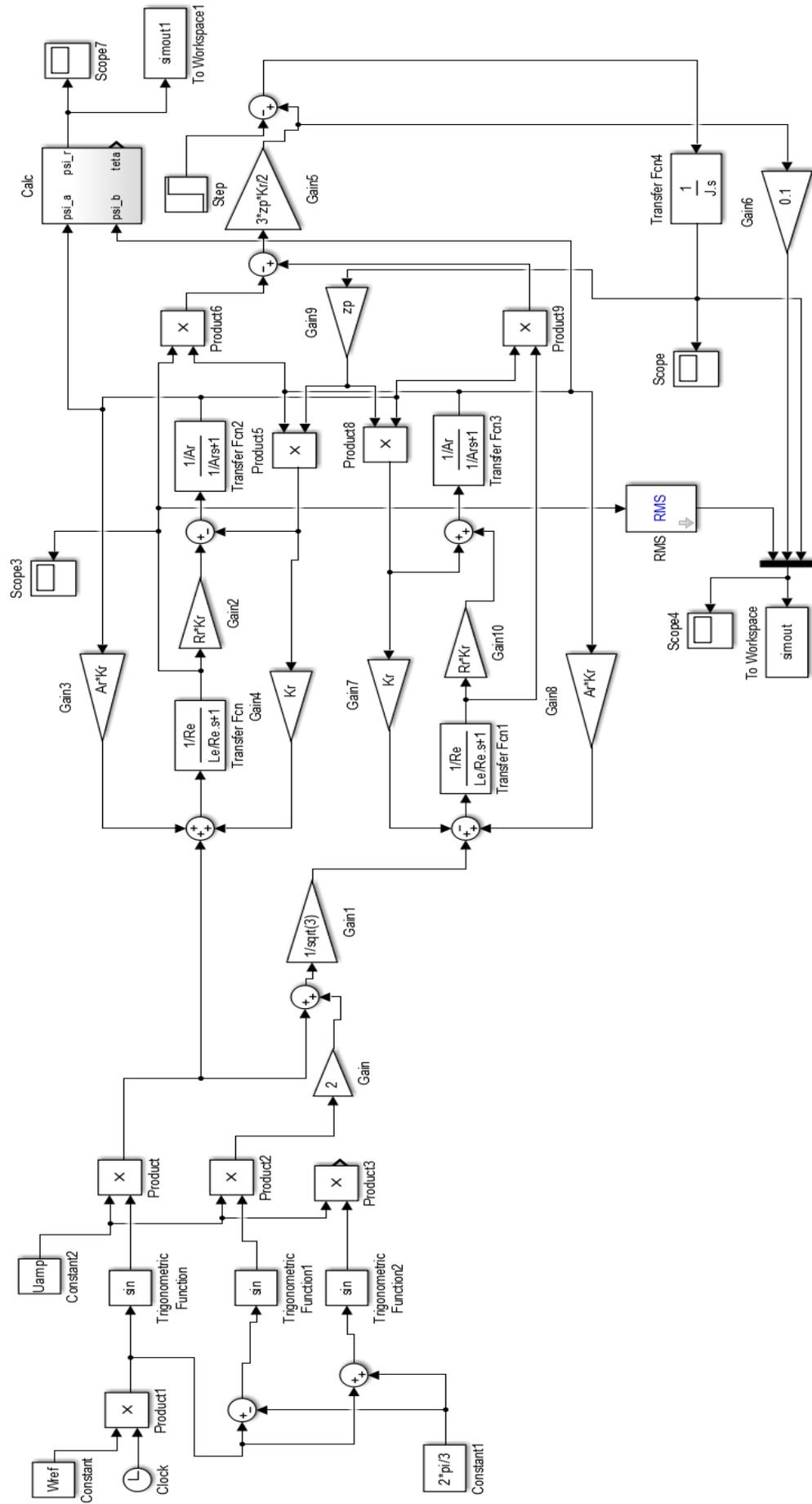


Рисунок 14 – Имитационная модель асинхронного двигателя в неподвижной системе координат в программной среде MATLAB Simulink

Полная индуктивность цепи статора:

$$L_1 = L_{\sigma 1} + L_{\mu} = 1,94 \cdot 10^{-4} + 0,009 = 0,009194 \text{ Гн.}$$

Полная индуктивность цепи ротора:

$$L'_2 = L'_{\sigma 2} + L_{\mu} = 2,61 \cdot 10^{-4} + 0,009 = 0,009261 \text{ Гн.}$$

Рассчитаем коэффициенты структурной схемы:

$$K_r = \frac{L_{\mu}}{L'_2} = \frac{0,009}{0,009261} = 0,971;$$

$$L_e = L_1 - \frac{L_{\mu}^2}{L'_2} = 0,009194 - \frac{0,009^2}{0,009261} = 0,00044 \text{ Гн};$$

$$R_e = R_1 + R'_2 \cdot K_r^2 = 0,0078 + 0,0077 \cdot 0,971^2 = 0,015 \text{ Ом};$$

$$A_r = \frac{R'_2}{L'_2} = \frac{0,0077}{0,009261} = 0,831.$$

Переходные процессы в АД при прямом пуске вхолостую и набросе номинальной нагрузки представлены на рисунке 15.

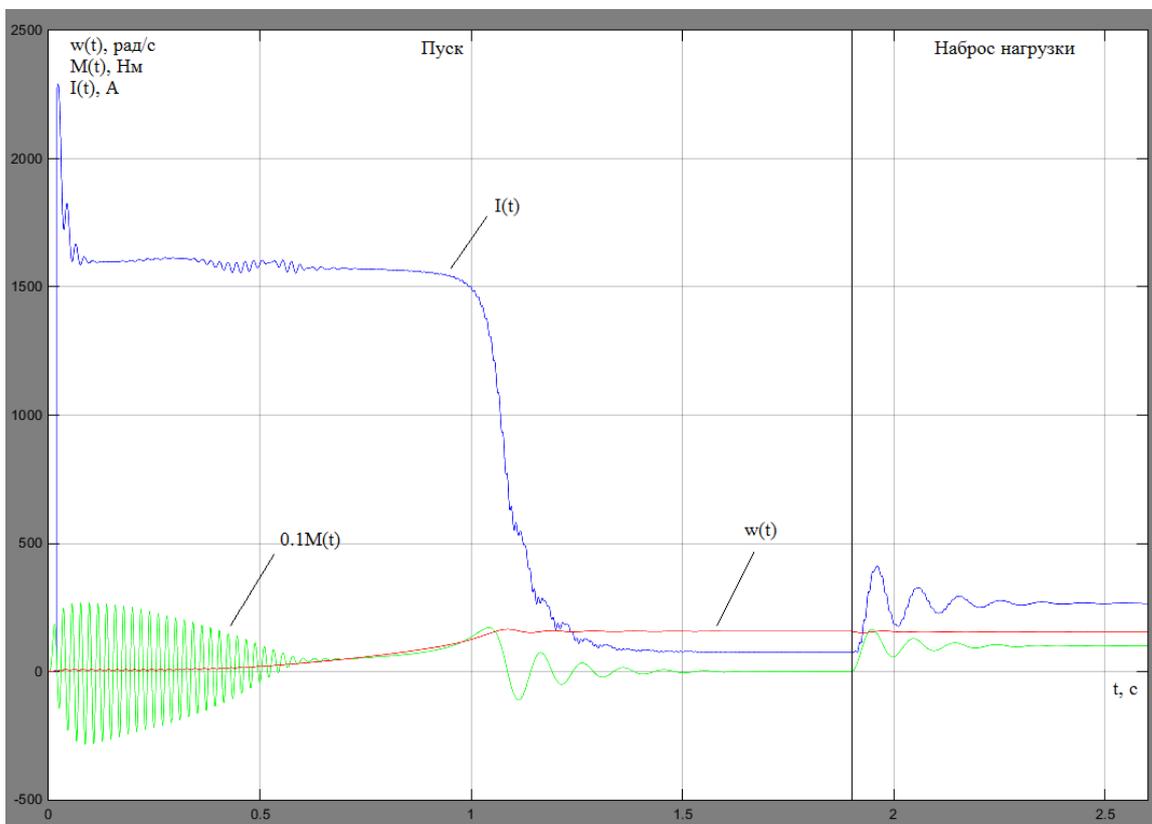


Рисунок 15 – Переходные процессы в АД при прямом пуске вхолостую и последующем набросе номинальной нагрузки

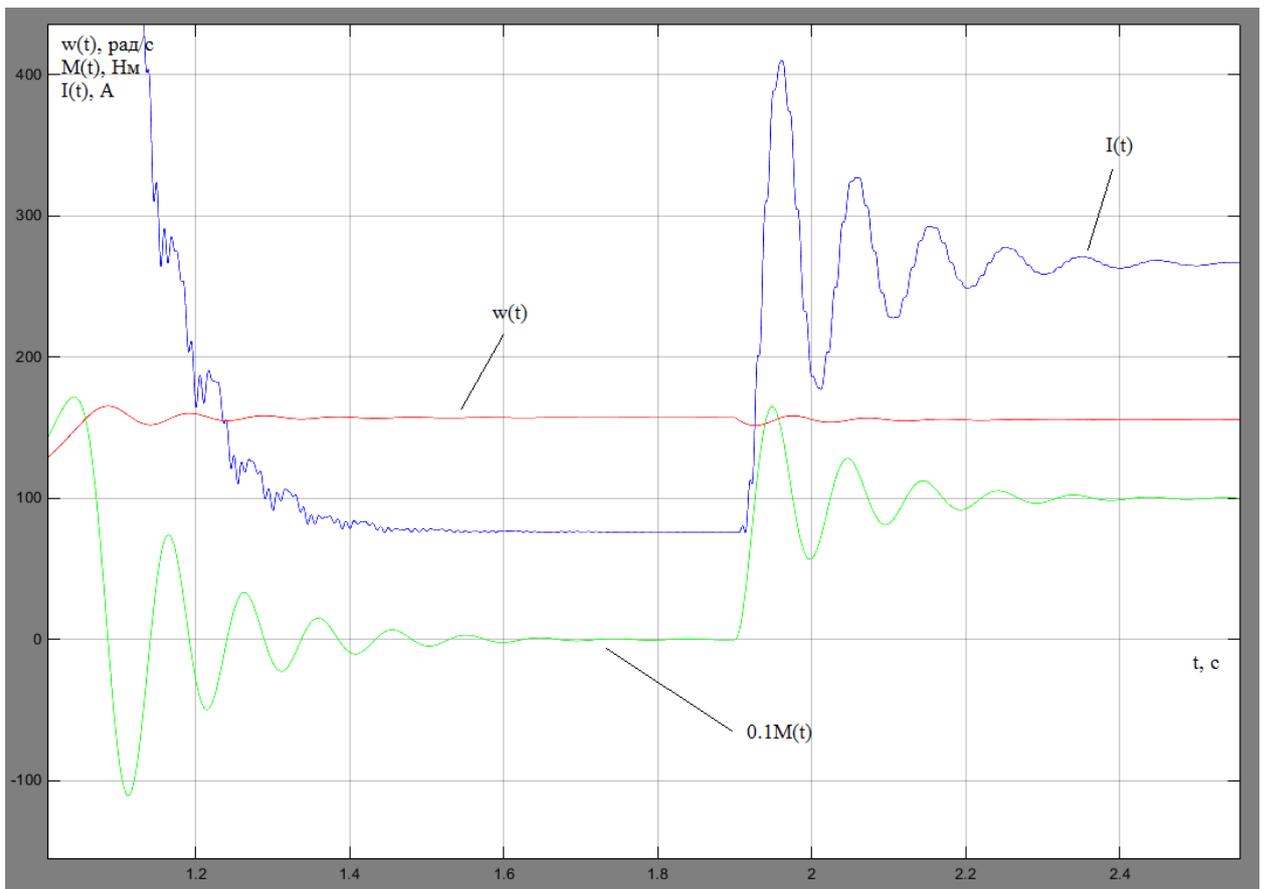


Рисунок 16 – Установившиеся значения тока и скорости в АД при прямом пуске вхолостую и набросе номинальной нагрузки

Рассчитаем получившиеся значения тока холостого хода, номинального тока и скольжения АД:

$$s_H = 1 - \frac{\omega_{\text{дв.ном}}}{\omega_0} = 1 - \frac{155,66}{157,08} = 0,009 = 0,9\% ,$$

$$I_0 = \frac{I_0}{\sqrt{2}} = \frac{108}{\sqrt{2}} = 76,24 \text{ A} ,$$

$$I_1 = \frac{I_1}{\sqrt{2}} = \frac{380}{\sqrt{2}} = 268,7 \text{ A} .$$

Из полученных графиков и расчетов можно сделать вывод о том, что имитационная модель адекватна, то есть числовые значения координат электропривода в установившемся режиме практически соответствуют теоретически рассчитанным значениям.

3.2 Моделирование прямого пуска электродвигателя во вращающейся системе координат

Для построения векторной системы управления необходимо создать модель двигателя во вращающейся системе координат.

Математическое описание АД во вращающейся системе координат x – y :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dI_{sx}}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot [U_{sx} - R_e \cdot I_{sx} + K_r \cdot A_r \cdot \Psi_{rx} + K_r \cdot z_p \cdot \omega_r \cdot \Psi_{ry}] + \omega_k \cdot I_{sy} \\ \frac{dI_{sy}}{dt} = \frac{1}{L_e} \cdot [U_{sy} - R_e \cdot I_{sy} + K_r \cdot A_r \cdot \Psi_{ry} - K_r \cdot z_p \cdot \omega_r \cdot \Psi_{rx}] - \omega_k \cdot I_{sx} \\ \frac{d\Psi_{rx}}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot I_{sx} - A_r \cdot \Psi_{rx} + \omega_k \cdot \Psi_{ry} - z_p \cdot \omega_r \cdot \Psi_{ry} \\ \frac{d\Psi_{ry}}{dt} = R_r \cdot K_r \cdot I_{sy} - A_r \cdot \Psi_{ry} - \omega_k \cdot \Psi_{rx} + z_p \cdot \omega_r \cdot \Psi_{rx} \\ M = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot K_r \cdot [\Psi_{rx} \cdot I_{sy} - \Psi_{ry} \cdot I_{sx}] \\ \frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} \cdot [M - M_{нагр}] \end{array} \right.$$

Здесь I_{sx} , I_{sy} , U_{sx} , U_{sy} – компоненты пространственных векторов тока и напряжения статора; Ψ_{rx} , Ψ_{ry} – компоненты пространственного вектора

потокосцепления ротора; $R_e = R_s + R_r \cdot K_r^2$, $L_e = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}$, $K_r = \frac{L_m}{L_r}$, $A_r = \frac{R_r}{L_r}$,

$L_s = L_{s\sigma} + L_m$, $L_r = L_{r\sigma} + L_m$ – полные индуктивности обмоток статора и ротора; $L_{s\sigma}$, $L_{r\sigma}$ – индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора.

Структурная схема двигателя, соответствующая приведенным уравнениям в системе координат x – y , представлена на рисунке 17. Имитационная модель асинхронного двигателя в программной среде MATLAB Simulink приведена на рисунке 18^[1].

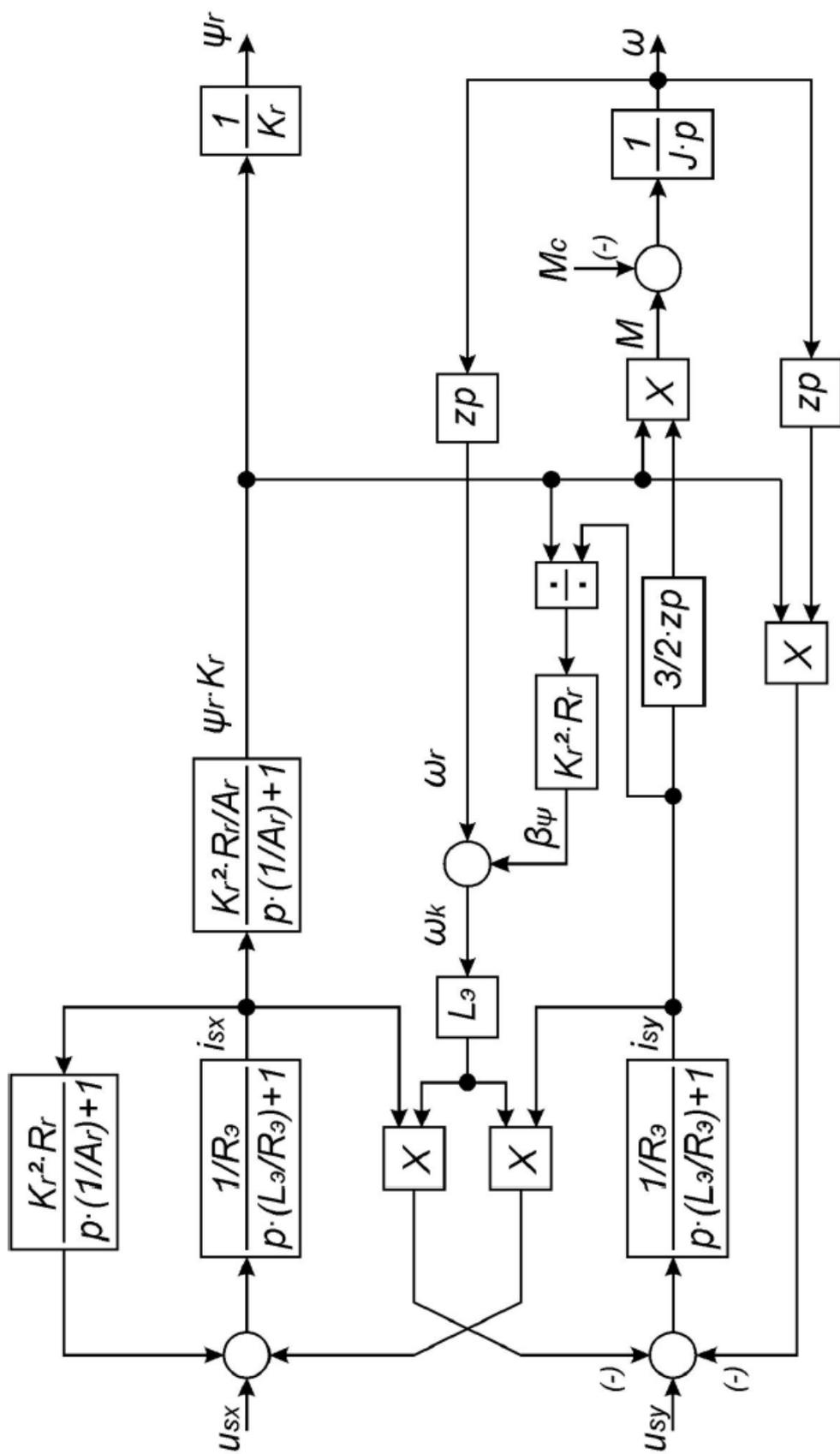


Рисунок 17 – Структурная схема асинхронного двигателя во вращающейся системе координат x–y

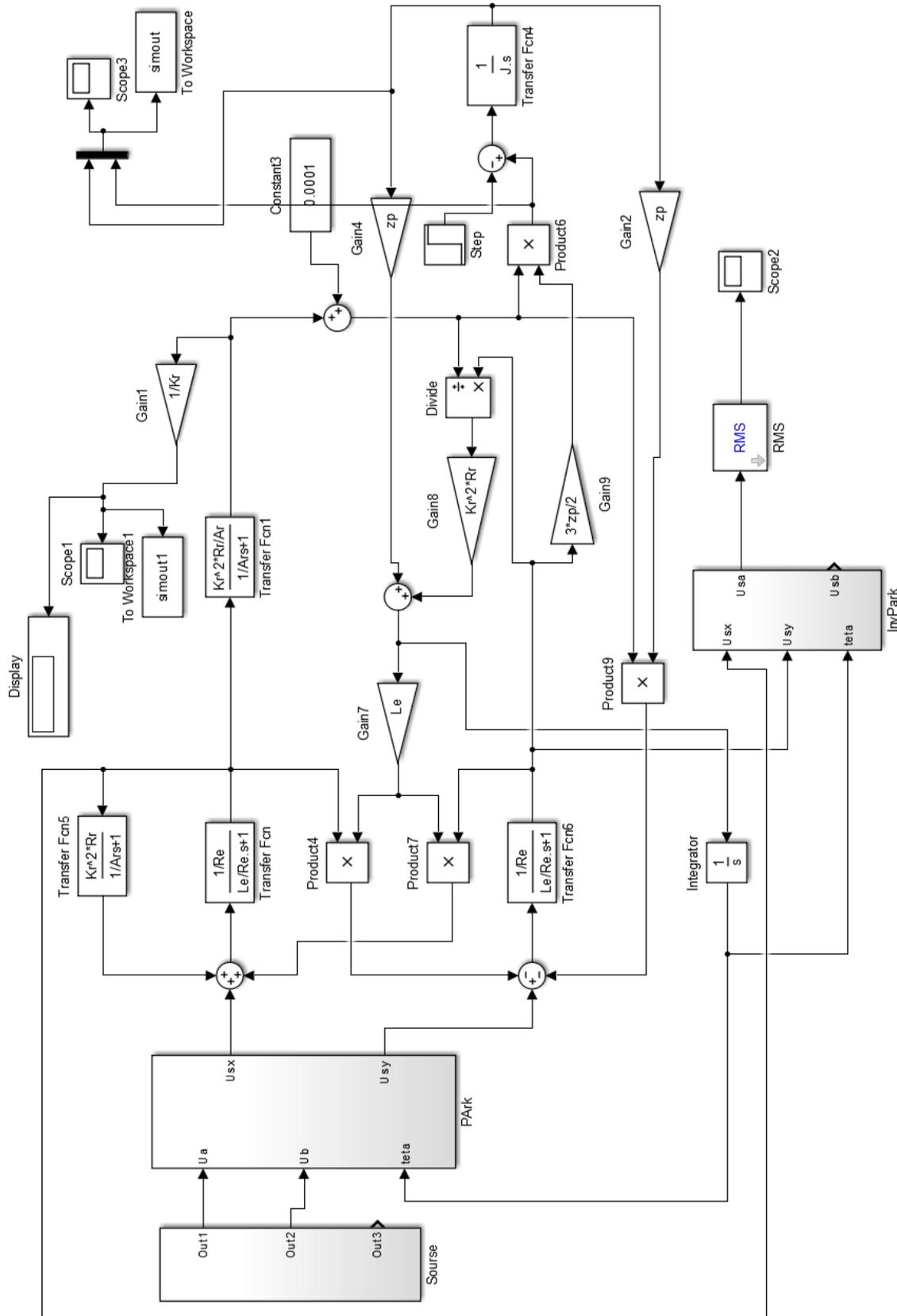


Рисунок 18 – Имитационная модель асинхронного двигателя во вращающейся системе координат в программной среде MATLAB Simulink

Переходные процессы в АД при прямом пуске вхолостую и набросе номинальной нагрузки представлены на рисунке 19.

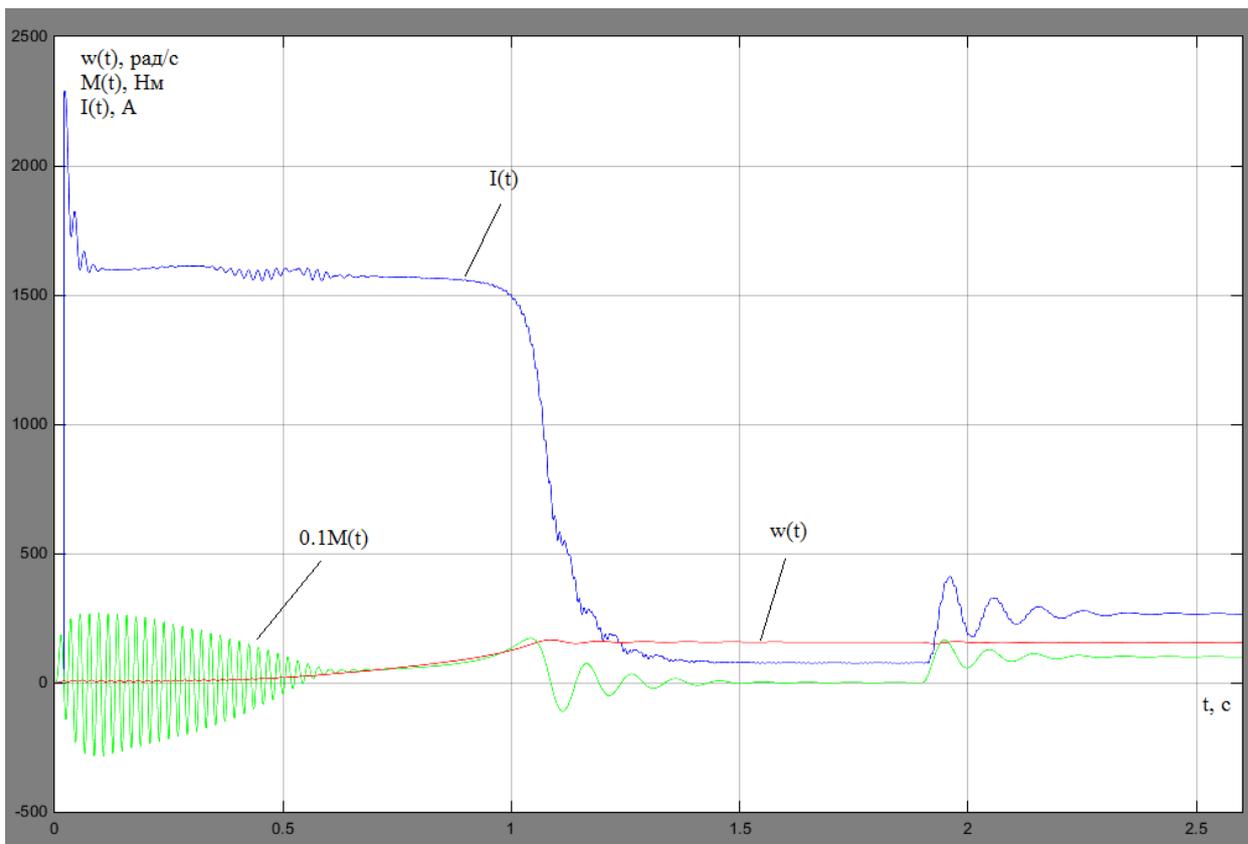


Рисунок 19 – Переходные процессы в АД при прямом пуске вхолостую и последующем набросе номинальной нагрузки

Сведем значения параметров АД при моделировании во вращающейся и неподвижной системах координат в таблицу 4.

Таблица 4 – Сравнение параметров АД при проектировании в различных системах координат

| I_0, A | I_1, A | $s_H, \%$ |
|---------------------|----------|-----------|
| Неподвижная система | | |
| 76,24 | 268,7 | 0,9 |
| Вращающаяся система | | |
| 76,23 | 265,6 | 0,91 |

Сравнивая модели двигателей в неподвижной и вращающейся системах координат, можно сделать вывод, что они практически идентичны. Следовательно, в дальнейшей разработке системы управления уместно использовать модель двигателя во вращающейся системе координат.

4.1 Оптимизация контуров регулирования

4.1.1 Оптимизация контура тока

Структурная схема контура регулирования составляющей тока статора i_{sx} представлена на рисунке 21.

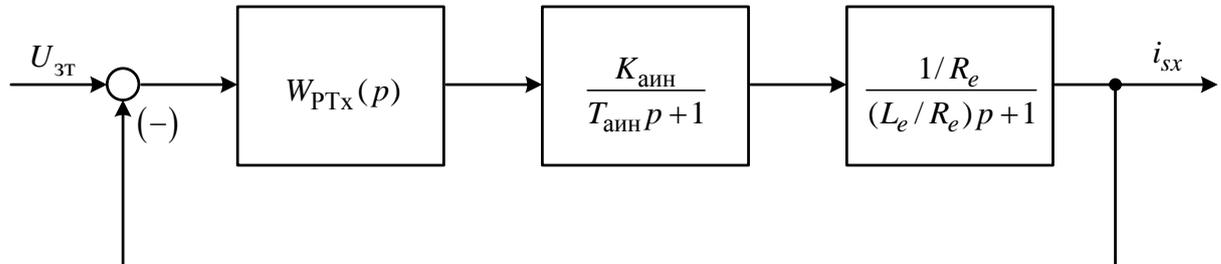


Рисунок 21 – Структурная схема контура регулирования составляющей тока статора i_{sx}

Преобразователь частоты представлен в системе электропривода апериодическим звеном первого порядка.

Принимаем значение коэффициента усиления преобразователя равным единице:

$$k_{аин} = 1.$$

Эквивалентная постоянная времени преобразователя:

$$T_{аин} = \frac{0,5}{f_{шим}} = \frac{0,5}{6000} = 83,33 \cdot 10^{-6} \text{ с.}$$

Контур тока настраиваем на модульный оптимум. В этом случае принимаем ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{пт}(p) = k_{пт} \cdot \frac{T_{пт} \cdot p + 1}{T_{пт} \cdot p}.$$

Принимаем малую некомпенсируемую постоянную времени контура тока равной постоянной времени автономного инвертора напряжения:

$$T_{пт} = T_{аин} = 83,33 \cdot 10^{-6}.$$

Коэффициент передачи регулятора тока:

$$k_{\text{пр}} = \frac{L_e}{K_{\text{аин}} \cdot a_T \cdot T_{\text{аин}}} = \frac{0,00044}{1 \cdot 2 \cdot 83,33 \cdot 10^{-6}} = 2,64.$$

где $a_T = 2$ – коэффициент оптимизации.

Постоянная времени регулятора тока:

$$T_{\text{пр}} = \frac{L_e}{R_e} = \frac{0,00044}{0,015} = 0,029.$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура тока:

- установившаяся ошибка: $\Delta I_{\text{уст}} = 0$;
- перерегулирование: $\sigma = 4,3\%$;
- время первого согласования: $t_{\text{py1}}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu\Gamma} = 0,00033 \text{ с}$;
- время переходного процесса при обработке ступенчатого управляющего воздействия: $t_{\text{py2}}^{(5)} = 4,1 \cdot T_{\mu\Gamma} = 0,00033 \text{ с}$;
- полоса пропускания по модулю и фазе:

$$\omega_{\text{п}}^{(\Phi)} = \omega_{\text{п}}^{(M)} = \frac{0,71}{T_{\mu\Gamma}} = 8520,34 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Имитационная модель замкнутого контура тока представлена на рисунке 22.

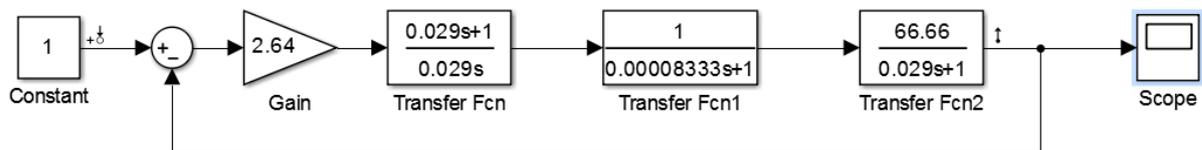


Рисунок 22 – Имитационная модель замкнутого контура тока

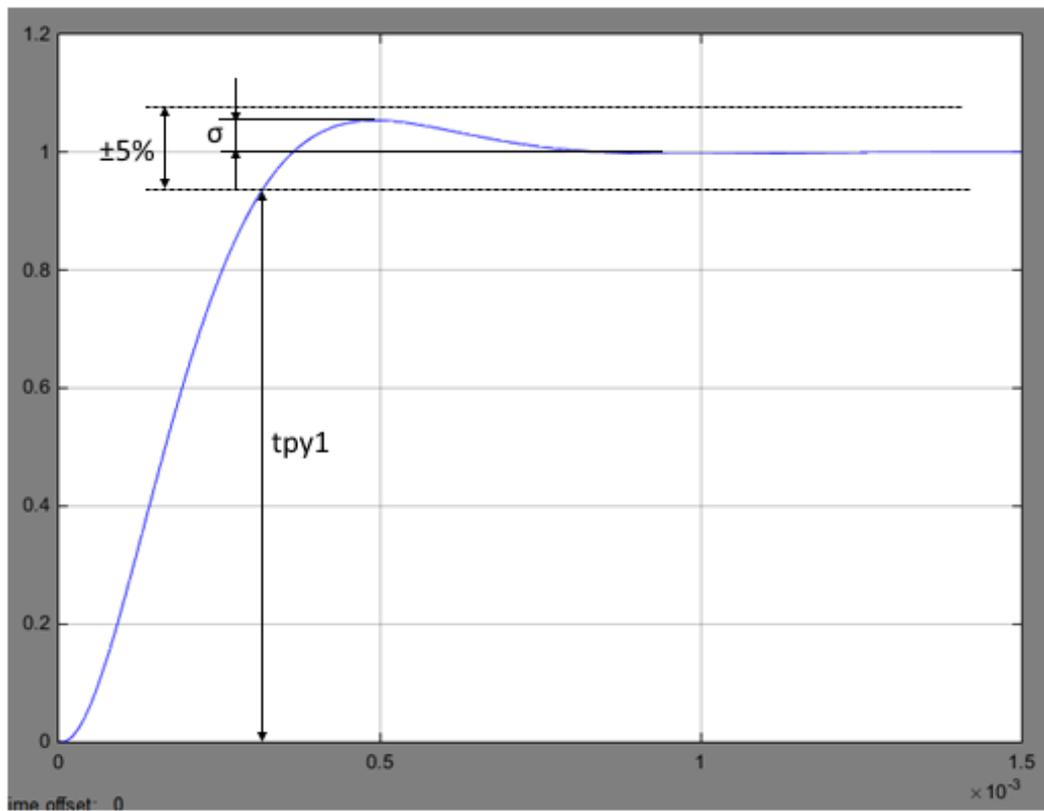


Рисунок 23 – Переходный процесс в контуре тока

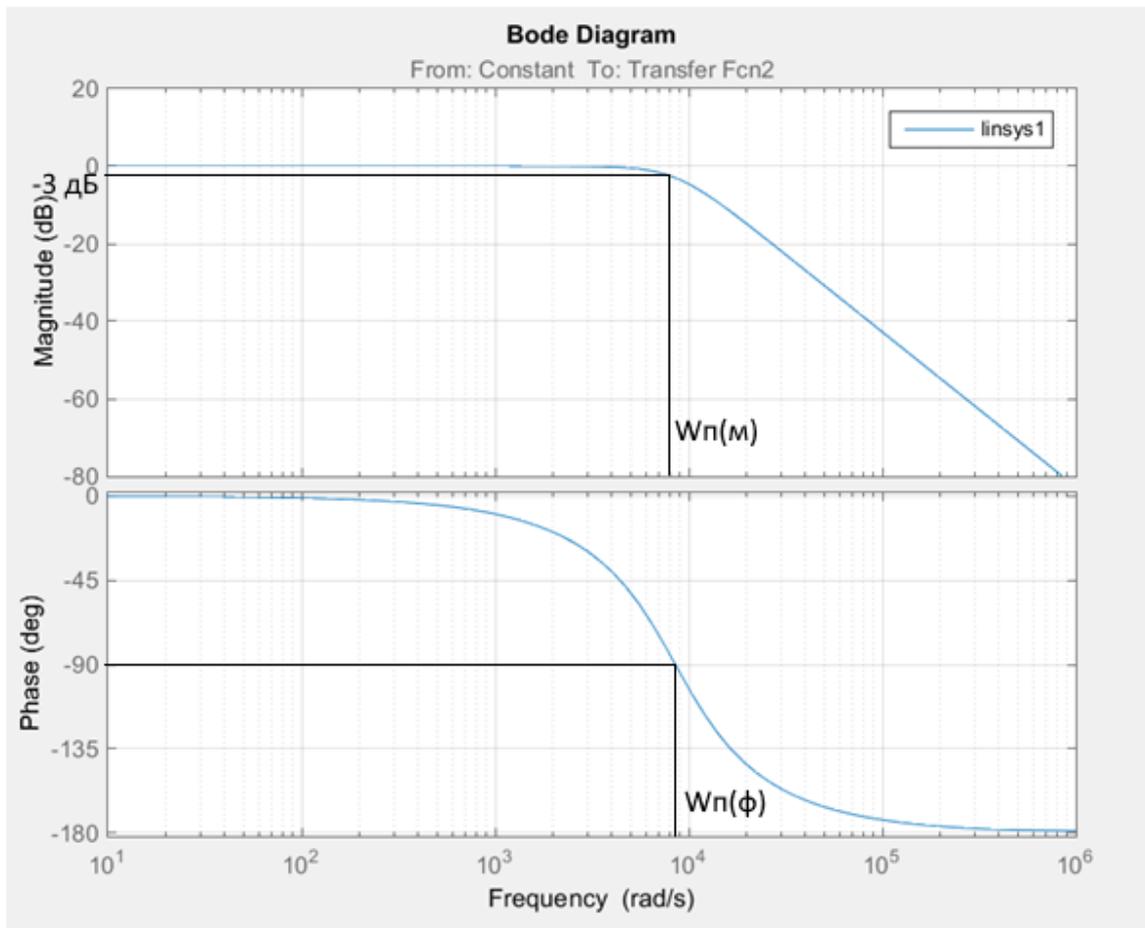


Рисунок 24 – ЛЧХ замкнутого контура тока

Сведем теоретические и экспериментальные показатели качества работы линейризованного контура тока в таблицу 5.

Таблица 5 – Показатели качества переходных процессов по управлению линейризованного контура тока, оптимизированного по МО

| $t_{py1}^{(5)}, c$ | $t_{py2}^{(5)}, c$ | $\sigma, \%$ | $\Delta I_{уст}, A$ | $\omega_{п}^{(ф)}, \frac{рад}{c}$ | $\omega_{п}^{(м)}, \frac{рад}{c}$ |
|--------------------------|--------------------|--------------|---------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Ожидаемые показатели | | | | | |
| 0,00033 | - | 4,3 | 0 | 8520 | 8520 |
| Результаты моделирования | | | | | |
| 0,0003 | - | 4 | 0 | 8300 | 8000 |

Сравнивая ожидаемые показатели качества переходного процесса в контуре тока, оптимизированного по МО, с результатами моделирования, можно сказать, что теоретические значения практически сошлись с полученными.

Контур регулирования составляющей тока статора i_{sy} аналогичен по своей структуре контуру, полученному в результате вышеприведенной оптимизации.

4.1.2 Оптимизация контура потокосцепления ротора

Структурная схема контура потокосцепления ротора представлена на рисунке 25.

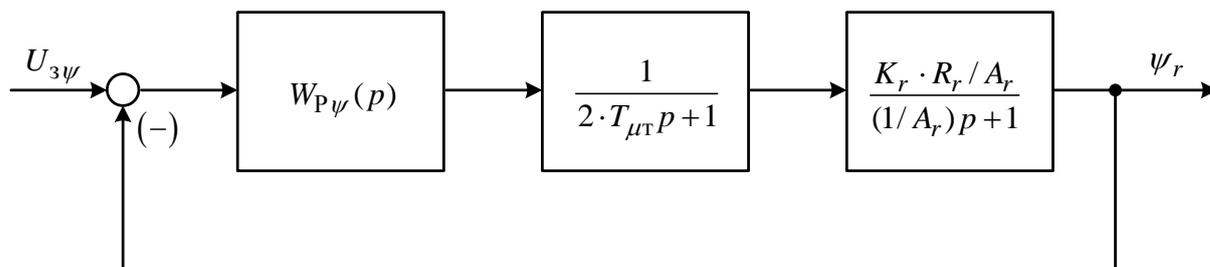


Рисунок 25 – Структурная схема контура потокосцепления ротора

Внутренний оптимизированный контур тока представлен усеченной передаточной функцией:

$$W_{\text{з.к.т.}}(p) = \frac{1}{2 \cdot T_{\mu\Gamma} \cdot p + 1}.$$

Контур потокосцепления ротора настраиваем на модульный оптимум. В этом случае принимаем ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{\text{р}\Psi}(p) = k_{\text{р}\Psi} \cdot \frac{T_{\text{р}\Psi} \cdot p + 1}{T_{\text{р}\Psi} \cdot p}.$$

Коэффициент передачи регулятора потокосцепления ротора:

$$k_{\text{р}\Psi} = \frac{1}{K_r \cdot R_r \cdot a_n \cdot a_r \cdot T_{\mu\Gamma}} = \frac{1}{0,971 \cdot 0,0077 \cdot 2 \cdot 2 \cdot 83,33 \cdot 10^{-6}} = 401262,$$

где $a_{\Psi} = a_r = 2$ – коэффициенты оптимизации.

Постоянная времени регулятора потокосцепления ротора:

$$T_{\text{р}\Gamma} = \frac{1}{A_r} = \frac{1}{0,831} = 1,2 \text{ с.}$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура потокосцепления ротора:

- установившаяся ошибка: $\Delta\Psi_{\text{уст}} = 0$;
- перерегулирование: $\sigma = 8,14\%$;
- время первого согласования: $t_{\text{ру1}}^{(5)} = 7 \cdot T_{\mu\Gamma} = 0,00058 \text{ с}$;
- время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего воздействия: $t_{\text{ру2}}^{(5)} = 12 \cdot T_{\mu\Gamma} = 0,00099 \text{ с}$;
- полоса пропускания по модулю:

$$\omega_n^{(M)} = \frac{0,5}{T_{\mu\Gamma}} = 6000 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

- полоса пропускания по фазе:

$$\omega_n^{(\Phi)} = \frac{0,35}{T_{\mu\Gamma}} = 4200 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Имитационная модель замкнутого контура потокосцепления ротора представлена на рисунке 26.

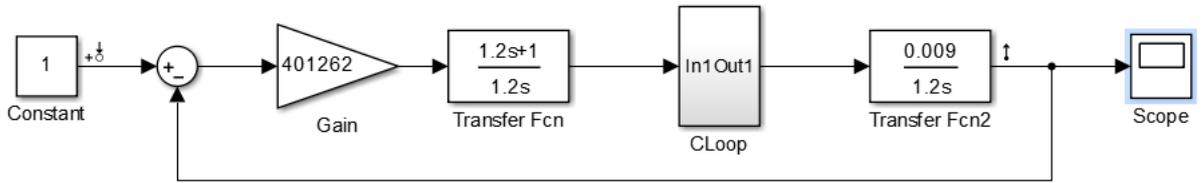


Рисунок 26 – Имитационная модель замкнутого контура потокосцепления ротора

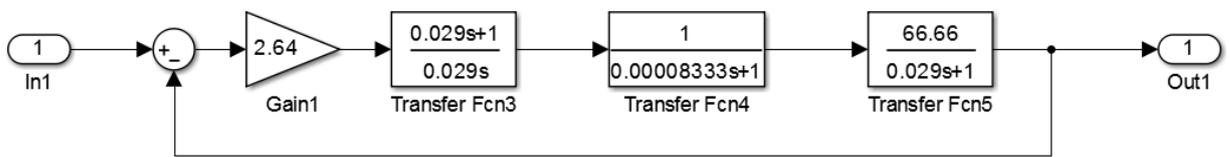


Рисунок 27 – Имитационная модель подсистемы «Current Loop»

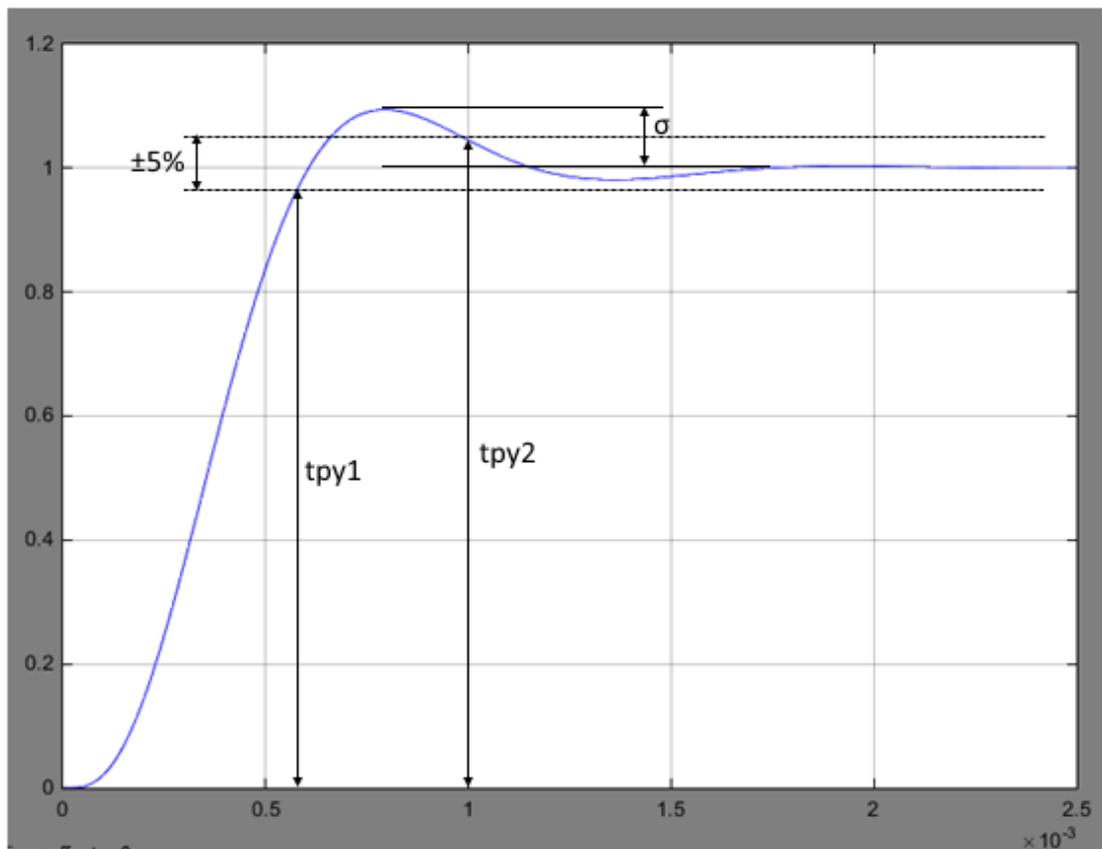


Рисунок 28 – Переходный процесс в контуре потокосцепления ротора

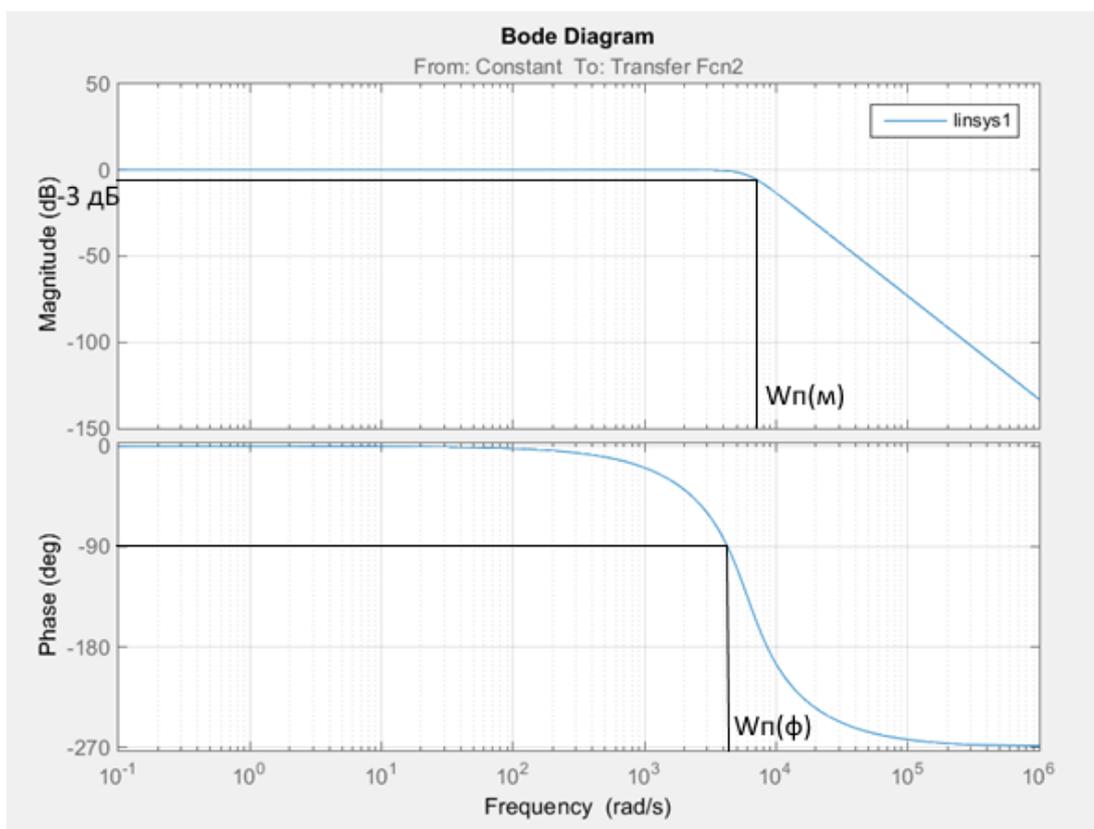


Рисунок 29 – ЛЧХ замкнутого контура потокосцепления ротора

Сведем теоретические и экспериментальные показатели качества работы линеаризованного контура тока в таблицу 6.

Таблица 6 – Показатели качества переходных процессов по управлению линеаризованного контура потокосцепления, оптимизированного по МО

| $t_{py1}^{(5)}, c$ | $t_{py2}^{(5)}, c$ | $\sigma, \%$ | $\Delta\psi_{уст}, Вб$ | $\omega_{п}^{(\phi)}, \frac{рад}{с}$ | $\omega_{п}^{(м)}, \frac{рад}{с}$ |
|--------------------------|--------------------|--------------|------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Ожидаемые показатели | | | | | |
| 0,00058 | 0,00099 | 8,1 | 0 | 4200 | 6000 |
| Результаты моделирования | | | | | |
| 0,0006 | 0,001 | 8 | 0 | 3700 | 6000 |

Сравнивая ожидаемые показатели качества переходного процесса в контуре потокосцепления, оптимизированного на МО, с результатами моделирования, можно сказать, что теоретические значения сошлись с полученными с допустимой погрешностью.

4.1.3 Оптимизация контура скорости

Структурная схема контура скорости представлена на рисунке 30.

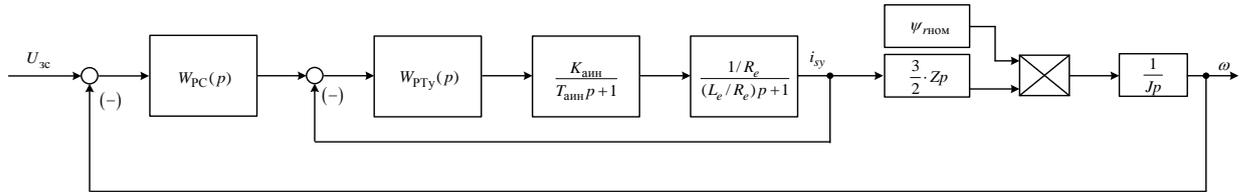


Рисунок 30 – Структурная схема контура скорости

Контур скорости настраиваем на симметричный оптимум. В этом случае принимаем ПИ-регулятор с передаточной функцией:

$$W_{pc}(p) = k_{pc} \cdot \frac{T_{pc} \cdot p + 1}{T_{pc} \cdot p}$$

Для уменьшения влияния работы контура потокосцепления на динамику контура скорости принимаем малую некомпенсируемую постоянную времени контура скорости:

$$T_{\mu c} = 32 \cdot T_{\mu \Gamma} = 32 \cdot 83,33 \cdot 10^{-6} = 0,0026 \text{ с.}$$

Для величины малой некомпенсируемой постоянной времени в контуре скорости принято значение $T_{\mu c} = 32T_{\mu \Gamma}$, что гораздо больше чем при оптимизации контура управления потокосцеплением. Данное положение приводит к снижению быстродействия в контуре скорости с одной стороны, но позволяет уменьшить взаимное влияние между контурами скорости и потокосцепления с другой.

Коэффициент передачи регулятора скорости

$$k_{pc} = \frac{J \cdot 98}{1,5 \cdot z_p \cdot \psi_{2H} \cdot a_c \cdot 1024 \cdot T_{\mu \Gamma}} = \frac{2,9 \cdot 98}{1,5 \cdot 2 \cdot 0,9 \cdot 8 \cdot 1024 \cdot 83,33 \cdot 10^{-6}} = 154,19,$$

где $a_c = 8$ – коэффициент оптимизации.

Постоянная времени регулятора скорости:

$$T_{pc} = 98 \cdot T_{\mu \Gamma} = 0,0081 \text{ с.}$$

Для уменьшения перерегулирования контура скорости, настроенного на симметричный оптимум, на вход контура устанавливаем фильтр (апериодическое звено первого порядка) с постоянной времени:

$$T_{\text{вх.ф}} = 32 \cdot 4 \cdot T_{\mu\text{т}} = 0,01 \text{ с.}$$

Ожидаемые показатели работы замкнутого контура скорости с фильтром на входе:

- установившаяся ошибка: $\Delta\omega_{\text{уст}} = 0$;
- перерегулирование: $\sigma = 8,1\%$;
- время первого согласования: $t_{\text{py1}}^{(5)} = 7 \cdot T_{\mu\text{с}} = 0,0182 \text{ с}$;
- время переходного процесса при отработке ступенчатого управляющего воздействия: $t_{\text{py2}}^{(5)} = 12 \cdot T_{\mu\text{с}} = 0,0312 \text{ с}$;
- полоса пропускания по модулю:

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{м})} = \frac{0,5}{T_{\mu\text{с}}} = 192,3 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

- полоса пропускания по фазе:

$$\omega_{\text{п}}^{(\text{ф})} = \frac{0,36}{T_{\mu\text{с}}} = 138,46 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

Имитационная модель замкнутого контура скорости представлена на рисунке 31.

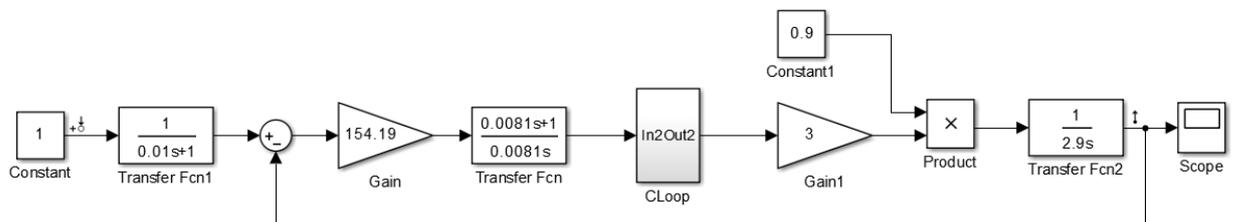


Рисунок 31 – Имитационная модель замкнутого контура скорости

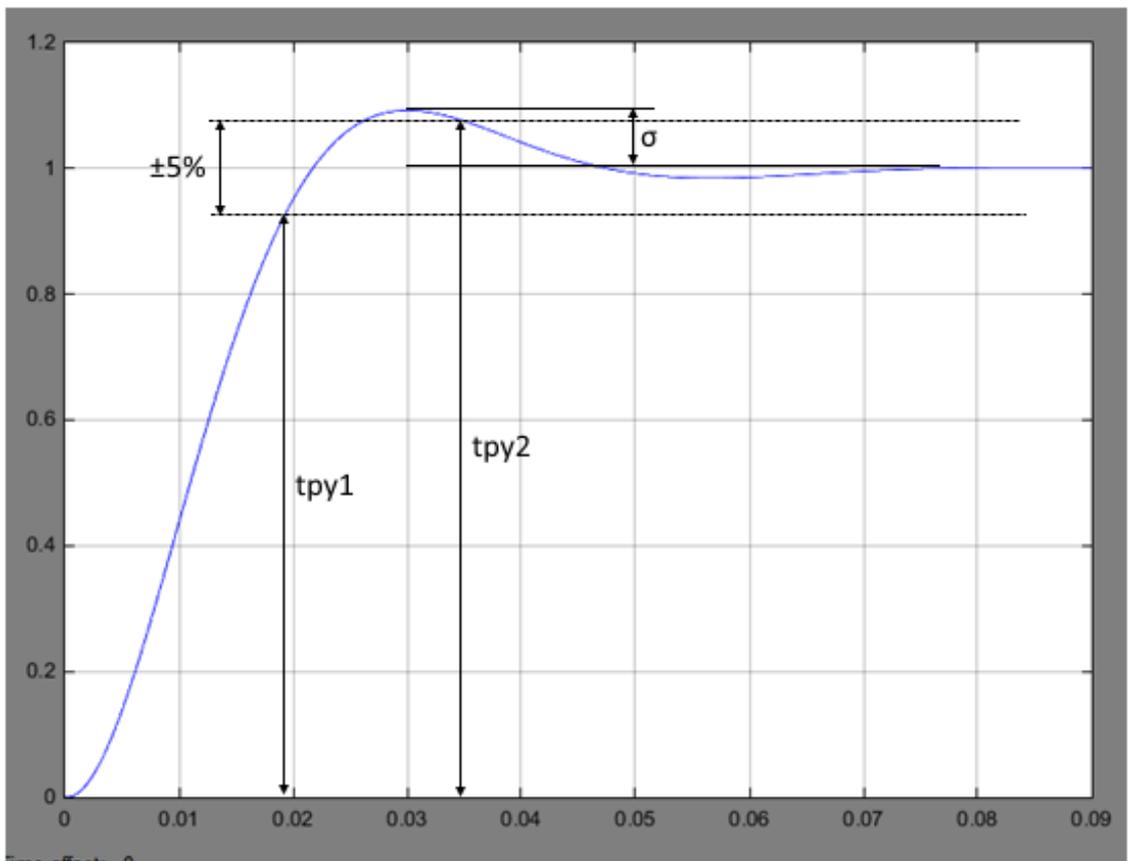


Рисунок 32 – Переходный процесс в контуре скорости

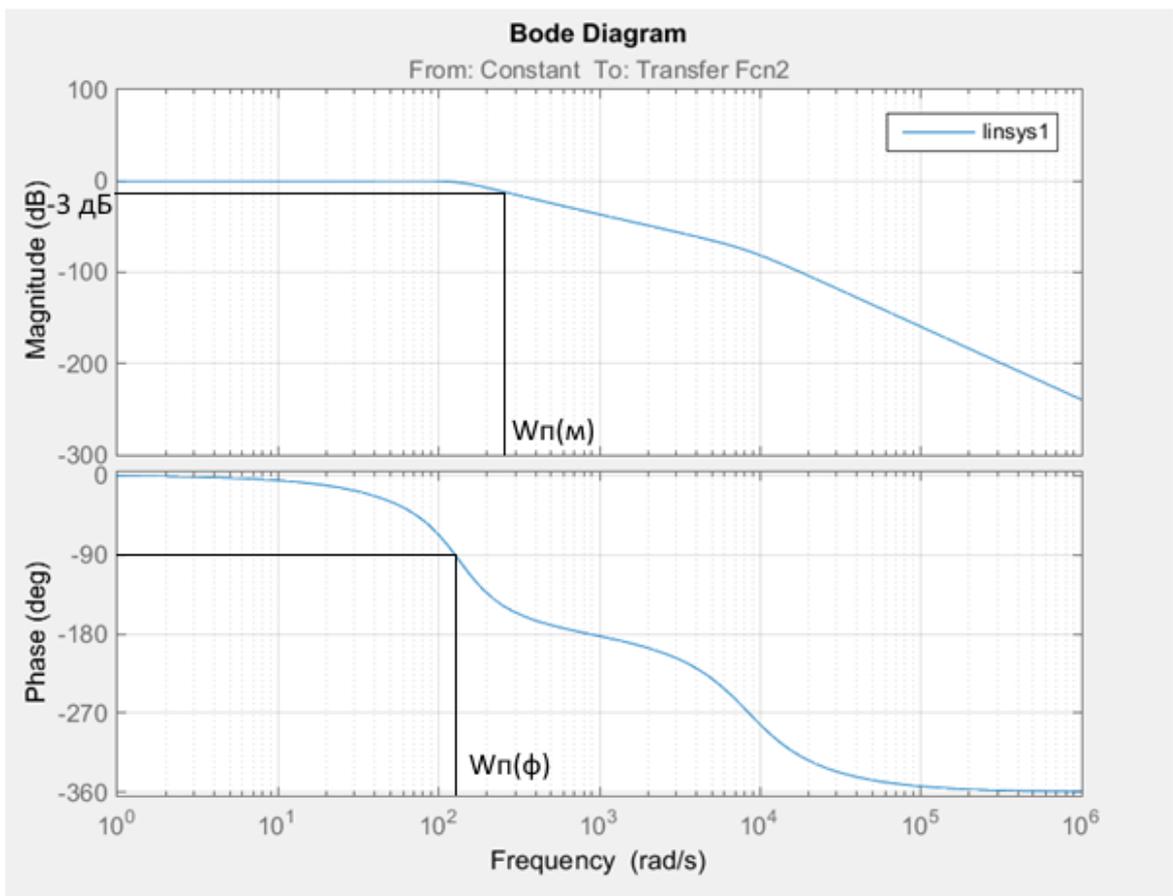


Рисунок 33 – ЛЧХ замкнутого контура скорости

Сведем теоретические и экспериментальные показатели качества работы линеаризованного контура тока в таблицу 7.

Таблица 7 – Показатели качества переходных процессов по управлению линеаризованного контура скорости, оптимизированного по СО

| $t_{py1}^{(5)}, c$ | $t_{py2}^{(5)}, c$ | $\sigma, \%$ | $\Delta\omega_{уст}, рад/с$ | $\omega_{п}^{(ф)}, \frac{рад}{с}$ | $\omega_{п}^{(м)}, \frac{рад}{с}$ |
|--------------------------|--------------------|--------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Ожидаемые показатели | | | | | |
| 0,0182 | 0,0312 | 8,1 | 0 | 138,46 | 192,3 |
| Результаты моделирования | | | | | |
| 0,019 | 0,034 | 9,2 | 0 | 94 | 170 |

Сравнивая ожидаемые показатели качества переходного процесса в контуре скорости, оптимизированного по СО с фильтром на входе, с результатами моделирования, можно сказать, что теоретические значения сошлись с полученными с незначительной погрешностью.

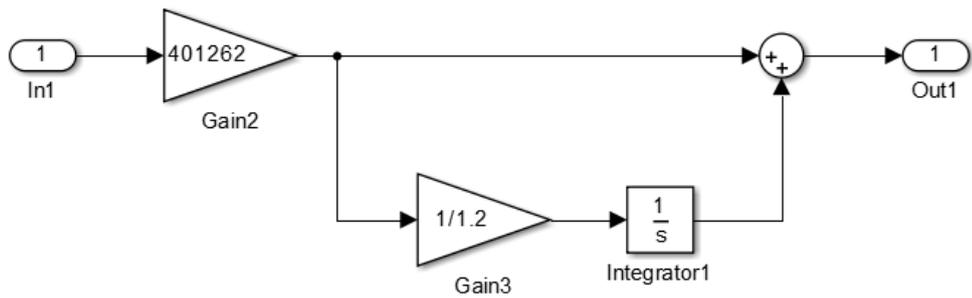


Рисунок 35 – Подсистема «Rpsi»

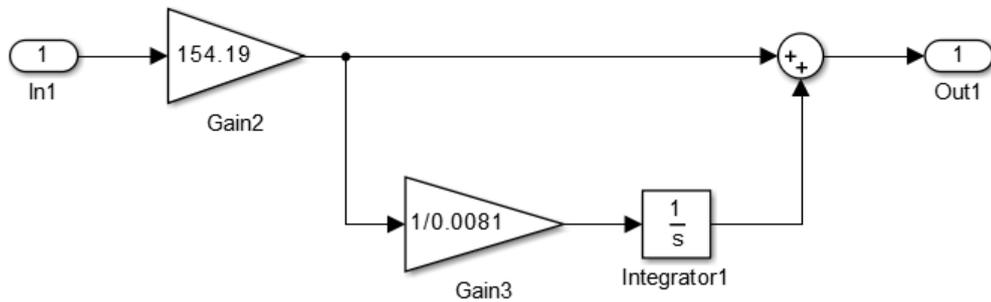


Рисунок 36 – Подсистема «Rw»

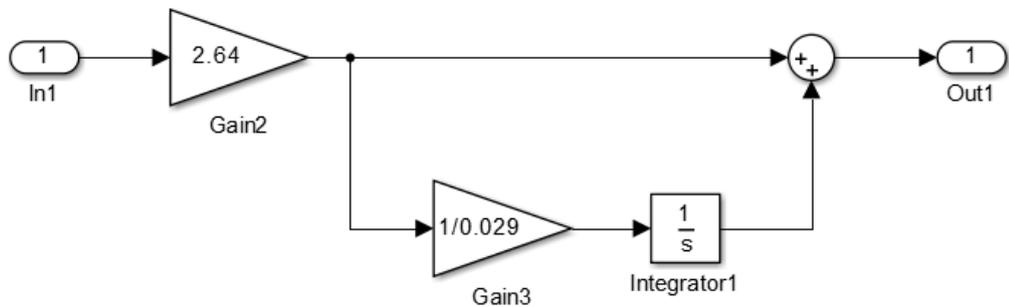


Рисунок 37 – Подсистема «RT»

С помощью этой модели получаем переходные процессы по скорости и потокосцеплению и сравниваем их с переходными процессами в идеальных оптимизированных контурах.

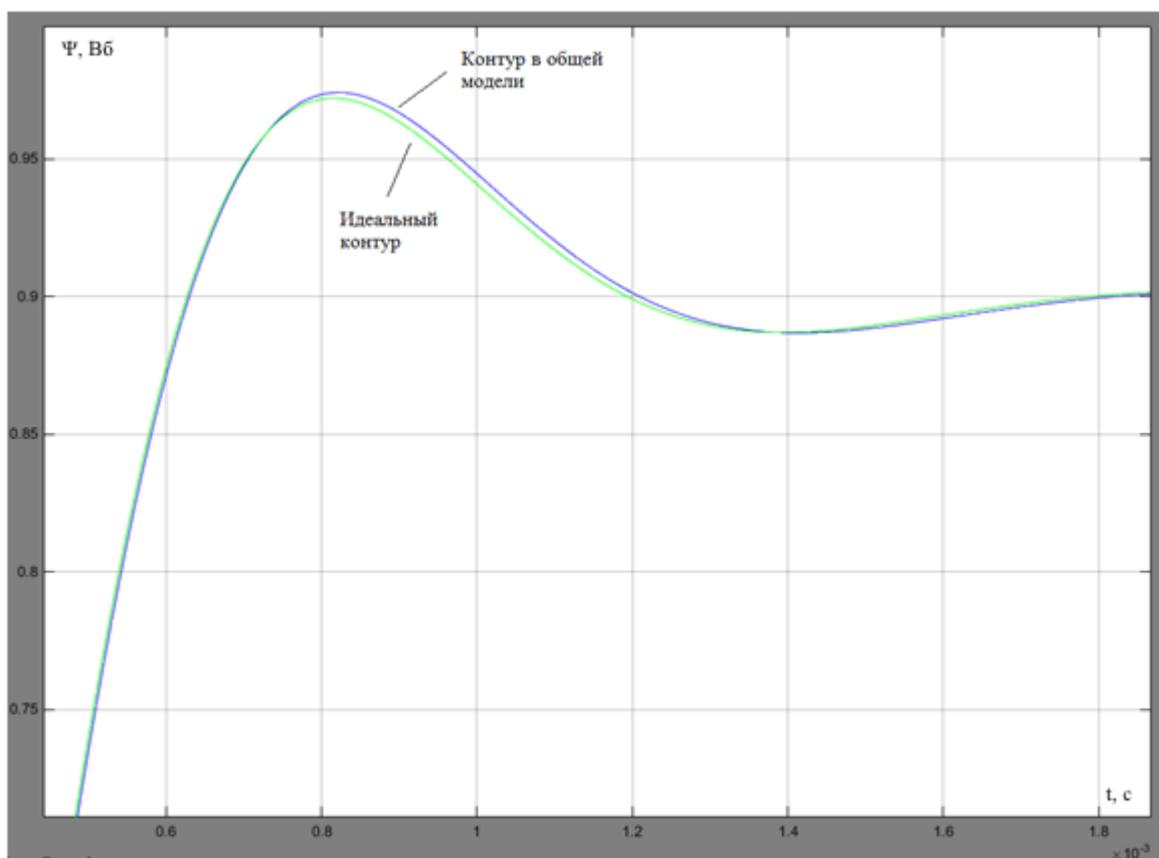


Рисунок 38 – Переходные процессы потокоцепления в идеальном контуре и в общей модели

Таблица 8 – Сравнение показателей качества переходных процессов

| Потокоцепление | | Скорость | |
|-----------------------|--------------|---------------------|--------------|
| $\psi_{уст}$, Вб | σ , % | $\omega_{уст}$, Вб | σ , % |
| Идеальный контур | | | |
| 0,9 | 8 | 147,8 | 9,2 |
| Контур в общей модели | | | |
| 0,8998 | 8,2 | 147,8 | 9,7 |

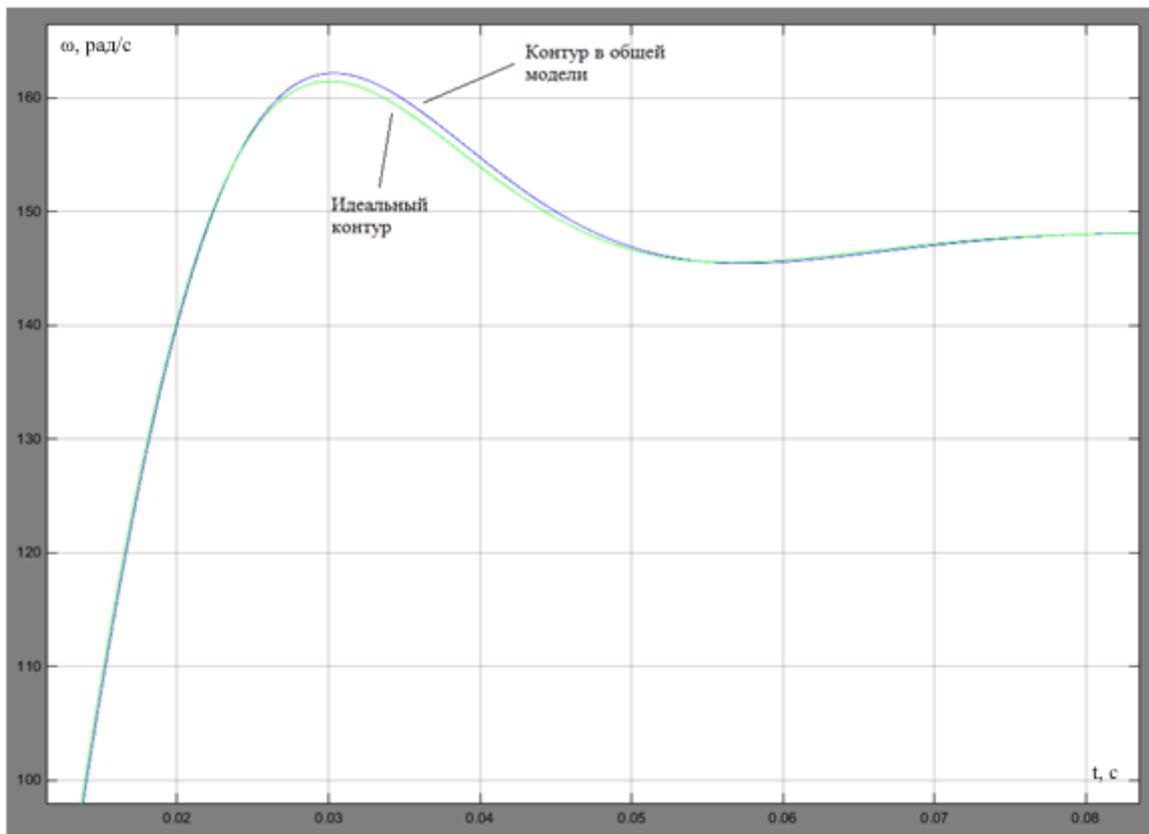


Рисунок 39 – Переходные процессы скорости в идеальном контуре и в общей модели

Анализируя данный переходный процесс можно определить, что контур скорости оказывает непосредственное влияние на контур потокосцепления. Незначительно уменьшилось установившееся значение потокосцепления, а также увеличилось перерегулирование. Но эти изменения настолько незначительны, что ими можно смело пренебречь. В контуре скорости также наблюдается изменение перерегулирования, но отсутствует изменение в установившемся значении скорости.

4.3 Общая модель электропривода в неподвижной системе координат

Так как система управления может быть создана только во вращающейся системе координат, а реальные токи и напряжения – это токи и напряжения в неподвижной системе координат, то в связи с этим регуляторы координат электропривода и модель двигателя в неподвижной системе координат необходимо согласовать посредством координатных преобразователей. Преобразование координат из неподвижной системы координат во вращающуюся и наоборот производят путем применения прямого и обратного преобразований Парка соответственно:

$$\left. \begin{aligned} i_x &= i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta \\ i_y &= -i_\alpha \sin \theta + i_\beta \cos \theta \end{aligned} \right\}$$
$$\left. \begin{aligned} i_\alpha &= i_x \cos \theta - i_y \sin \theta \\ i_\beta &= i_x \sin \theta + i_y \cos \theta \end{aligned} \right\}$$

На структурной схеме рисунка 28 эти преобразования осуществляются блоками ПКП (прямой преобразователь координат) и ОКП (обратный преобразователь координат).

Блок ВП (вычислитель потока) рассчитывает модуль и угол поворота вектора потокосцепления ротора, используя информацию о проекциях вектора потокосцепления на оси α и β неподвижной системы координат.

Расчет производится по следующим формулам:

$$|\psi_2| = \sqrt{\psi_{2\alpha}^2 + \psi_{2\beta}^2}$$
$$\theta_{\psi_2} = \arctg \left(\frac{\psi_{2\beta}}{\psi_{2\alpha}} \right)$$

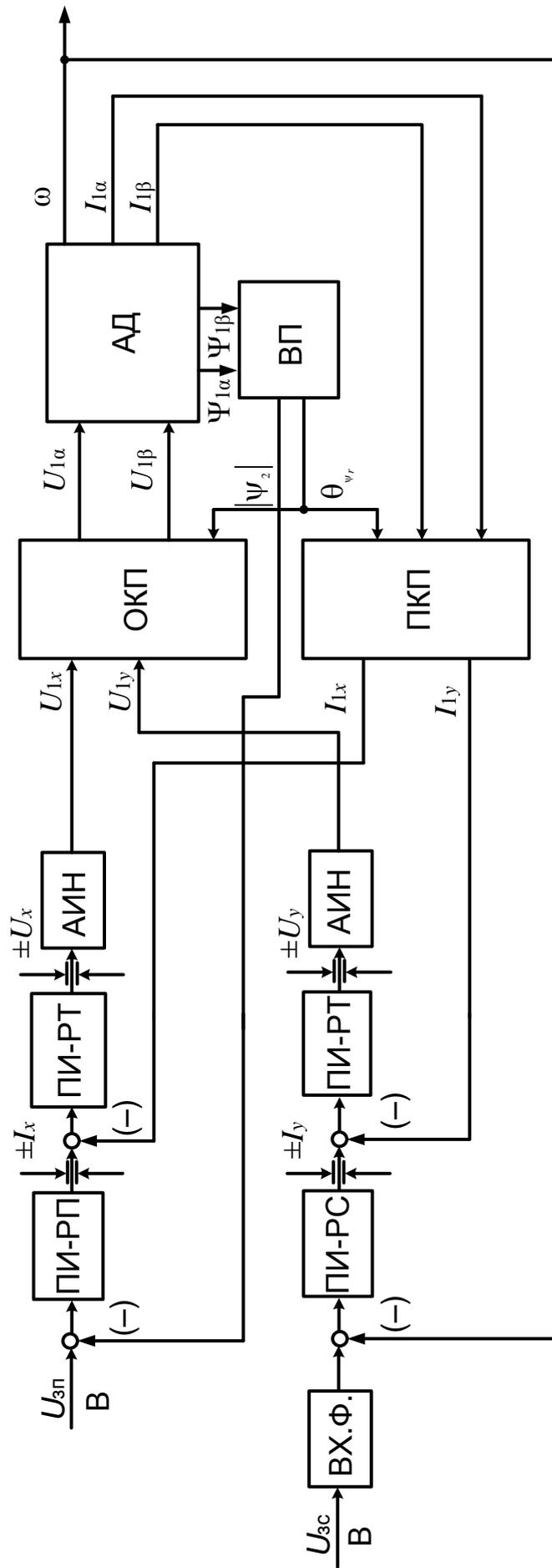


Рисунок 40 – Функциональная схема нелинейной САУ РЭП

Имитационная модель САУ РЭП с использованием модели двигателя в неподвижной системе координат представлена на рисунке 41.

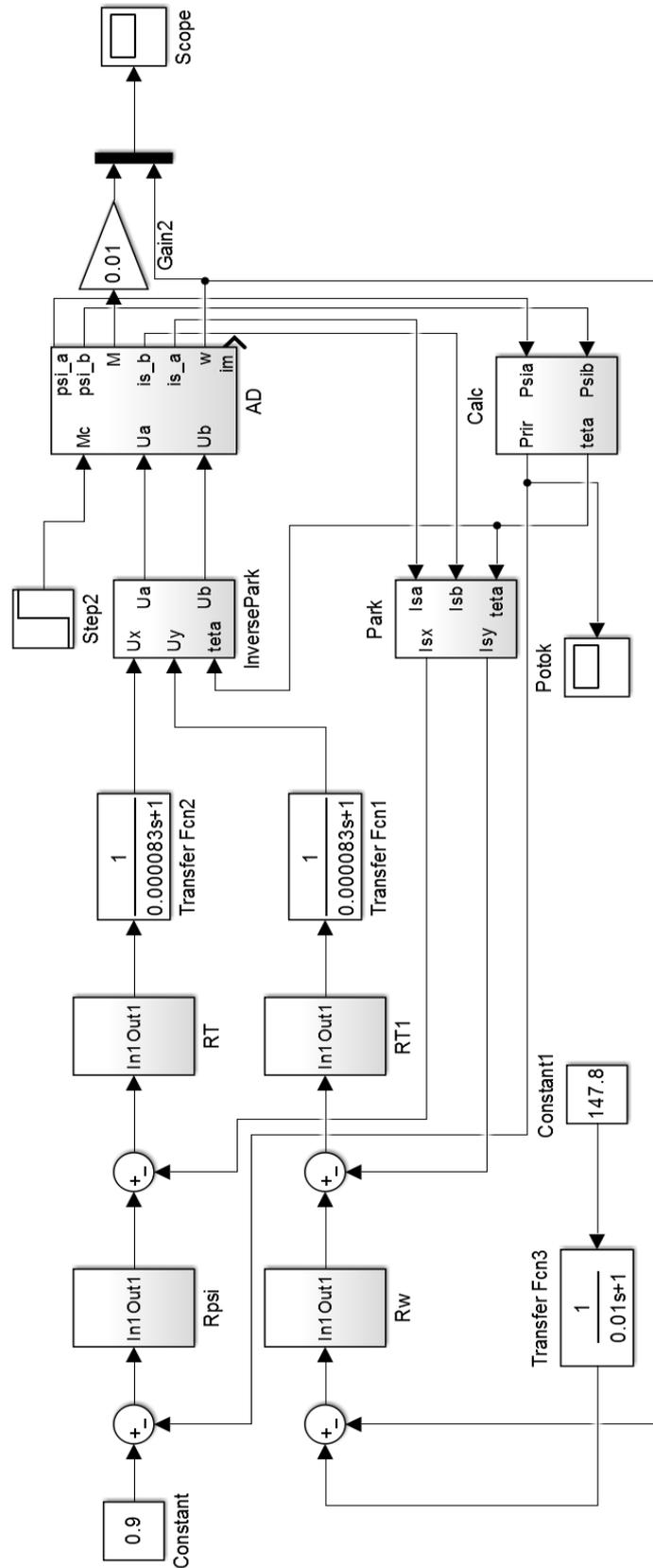


Рисунок 41 – Имитационная модель нелинейной САУ РЭП в программной среде MATLAB Simulink

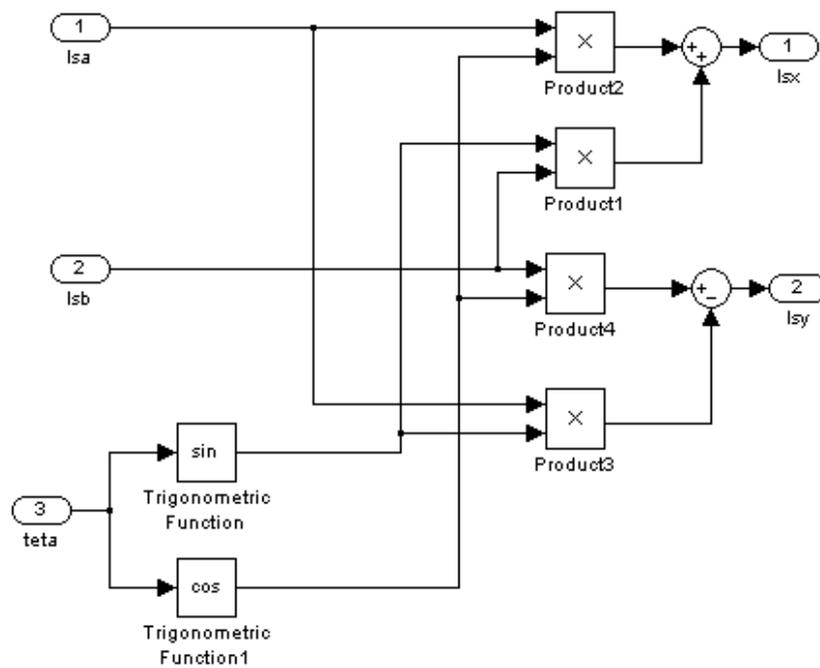


Рисунок 42 – Подсистема «Park»

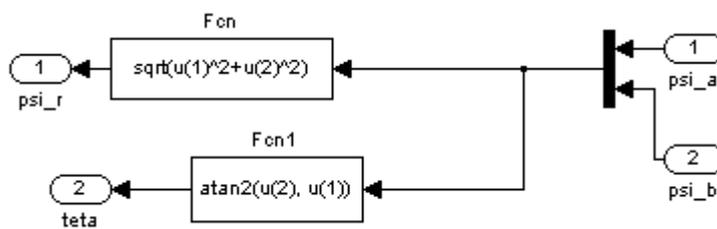


Рисунок 43 – Подсистема «Calc»

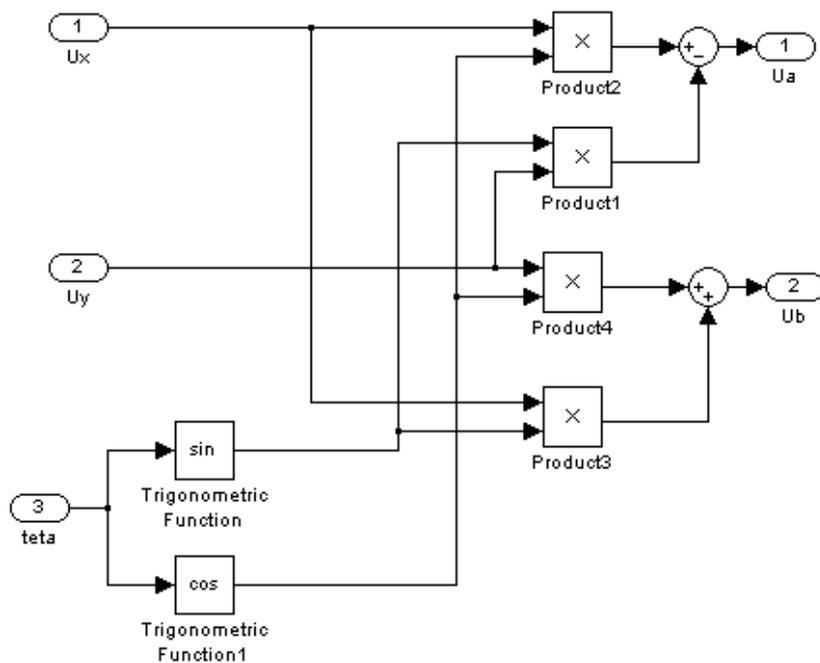


Рисунок 44 – Подсистема «Inverse Park»

Проверяем работоспособность линеаризованной системы управления с моделью двигателя в неподвижной системе координат – осуществляем пуск и наброс нагрузки, снимаем переходные процессы момента и скорости.

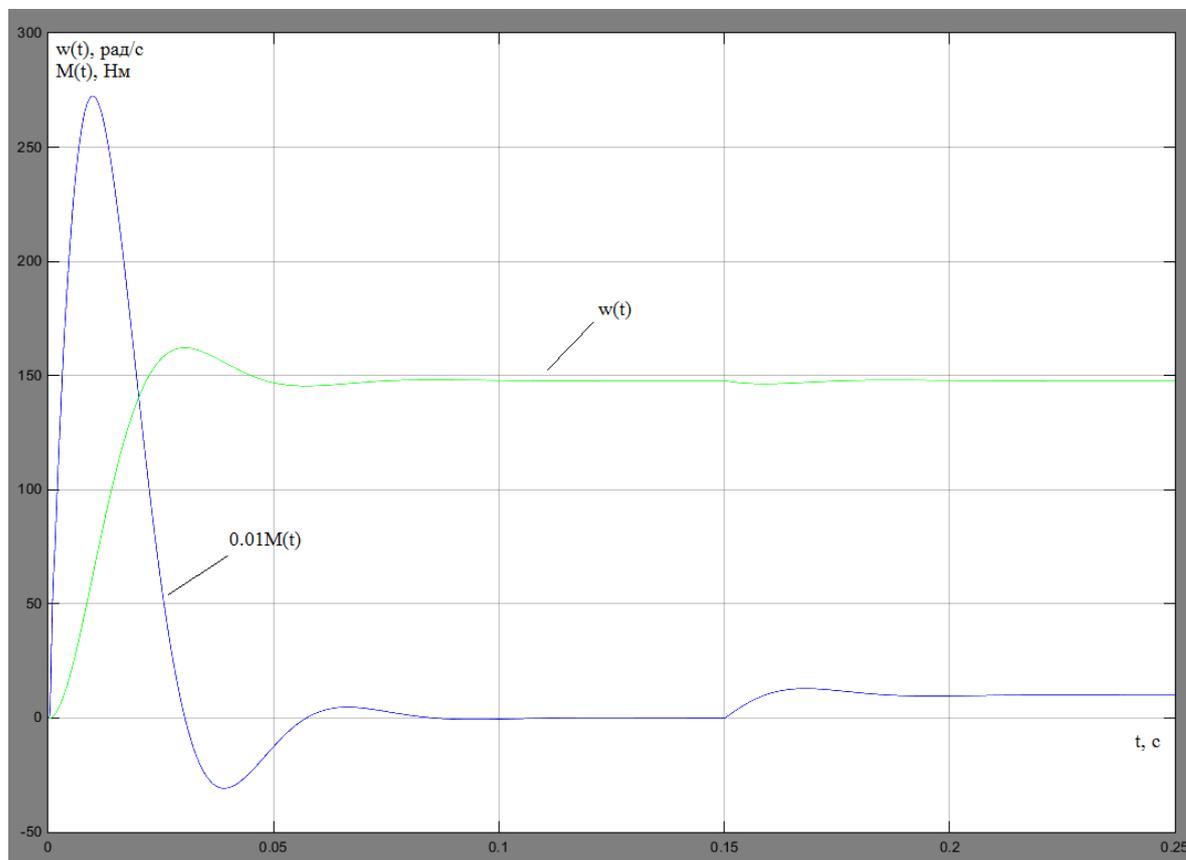


Рисунок 45 – Переходные процессы момента и скорости

Исходя из полученных графиков можно сделать вывод, что модель ведет себя адекватно и ее можно использовать в дальнейшем моделировании нелинейной системы управления.

4.4 Моделирование нелинейной системы векторного управления

Нелинейностями в представленном электроприводе является вентиляторная нагрузка и ограничения на выходе регуляторов. Введение ограничений обусловлено необходимостью ограничения максимальной амплитуды напряжения обмоток АД, ограничения токов в статорных обмотках АД, а также ограничения момента на валу двигателя. Оптимальные ограничения регуляторов имеют следующие значения:

$$U_X = 0,312 \cdot U_{\max} = 0,312 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1\text{фн}} = 97,07;$$

$$U_Y = 0,95 \cdot U_{\max} = 0,95 \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1\text{фн}} = 295,57;$$

$$I_X = 1,5 \cdot I_{\text{amp}} = 1,5 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\text{фн}} = 626,15;$$

$$I_Y = 2 \cdot I_{\text{amp}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot I_{1\text{фн}} = 834,86.$$

В модели электропривода с системой векторного управления блоки регуляторов заменяем на подсистемы регуляторов с ограничениями выходных сигналов.

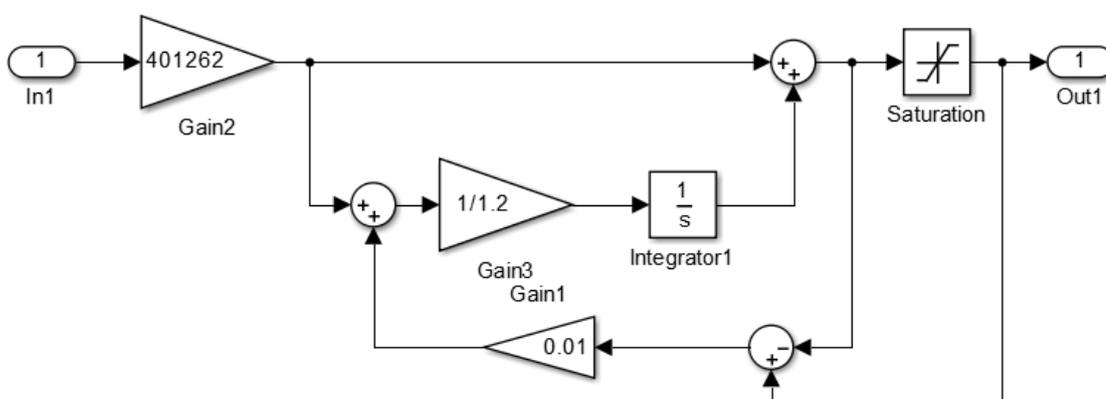


Рисунок 46 – Подсистема «Rpsi» нелинейного регулятора потокоцепления ротора

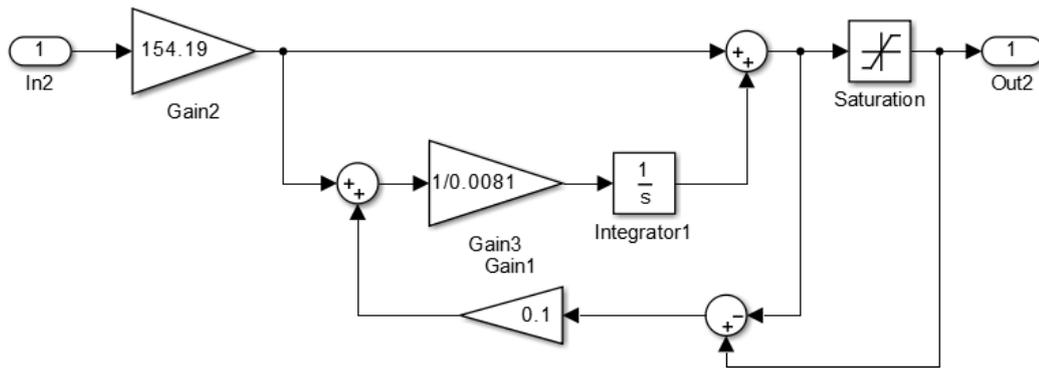


Рисунок 47 – Подсистема «Rw» нелинейного регулятора потокоцепления скорости

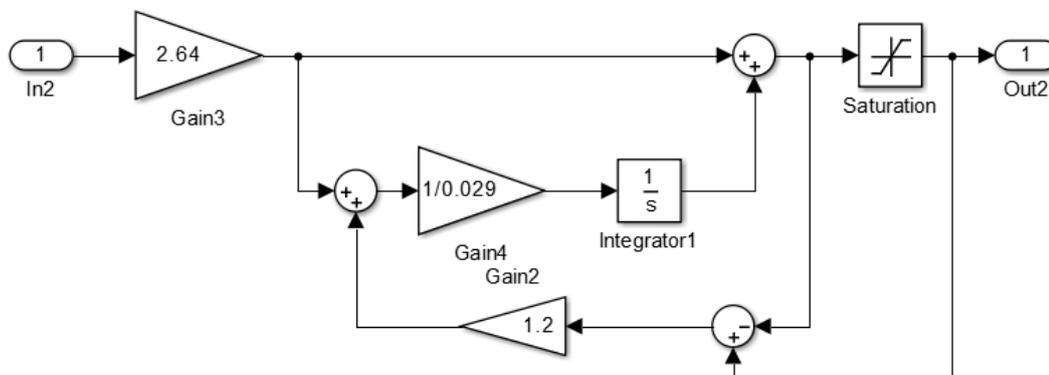


Рисунок 48 – Подсистема «RT» нелинейного регулятора тока статора

В системе с ограничениями выходных сигналов регуляторов векторной системы управления осуществляем пуск и наброс нагрузки, снимаем переходные процессы момента и скорости двигателя.

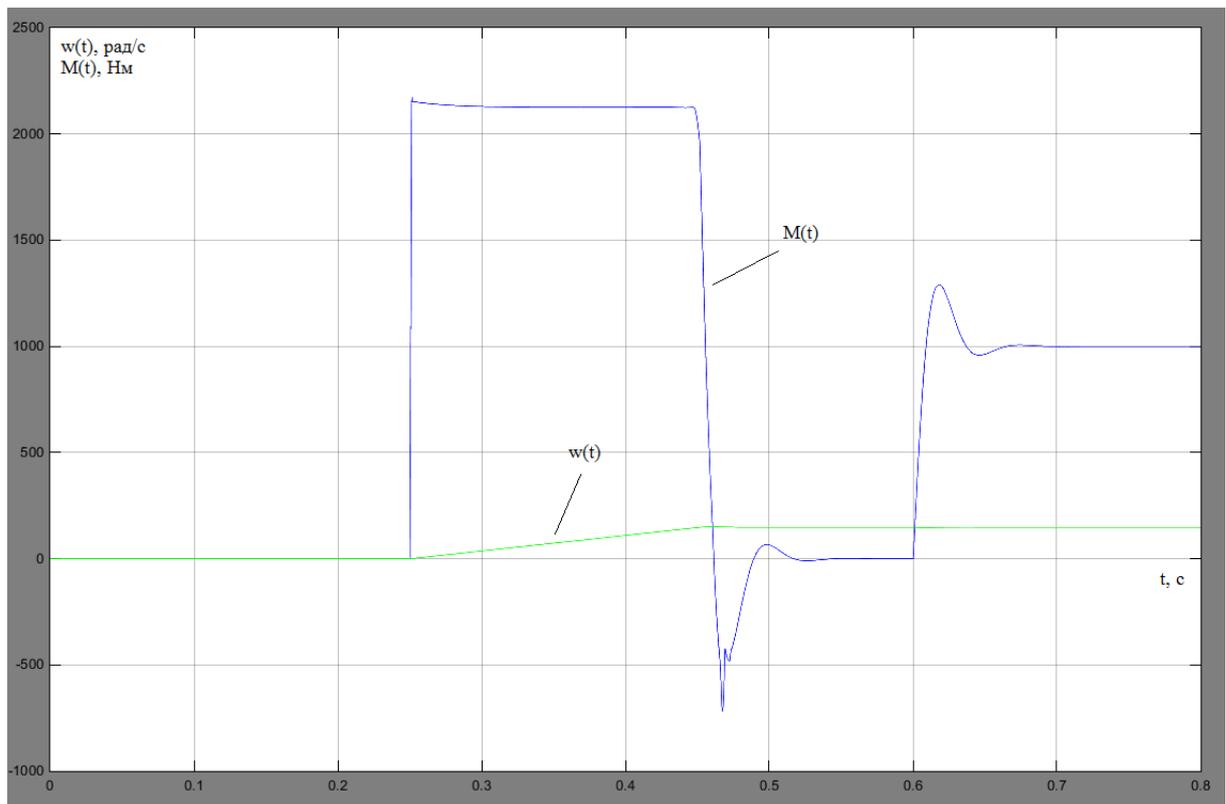


Рисунок 49 – Переходные процессы момента и скорости при мгновенном задании значения скорости

На полученных графиках видно, что модель работает приемлемо, но пусковой момент при мгновенном задании значения скорости достигает почти 2100 Нм. Сравнивая этот момент с пусковым моментом АД при прямом пуске $M_{\text{дв.пуск}} = 2467,7 \text{ Н}\cdot\text{м}$, можно сделать вывод, что все преимущество регуляторов нивелируется. Поэтому вместо мгновенного задания значения скорости будет целесообразно поставить задатчик интенсивности.

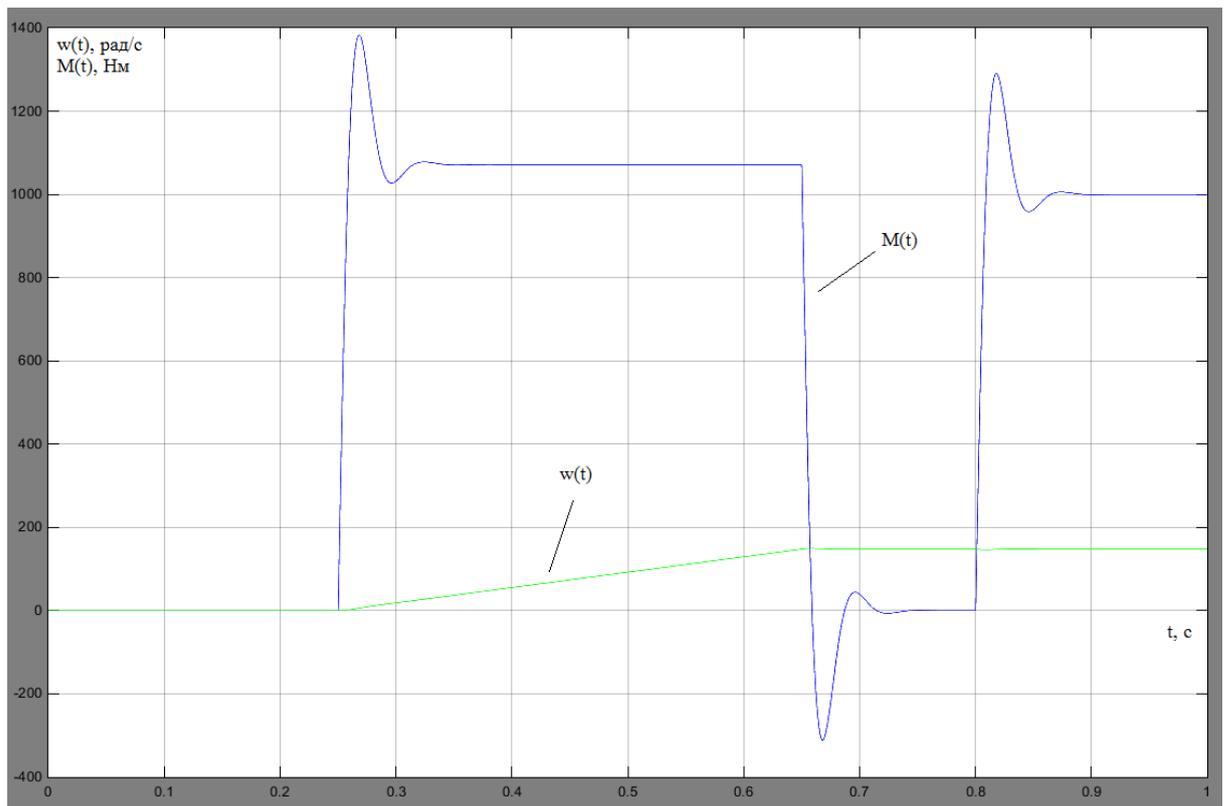


Рисунок 50 – Переходные процессы момента и скорости при использовании датчика интенсивности

При использовании датчика интенсивности немного уменьшается быстродействие, зато удалось значительно снизить пусковой момент. Теперь нужно проверить на графиках токов и напряжений, правильно ли обрабатывают регуляторы заданные в них ограничения.

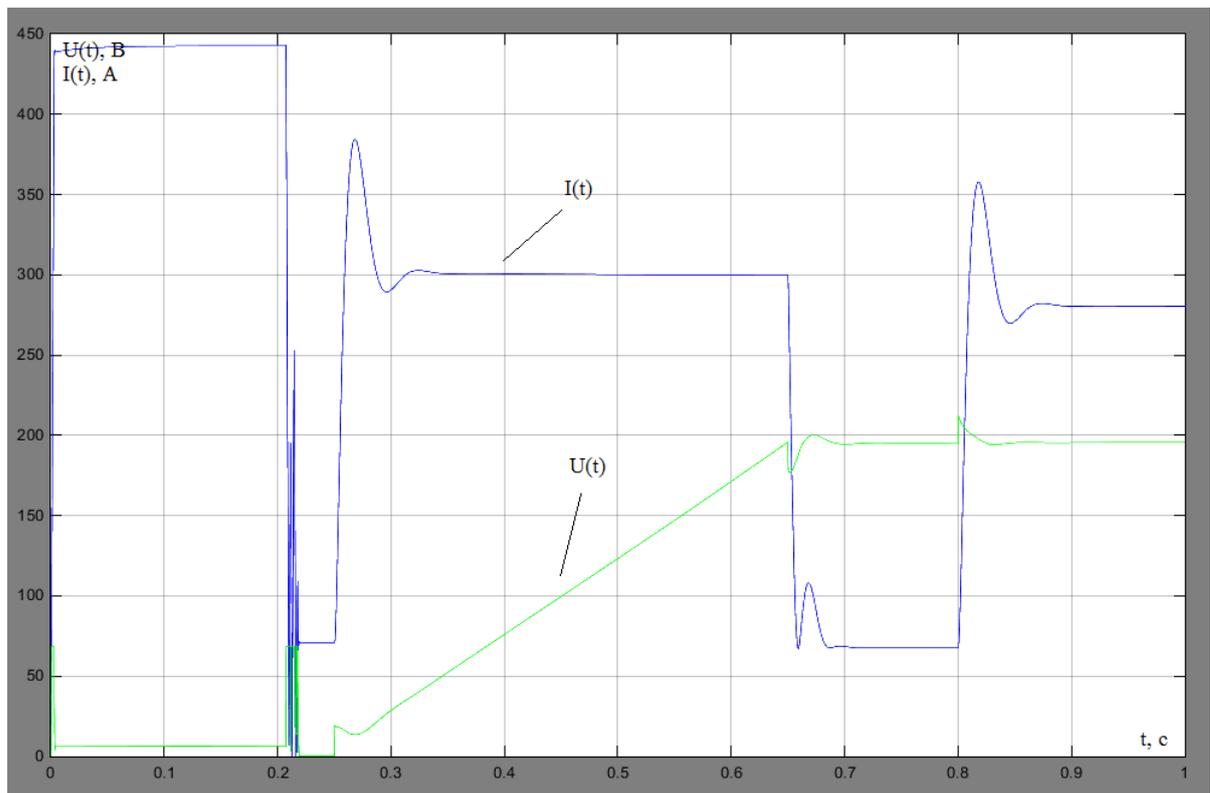


Рисунок 51 – Переходные процессы тока и напряжения при использовании датчика интенсивности

Анализируя графики делаем вывод, что ни ток, ни напряжение не превышает заданных ограничений, следовательно система работает адекватно.

4.4.1 Моделирование нелинейной системы с вентиляторной нагрузкой

Заключительным этапом следует замена ступенчатого наброса момента на нелинейную характеристику, построенную ранее (рисунок 7).

Расчет нагрузки будет производиться по формуле:

$$M_B(\omega) = 0,1 \cdot M_{дв.ном} + 0,00308 \cdot (\omega)^{2,5}$$

Сведем значения нагрузочной характеристики в таблицу 9.

Таблица 9 – Значения нагрузочной характеристики

| | | | | | | | | | | |
|-------------------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|------|
| $M_B, Нм$ | 0 | 102,8 | 108,3 | 133,9 | 188,6 | 279,1 | 410,8 | 588,6 | 817 | 1100 |
| $\omega, рад / с$ | 0 | 0,001 | 20 | 40 | 60 | 80 | 100 | 120 | 140 | 160 |

Имитационная модель САУ РЭП при использовании нелинейной нагрузочной характеристики в программной среде MATLAB Simulink представлена на рисунке 52.

В системе с нелинейной нагрузочной характеристикой осуществляем пуск, снимаем переходные процессы момента и скорости двигателя.

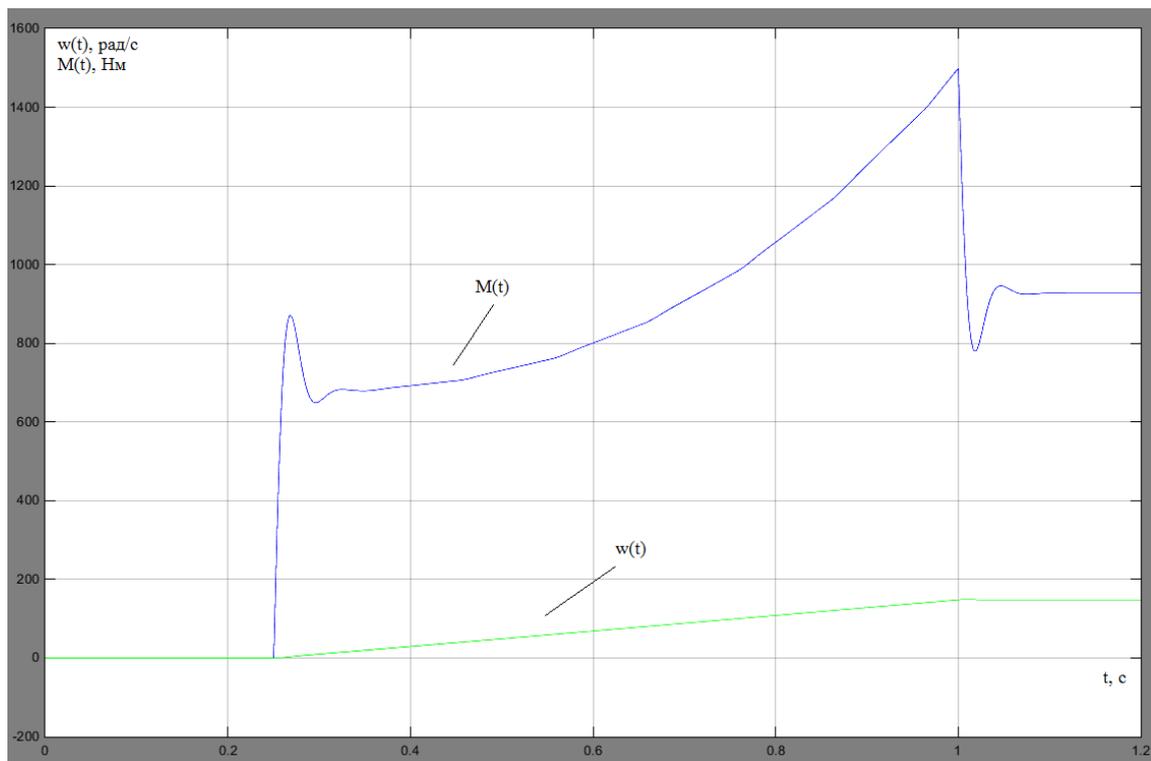


Рисунок 53 – Переходные процессы момента и скорости при использовании нелинейной нагрузки

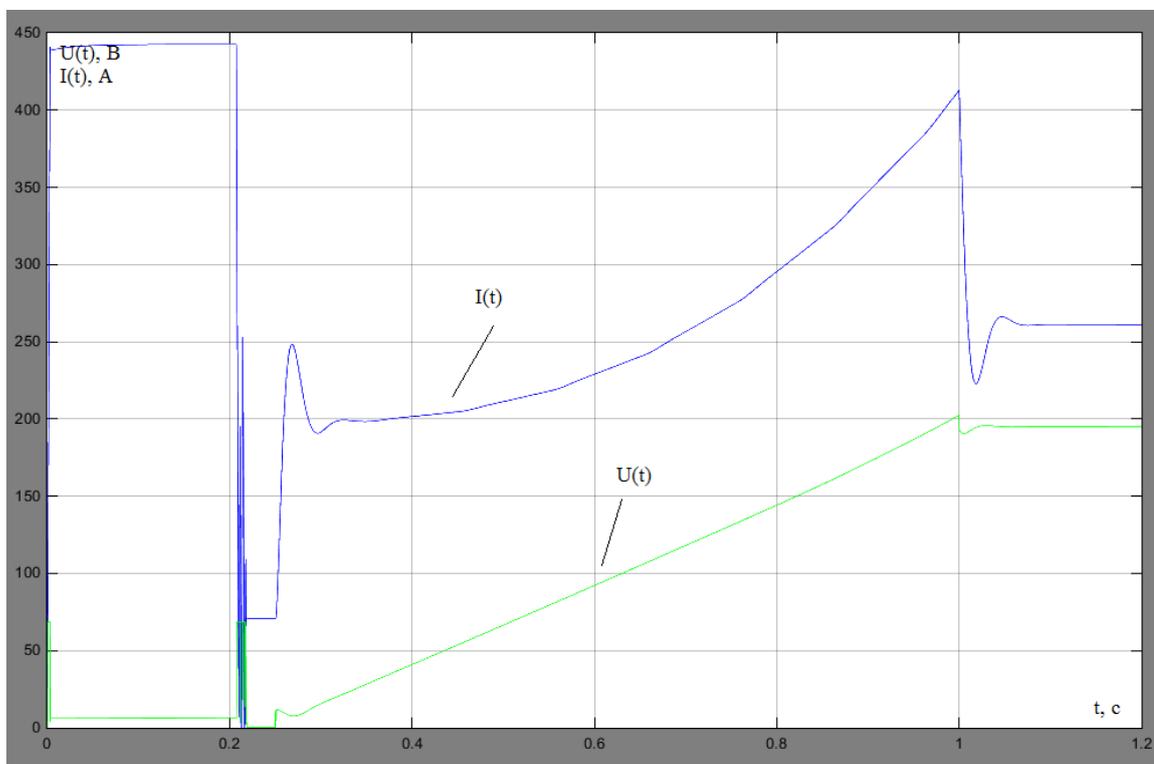


Рисунок 54 – Переходные процессы тока и напряжения при использовании нелинейной нагрузки

Анализируя полученные данные, видим, что система точно обрабатывает задание по скорости, а также имеет приемлемый момент и быстродействие при разгоне двигателя. Напряжения и токи при работе системы управления не превышают заданных нами пределов. Делаем вывод, что система работает исправно и выполняет поставленные нами задачи.

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

| | |
|---------------|----------------------------------|
| Группа | ФИО |
| 5Г3А | Чернышову Артему Константиновичу |

| | | | |
|----------------------------|----------|----------------------------------|--------------------------------------|
| Институт | ЭНИН | Кафедра | Электропривода и электрооборудования |
| Уровень образования | Бакалавр | Направление/специальность | Электропривод и автоматика |

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

| | |
|---|--|
| <i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i> | -Проект выполняется на базе лабораторий НИ ТПУ -Приблизительная сумма затрат на выполнение проекта составляет 200 тысяч рублей -В реализации проекта задействованы 2 человека руководитель проекта, студент-дипломник |
| <i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i> | -В соответствии с ГОСТ 14.322-83 «Нормирование расхода материалов» и ГОСТ Р 51541-99 «Энергосбережение. Энергетическая эффективность». -Минимальный размер оплаты труда (на 2017 год) составляет 7500 руб |
| <i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i> | -Отчисления по страховым взносам - 30% от ФОТ. |

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

| | |
|--|--|
| <i>1. Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения исследовательской работы</i> | -Технико-экономическое обоснование научно-исследовательской работы - SWOT-анализ |
| <i>2. Планирование процесса управления НИР: структура и график проведения, бюджет, риски и организация закупок</i> | -Планирование работ по научно-техническому исследованию; -Смета затрат на разработку исследования |
| <i>3. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i> | - Оценка научно-технического уровня следования, - Оценка рисков |

Перечень графического материала (с точным указанием обязательных чертежей):

- «Портрет» потребителя результатов НИР
 - Матрица SWOT
- Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИР

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

| | | | | |
|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
| Ассистент кафедры менеджмента | Грахова Елена Александровна | | | |

Задание принял к исполнению студент:

| | | | |
|---------------|-------------------------------|----------------|-------------|
| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
| 5Г3А | Чернышов Артем Константинович | | |

5. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

Разработка НИР производится группой квалифицированных работников, состоящей из двух человек – руководителя и студента.

Темой научной исследовательской работы является модернизация электропривода компрессора.

Целью раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» является определение перспективности и успешности НТИ, 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. Оценить коммерческий потенциал и перспективность разработки НТИ;
2. Осуществить планирование этапов выполнения исследования;
3. Рассчитать бюджет затрат на исследования;
4. Произвести оценку научно-технического уровня исследования и оценку рисков.

5.1. Технико-экономическое обоснование НИР

Одним из основных решений для энергосбережения, используемых в асинхронном двигателе – это внедрение частотного регулирования. Наряду со снижением потребления электрической энергии преобразователь частоты позволяет получить более качественные переходные процессы и снизить динамические нагрузки, что приведет к увеличению эксплуатационного срока компрессора.

Большинство компрессорных установок в мире использует нерегулируемый электропривод. Это обусловлено тем, что очень малое количество устройств и агрегатов требуют поддержания постоянного давления для их корректной работы. Но существуют такие устройства, где установка регулируемого электропривода может привести не только к снижению потребляемой энергии, но и к улучшению качества выпускаемой продукции.

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Произведем SWOT-анализ проекта, позволяющий оценить факторы и явления способствующие или препятствующие продвижению проекта на рынок. В таблице 10 описаны сильные и слабые стороны проекта, выявлены возможности и угрозы реализации НИТ, которые могут появиться в его внешней среде.

Таблица 10 – SWOT-анализ НИР

| Сильные стороны | Возможности во внешней среде |
|---|--|
| С1. Универсальность применения разрабатываемых математических моделей; С2. Повышенные показатели энергоэффективности и долговечности; С3. Широкая сфера применения установки; С4. Актуальность исследования; С5. Наличие опытного руководителя. | В1. Рост в потребности сокращения экономических издержек; В2. Большой потенциал применения метода математического моделирования динамических процессов; |
| Слабые стороны | Угрозы внешней среды |
| Сл1. Требование уникального оборудования; Сл2. Возможность появления новых методов моделирования; Сл3. Отсутствие у потенциальных потребителей квалифицированных кадров по работе с установкой. | У1. Развитая конкуренция в сфере математического моделирования технологических процессов; У2. Недостаточное финансовое обеспечение. |

Далее выявим соответствия сильных и слабых сторон научно-исследовательского проекта внешним условиям окружающей среды. Это соответствие или несоответствие должны помочь выявить степень необходимости проведения стратегических изменений.

Таблица 11 – сильные стороны проекта

| | | | | | | |
|---------------------|----|----|----|----|----|----|
| Возможности проекта | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
| | B1 | - | + | - | + | - |
| | B2 | + | - | + | + | - |

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные сторон и возможности: B1C2C4, B2C1C3C4.

Таблица 12 – слабые стороны проекта

| | | | | |
|---------------------|----|-----|-----|-----|
| Возможности проекта | | Сл1 | Сл2 | Сл3 |
| | B1 | - | - | - |
| | B2 | - | + | - |

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующую коррелирующую слабой стороны и возможности: B2Сл2.

Таблица 13 – сильные стороны проекта

| | | | | | | |
|--------|----|----|----|----|----|----|
| Угрозы | | C1 | C2 | C3 | C4 | C5 |
| | У1 | 0 | - | + | 0 | - |
| | У2 | + | 0 | + | 0 | - |

При анализе данной интерактивной таблицы можно выявить следующие коррелирующие сильные сторон и угроз: У1С3, У2С1С3.

Таблица 14 – слабые стороны проекта

| | | | | |
|---------------------|----|-----|-----|-----|
| Возможности проекта | | Сл1 | Сл2 | Сл3 |
| | У1 | + | + | 0 |
| | У2 | + | - | - |

Анализируя данные таблицы, можно сделать вывод, что самой большой угрозой для проекта является отсутствие достаточного и своевременного финансового обеспечения. Также среди угроз можно отметить высокий темп роста конкуренции в данной сфере, а также активную разработку методов моделирования. Изучая слабые стороны, можно увидеть, что для их предотвращения достаточно иметь современное оборудование для ремонта и диагностики неполадок, а также квалифицированный персонал, который сможет заниматься обслуживанием и ремонтом оборудования на предприятии в долгосрочной перспективе.

Таким образом, результаты НТИ актуальны для предприятий, заинтересованных в повышении срока службы установок в тяжелых эксплуатационных условиях, повышении качества производимой продукции, уменьшение количества брака и пр.

5.2 Планирование работ по научно-техническому исследованию

Для правильного планирования, а также финансирования и определения трудоемкости выполнения НИР необходимо ее разбить на этапы. Под этапом понимается крупная часть работы, которая имеет самостоятельное значение и является объемом планирования и финансирования. НИР имеет:

1. Подготовительный этап. Сбор, изучение и анализ, имеющийся информации. Определение состава исполнителей и соисполнителей, согласование с ними частных задач. Разработка и утверждение задания.
2. Разработка теоретической части.
3. Проведение численного эксперимента
4. Выводы и предложения по теме, обобщение результатов разработки.
5. Завершающий этап. Рассмотрение результатов исследования. Утверждение результатов работы. Подготовка отчетной документации.

Данную НИР можно разделить на следующие этапы:

1. Разработка задания на НИР;
2. Выбор направления исследования;
3. Теоретические и экспериментальные исследования;
4. Обобщение и оценка результатов;
5. Оформление отчета НИР.

Трудоемкость выполнения НИР оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов.

Таблица 15 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

| Основные этапы | № работы | Содержание работы | Должность исполнителя |
|--|----------|---|--|
| Разработка задания на НИР | 1 | Разработка технического задания | Ланграф С.В. – руководитель; Чернышов А.К. – студент-дипломник. |
| Проведение НИР | | | |
| Выбор направления исследования | 2 | Разработка плана работ | Чернышов А.К., Ланграф С.В. |
| | 3 | Описание объекта автоматизации (модернизации) | Чернышов А.К. |
| | 4 | Технико-экономическое обоснование проекта | Чернышов А.К. |
| Теоретические и экспериментальные исследования | 5 | Расчет различных параметров математической модели | Чернышов А.К. |
| | 6 | Компьютерное моделирование | Чернышов А.К., Ланграф С.В. |
| | 7 | Обработка полученных данных | Чернышов А.К. |
| Обобщение и оценка результатов | 8 | Анализ полученных результатов, выводы | Чернышов А.К., Ланграф С.В. |
| | 9 | Оценка эффективности полученных результатов | Чернышов А.К., Ланграф С.В. |
| Оформление отчета НИР | 10 | Составление пояснительной записки | Чернышов А.К. |

5.2.1 Определение трудоемкости этапов НИР

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

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

где $t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

$t_{\min\ i}$ – минимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.;

$t_{\max\ i}$ – максимально возможная трудоемкость выполнения заданной i -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), чел.-дн.

Рассчитаем значение ожидаемой трудоёмкости работы:

Для установления продолжительности работы в рабочих днях используем формулу:

$$T_{pi} = \frac{t_{ож\ i}}{Ч_i},$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$t_{ож\ i}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, чел.-дн.;

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

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

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k,$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения одной работы, календ. дн.;

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

k – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Коэффициент календарности рассчитывается по формуле:

$$k = \frac{T_{\text{КГ}}}{T_{\text{КГ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}},$$

где: $T_{\text{КГ}}$ – количество календарных дней в году;

$T_{\text{ВД}}$ – количество выходных дней в году;

$T_{\text{ПД}}$ – количество праздничных дней в году.

Определим длительность этапов в рабочих днях и коэффициент календарности:

$$k = \frac{T_{\text{КГ}}}{T_{\text{КГ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}} = \frac{365}{365 - 104 - 10} = 1,45,$$

тогда длительность этапов в рабочих днях, следует учесть, что расчетную величину продолжительности работ $T_{\text{к}}$ нужно округлить до целых чисел^[5].

Результаты расчетов приведены в таблице 16.

5.2.2 Техническая готовность темы

Определение технической готовности темы позволяет дипломнику точно знать, на каком уровне выполнения находится определенный этап или работа. Показатель технической готовности темы характеризует отношение продолжительности работ, выполненных на момент исчисления этого показателя, к общей запланированной продолжительности работ, при этом следует учесть, что период дипломного проектирования составляет примерно 6 месяцев, дипломник выступает в качестве основного исполнителя.

Для начала следует определить удельное значение каждой работы в общей продолжительности работ:

$$Y_i = \frac{T_{\text{pi}}}{T_{\text{p}}} \cdot 100\%,$$

где Y_i – удельное значение каждой работы в %;

T_{pi} – продолжительность одной работы, раб.дн.;

T_{p} – суммарная продолжительность темы, раб.дн.

Тогда техническую готовность темы Γ_i , можно рассчитать по формуле:

$$\Gamma_i = \frac{\sum_{i=1}^{n} T_{pi}}{T_p} \cdot 100\%,$$

где: $\sum T_{pi}$ – нарастающая продолжительность на момент выполнения i -той работы^[5].

Результаты расчетов приведены в таблице 16.

Таблица 16 – Временные показатели проведения НИР

| № раб. | Исполнители | Продолжительность работ | | | | | | |
|--------|--------------------------------|-------------------------|----------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|-----------|----------------|
| | | t_{\min} чел.дн | t_{\max} чел.дн | $t_{\text{ож}}$ чел.дн | T_p раб.дн | T_k кал.дн | $U_i, \%$ | $\Gamma_i, \%$ |
| 1 | Чернышов А.К., Ланграф С.В. | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,9 | 0,9 |
| 2 | Чернышов А.К., Ланграф С.В. | 1 | 3 | 2 | 1 | 1 | 0,9 | 1,9 |
| 3 | Чернышов А.К. | 3 | 13 | 7 | 7 | 10 | 9,8 | 11,7 |
| 4 | Чернышов А.К. | 4 | 8 | 6 | 6 | 9 | 8,8 | 20,5 |
| 5 | Чернышов А.К. | 10 | 21 | 14 | 14 | 20 | 19,6 | 40,1 |
| 6 | Чернышов А.К., Ланграф С.В. | 30 | 60 | 42 | 21 | 30 | 29,4 | 69,6 |
| 7 | Чернышов А.К., | 3 | 8 | 5 | 5 | 7 | 6,8 | 76,4 |
| 8 | Чернышов А.К., Ланграф С.В. | 10 | 21 | 14 | 7 | 10 | 9,8 | 86,2 |
| 9 | Чернышов А.К., Ланграф С.В. | 7 | 12 | 9 | 5 | 7 | 6,8 | 93,1 |
| 10 | Чернышов А.К. | 3 | 7 | 5 | 5 | 7 | 6,8 | 100 |
| ИТОГО | | | | | | 102 | | |

5.2.3 Построение графика работ

Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ^[6].

Таблица 17 – Календарный график проведения НИР

| Этапы | Вид работы | Исполнители | T_k | Февраль | Март | Апрель | Май | Июнь |
|-------|---|--------------------------------|-------|---------|------|--------|-----|------|
| 1 | Разработка технического задания | Чернышов А.К., Ланграф С.В. | 1 | | | | | |
| 2 | Разработка плана работ | Чернышов А.К., Ланграф С.В. | 1 | | | | | |
| 3 | Описание объекта автоматизации (модернизации) | Чернышов А.К. | 10 | | | | | |
| 4 | Технико-экономическое обоснование проекта | Чернышов А.К. | 9 | | | | | |
| 5 | Расчет различных параметров математической модели | Чернышов А.К. | 20 | | | | | |
| 6 | Компьютерное моделирование | Чернышов А.К., Ланграф С.В. | 30 | | | | | |
| 7 | Обработка полученных данных | Чернышов А.К. | 7 | | | | | |
| 8 | Анализ полученных результатов, выводы | Чернышов А.К., Ланграф С.В. | 10 | | | | | |
| 9 | Оценка эффективности полученных результатов | Чернышов А.К., Ланграф С.В. | 7 | | | | | |
| 10 | Составление пояснительной записки | Чернышов А.К. | 7 | | | | | |

- руководитель, - студент-дипломник.

В результате видно, что для выполнения работы требуется всего 2 человека и работа выполняется в течение 102 дней.

5.3 Смета затрат на разработку проекта

Затраты представляют собой все производственные формы потребления денег и измеримых в денежном измерении материальных ценностей, которые служат непосредственной производственной целью.

Рассчитываем смету расходов, включая затраты на приобретение необходимого оборудования для разработки проекта и текущие расходы. Затраты, образующие себестоимость продукции (работ, услуг), группируются в соответствии с их экономическим содержанием по следующим элементам:

$$K_{\text{проекта}} = I_{\text{мат}} + I_{\text{ам.техн}} + I_{\text{зп}} + I_{\text{соц.отч.}} + I_{\text{накл.расх}} + I_{\text{прочие}}$$

Материальные затраты отражают стоимость приобретенных материалов и сырья, которые входят в состав вырабатываемой продукции, образуя ее основу, или являются необходимыми компонентами при изготовлении продукции^[6].

В данной работе моделирование проводится на компьютере поэтому материальных затрат нет.

Для проведения научно-исследовательской работы требуется компьютер.

Срок полезного использования: компьютер – по второй группе (техника электронно- вычислительная): 3 года^[7].

Рассчитываем материальные затраты используется один компьютер стоимостью 50000 рублей

Амортизация основных фондов – сумма амортизационных отчислений на полное восстановление основных производственных фондов, вычисленная исходя из их балансовой стоимости и утвержденных норм амортизации. Корректно при расчете затрат учитывать в году приобретения и в

последующие годы только ту часть затрат, которая происходит от старения основных фондов в каждом году.

Рассчитаем амортизацию оборудования техники $I_{\text{ам.обор}}$, по следующей формуле:

$$I_{\text{ам.обор}} = \left(\frac{T_{\text{исп.обор}}}{365} \right) \times K_{\text{обор}} \times H_a,$$

где $T_{\text{исп.обор}}$ – время использования оборудование;

365 дней – количество дней в году;

$K_{\text{обор}}$ – стоимость оборудования;

H_a – норма амортизации.

$$H_a = \frac{1}{T_{\text{с.с.обор}}},$$

где $T_{\text{с.с.обор}}$ – срок службы оборудования

$$I_{\text{ам.комп}} = \left(\frac{T_{\text{исп.комп}}}{365} \right) \cdot K_{\text{комп}} \cdot H_a = \left(\frac{102}{365} \right) \cdot 50000 \cdot \frac{1}{3} = 4657,5$$

Так как для исследования нужен только компьютер, то $I_{\text{ам.комп}} = I_{\text{ам.обор}}$

Расчет заработной платы – заработная плата рассчитывается в соответствии с занятостью исполнителей, с учетом районного и тарифного коэффициентов исполнителей.

В состав затрат на оплату труда включаются:

- выплаты заработной платы за фактически выполненную работу;
- выплаты стимулирующего характера по системным положениям;
- выплаты по районным коэффициентам;
- компенсации за неиспользованный отпуск;

Примем, что полный фонд заработной платы ($\Phi_{\text{зп}}$):

$$\Phi_{\text{зп}} = 30000 \text{руб.},$$

Отчисления на социальные нужды выражаются в виде единого социального налога, который включает в себя: обязательные отчисления по установленным законодательством нормам органам государственного

социального страхования, пенсионного фонда, государственного фонда занятости и медицинского страхования.

Единый социальный налог – 27,1%.

Рассчитываем отчисления на социальные нужды ($I_{\text{соц.отч.}}$):

$$I_{\text{соц.отч.}} = ECH = 0,26 \cdot \Phi_{\text{зп}} = 0,271 \cdot 30000 = 8130 \text{ руб.}$$

Накладные расходы используют на следующее:

- 1) затраты на текущий ремонт;
- 2) амортизацию основных производственных фондов;
- 3) затраты на охрану труда и пожарную безопасность.

Для проектных отделов накладные затраты составляют 200% от полного фонда заработной платы Тогда: $I_{\text{накл.расх.}} = 2 \cdot \Phi_{\text{зп}} = 2 \cdot 30000 = 60000 \text{ руб.}$

Прочие затраты – затраты, к которым относятся налоги, сборы, отчисления в специальные внебюджетные фонды, платежи по обязательному страхованию имущества, вознаграждения за изобретение и рационализаторские предложения, за подготовку кадров, оплата услуг связи и т.д. Эти затраты составляют 2% от всех издержек и вычисляются по формуле:

$$I_{\text{прочее}} = 0.02 \cdot (I_{\text{ам.обор}} + \Phi_{\text{зп}} + ECH) = 0.02 \cdot (4657,5 + 30000 + 8130) = 855,7$$

Рассчитываем себестоимость проекта ($K_{\text{проекта}}$).

$$K_{\text{проекта}} = I_{\text{ам.обор}} + \Phi_{\text{зп}} + I_{\text{прочее}} + I_{\text{накл.расх}} + I_{\text{соц.отч.}} = 4657,5 + 30000 + 855,7 + 60000 + 8130 = 103643,2$$

Рассчитываем плановые накопления (ПР). Стоимость проекта включает в себя 30% прибыли, таким образом:

$$ПР = 0.3 \cdot K_{\text{проекта}} = 0.3 \cdot 103643,2 = 31092,9$$

Рассчитываем стоимость проекта (Π).

$$\Pi = K_{\text{проекта}} + ПР = 103643,2 + 31092,9 = 134736,1$$

Таблица 18 – Смета затрат на научно-исследовательскую работу

| Виды затрат | Обозначение | Сумма затрат, руб. |
|--------------------------------|------------------------|--------------------|
| Амортизация оборудования | И _{ам.обор} | 4657,5 |
| Затраты на оплату труда | ЗП | 30000 |
| Отчисления на социальные нужды | И _{соц.отч} | 8130 |
| Накладные расходы | И _{накл.расх} | 60000 |
| Прочие затраты | И _{прочие} | 855,7 |
| Себестоимость проекта | К _{проекта} | 103643,2 |
| Плановые накопления (прибыль) | ПР | 31092,9 |
| Стоимость проекта (цена) | Ц | 134736,1 |

Исходя из расчетов и полученных результатов приведенных в таблице 4, можно сделать вывод, что данная научно исследовательская работа входит в обозначенные бюджетные ограничения, так как стоимость проекта равная 134736,1 рублей, меньше приблизительной суммы затрат равной 200 тысяч рублей.

5.4 Оценка целесообразности исследования

5.4.1 Оценка научно-технического уровня следования

Для определения научно - технического уровня проекта, его научной ценности, 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:

$$\text{НТУ} = \sum_{i=1}^n k_i * \Pi_i$$

где k_i – весовой коэффициент i – го признака;

Π_i – количественная оценка i – го признака.

Таблица 19 – Весовые коэффициенты НТУ

| Признаки НТУ | Весовой коэффициент |
|------------------------|---------------------|
| Уровень новизны | 0,3 |
| Теоретический уровень | 0,5 |
| Возможность реализации | 0,9 |

Таблица 20 – Шкала оценки новизны

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

Таблица 21 – Значимость теоретических уровней

| Характеристика значимости теоретических уровней | Баллы |
|--|-------|
| Разработка нового метода | 4 |
| Глубокая разработка проблем, многосторонний анализ | 8 |
| Разработка численных экспериментов | 10 |
| Элементарный анализ результатов исследования | 6 |

Таблица 22 – Возможность реализации по времени и масштабам

| Время реализации | Баллы |
|----------------------|-------|
| В течение первых лет | 12 |
| От 5 до 10 лет | 5 |
| Свыше 10 лет | 3 |

Расчет НТУ:

$$\text{НТУ} = \sum_{i=1}^n k_i * \Pi_i$$

где $k_1 = 0,3$; $k_2 = 0,5$; $k_3 = 0,9$;

$\Pi_1 = 4$; $\Pi_2 = 8$; $\Pi_3 = 7$;

$$\text{НТУ} = 0,3*4+0,5*8+0,9*7 = 11,5.$$

По полученным значениям коэффициент научно-технического уровня (НТУ) можно сказать о достаточно высоком научно - техническом уровне исследования, его научной ценности, технической значимости и эффективности.

5.4.2 Оценка возможных рисков

Произведем оценку рисков. Определение рисков является одним из важнейших моментов при создании проекта. Учет рисков даст возможность избежать опасные факторы, которые негативно отражаются на внедрении в жизнь проекта.

При оценке важности рисков оценивается вероятность их наступления (P_i). По шкале от 0 до 100 процентов: 100 – наступит точно, 75 – скорее всего наступит, 50 – ситуация неопределенности, 25 – риск скорее всего не наступит, 0 – риск не наступит. Оценка важности риска оценивается весовым коэффициентом (w_i). Важность оценивается по 10- балльной шкале b_i . Сумма весовых коэффициентов должна равняться единице. Оценка важности рисков приведена в таблицах 23 – 27.

Таблица 23 – Социальные риски

| № | Риски | P_i | b_i | w_i | $P_i \cdot w_i$ |
|---|--|-------|-------|-------|-----------------|
| 1 | Низкая квалификация персонала | 0 | 2 | 0,061 | 0 |
| 2 | Непросвещенность предприятий о данном методе | 50 | 4 | 0,168 | 8,928 |
| 3 | Несоблюдение техники безопасности | 25 | 6 | 0,23 | 6,25 |
| 4 | Увеличение нагрузки на персонал | 50 | 4 | 0,168 | 8,928 |
| | Сумма | | 16 | 0,627 | 24,1 |

Таблица 24 – Экономические риски

| № | Риски | P_i | b_i | w_i | $P_i \cdot w_i$ |
|---|--------------------------------------|-------|-------|-------|-----------------|
| 1 | Инфляция | 100 | 2 | 0,029 | 1,960 |
| 2 | Экономический кризис | 25 | 3 | 0,049 | 0,980 |
| 3 | Непредвиденные расходы в плане работ | 25 | 5 | 0,126 | 5,862 |
| 4 | Сложность выхода на мировой рынок | 75 | 6 | 0,136 | 10,29 |
| | Сумма | | 16 | 0,34 | 19,92 |

Таблица 25 – Технологические риски

| № | Риски | P_i | b_i | w_i | $P_i \cdot w_i$ |
|---|--|-------|-------|-------|-----------------|
| 1 | Возможность поломки оборудования | 25 | 6 | 0,24 | 5,25 |
| 2 | Низкое качество поставленного оборудования | 25 | 8 | 0,313 | 7,0357 |
| | Сумма | | 14 | 0,553 | 12,2857 |

Таблица 26 – Научно-технические риски

| № | Риски | P_i | b_i | w_i | $P_i \cdot w_i$ |
|---|---|-------|-------|-------|-----------------|
| 1 | Развитие конкурентных методов | 50 | 5 | 0,135 | 8,936 |
| 2 | Отсутствие результата в установленные сроки | 25 | 6 | 0,123 | 6,25 |
| 3 | Несвоевременное патентование | 25 | 8 | 0,176 | 3,657 |
| | Сумма | | 19 | 0,434 | 18,843 |

Таблица 27 – Общие риски

| № п/п | Риски | b_i | w_i | $b_i \cdot w_i$ |
|-------|--------------------|-------|-------|-----------------|
| 1 | Социальные | 16 | 0,627 | 10,03 |
| 2 | Экономические | 16 | 0,34 | 5,44 |
| 3 | Технологические | 14 | 0,553 | 7,742 |
| 4 | Научно-технические | 19 | 0,434 | 8,246 |
| Итого | | | | 31,458 |

Расчет рисков дает общую оценку в 31,458. Эта цифра говорит, что проект имеет право на жизнь, хотя и не лишен вероятных препятствий.

В ходе выполнения раздела «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение» были решены следующие задачи:

1) Проведена оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научного исследования на примере SWOT-анализа, результат которого показал большой потенциал применения методики.

2) Определен полный перечень работ, проводимых при компьютерном моделировании. Ожидаемая трудоемкость работ для научного руководителя и студента-исполнителя составила 72 чел-дней. Общая максимальная длительность выполнения работы составила 102 календарных дней.

3) Суммарный бюджет затрат НИР составил – 134736,1 рублей.

4) Определена целесообразность и эффективность научного исследования путем оценки научно-технического уровня проекта, а также оценки возможных рисков. В результате проводимое исследование имеет высокую значимость теоретического уровня и приемлемый уровень рисков.

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

| | |
|--------|----------------------------------|
| Группа | ФИО |
| 5Г3А | Чернышову Артему Константиновичу |

| | | | |
|---------------------|----------|---------------------------|------------------------------------|
| Институт | ЭНИН | Кафедра | ЭПЭО |
| Уровень образования | Бакалавр | Направление/специальность | Электроэнергетика и электротехника |

Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

| | |
|---|--|
| <p>1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения</p> | <p>Модернизация асинхронного электропривода компрессора Atlas Copco. В модернизации системы управления электропривода используется векторное управление. Данный компрессор участвует в производстве каменной ваты. В технологическом процессе компрессор используется при выдуве волокна в камеру осаждения, а также в пневматических установках при нарезке, транспортировке и упаковке ковра каменной ваты по мере движения по производственной линии.</p> |
|---|--|

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>Вредные факторы проектируемой производственной среды возникают из-за использования ПЭВМ;</p> <p>СанПиН 2.2.4.548-9 Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны. Допустимые нормы параметров микроклимата на период 8-часовой рабочей смены составляет в холодный период года 21-23°C, в тёплый период года 22-24°C.</p> <p>СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Напряженность электрического поля в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц не должна превышать 25 В/м, а в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц не должно быть более 2.5 В/м.</p> <p>Защита может быть выполнена следующими путями:</p> <ul style="list-style-type: none"> – снижением мощности источника излучения; – ослаблением ЭМП на рабочем месте; <p>СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. При конструировании и проектировании уровень звукового давления не должен превышать 50 дБА</p> <p>Перечень мероприятий по снижению уровня шума:</p> <ul style="list-style-type: none"> – использование звукопоглощающих материалов; – уменьшение площади стеклянных ограждений и оконных проемов; <p>Механические опасности не выявлены; Термические опасности не выявлены; Существует опасность поражения электрическим током. В настоящее время, согласно ГОСТ 12.4.011-89 существуют следующие средства защиты от повышенного</p> |
|---|--|

| | |
|--|--|
| | <p>значения напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека:</p> <ul style="list-style-type: none"> – изолирующие устройства и покрытия; – устройства защитного заземления и зануления; – устройства автоматического отключения; – устройства выравнивания потенциалов и понижения напряжения; – предохранительные устройства; – молниеотводы и разрядники; <p>Причины пожара: возникновение короткого замыкания, перегрев ПЭВМ. Первичные средства пожаротушения: порошковые и углекислотные огнетушители.</p> |
| <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); – разработать решения по обеспечению экологической безопасности со ссылками на НТД по охране окружающей среды. | <p>Воздействие объекта на атмосферу нет (выбросов нет);</p> <p>Воздействия объекта на гидросферу нет (сбросов нет);</p> <p>Воздействие объекта на литосферу присутствует (отходы есть).</p> <p>СанПиН 2.1.7.1322-03. Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления.</p> |
| <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>Перечень возможных ЧС на объекте: наиболее вероятной ЧС являются пожар.</p> <p>Соблюдение правил противопожарной безопасности.</p> <p>Обоснованы мероприятия по предотвращению ЧС и разработан порядок действий в случае возникновения ЧС (ППБ 01-93 «Правила пожарной безопасности в Российской Федерации»).</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>Право на условие труда, отвечающие требованиям безопасности и гигиены.</p> <p>ТК РФ Глава 47. Особенности регулирования труда лиц, работающих вахтовым методом.</p> <p>Использование оборудования и мебели согласно антропогенным данным.</p> <p>ГОСТ 12.2.049-80 ССБТ. Оборудование производственное. Общие эргономические требования.</p> |

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

Задание выдал консультант:

| Должность | ФИО | Ученая степень, звание | Подпись | Дата |
|-----------|--------------|------------------------|---------|------|
| Доцент | Король И. С. | к.х.н. | | |

Задание принял к исполнению студент:

| Группа | ФИО | Подпись | Дата |
|--------|-------------------------------|---------|------|
| 5Г3А | Чернышов Артем Константинович | | |

6. Социальная ответственность

6.1 Вводная часть

Данный компрессор участвует в производстве теплоизоляционного материала – каменной ваты. В технологическом процессе компрессор используется при выдуве волокна в камеру осаждения, а также в пневматических установках при нарезке, транспортировке и упаковке ковра каменной ваты по мере движения по производственной линии.

Механизм компрессора приводится в действие электроприводом переменного тока АВВ М2СА 315 МВ.

Работы, выполняемые при установке и последующей эксплуатации электропривода компрессора можно условно разделить на следующие группы:

- монтаж электропривода;
- настройка электропривода;
- работы по техническому обслуживанию электропривода;
- работы по ликвидации аварий и устранению неисправностей.

Кроме того, проводятся планово–предупредительные ремонты электрооборудования, выполняемые в сроки ремонтов основного технологического электрооборудования по составленным и утвержденным графикам ППР.

6.2 Вредные и опасные производственные факторы

Вредные и опасные производственные факторы представлены в таблице 28 согласно ГОСТ 12.0.003-74^[8].

Таблица 28 – Опасные и вредные факторы при выполнении работ в лаборатории

| Наименование видов работ | Факторы (ГОСТ 12.0.003-74) | Нормативные документы |
|---------------------------------------|---|------------------------|
| Вредные | | |
| Работа с компрессором на производстве | Повышенный уровень шума на рабочем месте; | ГОСТ 12.1.00383 |
| | Воздействие электромагнитного излучения; | ГОСТ 12.1.00284 |
| | Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны. | СанПиН 2.2.4.548-9 |
| Опасные | | |
| Работа с компрессором на производстве | Возможность поражения электрическим током | ГОСТ 12.1.038– 82 ССБТ |

В соответствии с анализом опасных и вредных факторов производства и регламентированном по ГОСТ 12.0.003-74 на каждый из них, разработаны и внедрены на производстве правила и нормы техники безопасности для проведения безопасного обслуживания технологического процесса и оборудования.

Повышенный уровень шума на рабочем месте

В результате исследований установлено, что шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека. Шум воздействует не только на органы слуха, но и на весь

организм человека через центральную нервную систему: ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе.

Таблица 29 – Предельно допустимые уровни звука и эквивалентные уровни звука на рабочих местах для трудовой деятельности разных категорий тяжести и напряженности в дБА

| Категория напряженности | Категория тяжести трудового процесса | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|
| | Легкая физическая нагрузка | Средняя физическая нагрузка | Тяжелый труд 1 степени | Тяжелый труд 2 степен | Тяжелый труд 3 степени |
| Напряженность легкой степени | 80 | 80 | 75 | 75 | 75 |
| Напряженность средней степени | 70 | 70 | 65 | 65 | 65 |
| Напряженный труд 1 степени | 60 | 60 | – | – | – |
| Напряженный труд 2 степен | 50 | 50 | – | – | – |

Перечень мероприятий по снижению уровня шума:

- использование звукопоглощающих материалов;
- уменьшение площади стеклянных ограждений и оконных проемов.

Воздействие электромагнитного излучения

Источниками электромагнитных полей промышленной частоты 50 Гц являются все электроустановки переменного тока: линии электропередачи (ЛЭП), распределительные устройства, электросварочное оборудование,

высоковольтное электрооборудование промышленного, научного и медицинского назначения и др.

При облучении электромагнитными полями наблюдаются: постоянные изменения в крови (фазовые изменения лейкоцитов, эритроцитов и гемоглобина), поражение глаз в виде помутнения хрусталика (катаракты), изменения функционального состояния сердечнососудистой и центральной нервной систем, нарушения обменных процессов.

Временно допустимые уровни ЭМП, создаваемые ЭВМ приведены в таблице 30.

Таблица 30 – Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ (СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03)

| Наименование параметров | | ВДУ ЭМП |
|--|------------------------------------|---------|
| Напряженность электрического поля | в диапазоне частот 5 кГц – 2 кГц | 25 В/м |
| | в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц | 2,5 В/м |
| Плотность магнитного потока | в диапазоне частот 5 кГц – 2 кГц | 250 нТл |
| | в диапазоне частот 2 кГц – 400 кГц | 25 нТл |
| Напряженность электростатического поля | | 15 кВ/м |
| Электростатический потенциал экрана видеомонитор | | 500 В |

Защита быть выполнена следующими путями:

- снижением мощности источника излучения;
- ослаблением ЭМП на рабочем месте^[9].

Снижение мощности источника излучения может быть реализовано путем выбора генератора излучения минимально необходимой мощности.

При необходимости работы под действием электромагнитного излучения, превышающего допустимые значения (ремонт, профилактика и т.п.), используются средства индивидуальной защиты.

Повышенная или пониженная температура воздуха рабочей зоны

При производстве каменной ваты, имеет место выделение большого количества тепла. Источниками выделения тепла являются отходящие газы, расплав камня и шлак.

Защита от избыточной теплоты осуществляется экранированием рабочих мест, созданием тепловой изоляции, местной обдувающей вентиляции и увлажнением подаваемого воздуха мелко распыленной водой.

Допустимые нормы параметров микроклимата установлены по критериям допустимого теплового и функционального состояния человека на период 8-часовой рабочей смены. Они не вызывают повреждений или нарушений состояния здоровья, но могут приводить к возникновению общих и локальных ощущений теплового дискомфорта, напряжению механизмов терморегуляции, ухудшению самочувствия и понижению работоспособности.

Таблица 31 – Нормы микроклимата по ГОСТ 12.1 005-88

| Период года | Категория работ по уровню энергозатрат, Вт | Температура воздуха, °С | Температура поверхностей, °С | Относительная влажность воздуха, % | Скорость движения воздуха, м/с |
|-------------|--|-------------------------|------------------------------|------------------------------------|--------------------------------|
| Холодный | Средняя Пб | 17-19 | 15-21 | 60-40 | 0,2 |
| Тёплый | Средняя Пб | 20-22 | 16-27 | 60-40 | 0,2 |

Возможность поражения электрическим током

Оборудование, находящееся в пределах рабочей площадки, работает от электрического тока. Как следствие, существует вероятность поражения электрическим током.

При работах, связанных с опасностью поражения электрическим током, применяются необходимые меры защиты. В настоящее время, согласно ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ^[10], существуют следующие средства защиты от повышенного значения напряжения в электрической цепи, замыкание которой может произойти через тело человека:

- изолирующие устройства и покрытия;
- устройства защитного заземления и зануления;
- устройства автоматического отключения;
- устройства выравнивания потенциалов и понижения напряжения;
- предохранительные устройства;
- молниеотводы и разрядники.

6.3. Экологическая безопасность

Экологическая безопасность на предприятии — это определенный комплекс мер. Их цель – приведение его деятельности к соответствию природоохранным нормативам и повышение его рентабельности. Организация, использующая энерго- и ресурсосберегающие процессы, увеличивает свою эффективность, а кроме того, снижает воздействие вредных веществ, как на самих работников, так и на окружающую среду.

При работе компрессора неизбежны поломки, а следовательно возникновение отходов производства и воздействие объекта на литосферу.

Выбросы в литосферу строго регламентируются СанПиН 2.1.7.1322-03^[11]. «Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления».

6.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях

Соблюдение правил пожарной безопасности является важным условием нормальной эксплуатации оборудования и выполнения технологических требований. В соответствии с НПБ 105-03^[12] цех по степени пожароопасности относится к классу «В».

Основными причинами пожаров от электрического тока является короткое замыкание, перегрузки электрических установок, переходные сопротивления и искрения.

Во избежание пожаров от электрического тока необходимо, чтобы электрические сети и электрооборудование отвечали требованиям правил технической эксплуатации электроустановок потребителей и межотраслевых правил по охране труда при эксплуатации электроустановок ПОТ Р М-0162001^[13].

К техническим мероприятиям по предотвращению пожара, проводимым в цехе относятся:

- Инструктаж по ТБ вновь прибывших и регулярный инструктаж для работников цеха;
- Оборудование производства автоматизированными системами пожаротушения и пожарной сигнализацией;
- Курение допускается только в специально отведенных и оборудованных местах;
- Обеспечение помещений конвертерного цеха противопожарным оборудованием (песок, лопаты, огнетушители и пр.);
- Своевременный ремонт электрооборудования.

Надёжная и безопасная работа электрооборудования обеспечивается в результате правильного его выбора, качества изготовления и регулярного проведения осмотров, профилактических испытаний и ремонтов. Поэтому имеет особое значение выполнения требований ПУЭ^[14] и ГОСТ^[15] при выборе электрооборудования.

Каждый, обнаруживший пожар или возгорание, обязан немедленно вызвать пожарную охрану по телефону 01, а также при необходимости вызвать газоспасательную, медицинскую и другие службы. Информацию об очаге возгорания необходимо сообщить лицу ответственному за эвакуацию людей из здания. Если в помещении, где произошло загорание, находятся предметы, потеря которых может привести к серьезным финансовым затруднениям предприятия или к потере ценной информации, то нужно приступить к тушению очага пожара.

6.5. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Находясь на своем рабочем месте, т.е. в производственной среде, человек может подвергаться действию целого ряда опасных и (или) вредных производственных факторов, от действия которых он должен быть максимально защищен. В соответствии с ГОСТ 12.2.061-81^[16] рабочее оборудование, инструмент, приспособления должно полностью отвечать требованиям безопасности, окружающая производственная среда соответствовать санитарно-гигиеническим требованиям и, кроме того, рабочее место должно быть организовано таким образом, чтобы человек при выполнении работы затрачивал минимальное количество энергии. Соблюдение этих условий будет способствовать постоянно высокопроизводительному и безопасному труду. Правильная организация рабочего места подразумевает знание и выполнение эргономических требований, которые определяются существующими стандартами.

Режим труда и отдыха – это устанавливаемые для каждого вида работ порядок чередования периодов работы и отдыха и их продолжительность.

Рациональный режим – это такое соотношение и содержание периодов работы и отдыха, при которых высокая производительность труда сочетается с высокой и устойчивой работоспособностью человека без признаков чрезмерного утомления в течение длительного времени.

Здоровье человека напрямую связано с его работоспособностью и утомляемостью, а от состояния здоровья во многом зависит успешность трудовой деятельности работника. Утрачивание резервных возможностей, сопротивляемости организма к внешним и внутренним негативным факторам ведут к существенному снижению эффективности профессиональной трудовой деятельности.

Заключение

В результате выполнения выпускной квалификационной работы была проведена модернизация электропривода компрессора путем проектировки системы векторного управления.

В ходе проектировки системы управления был смоделирован асинхронный электродвигатель в неподвижной и вращающейся системах координат. Была проведена оптимизация контуров регулирования, а также моделирование системы при пуске и набросе ступенчатой и нелинейной нагрузки.

В результате применение системы векторного управления позволило повысить энергоэффективность и надежность компрессора. Высокая плавность переходных процессов и точность регулирования скорости также являются важными достоинствами спроектированной системы.

Также были рассмотрены экономические аспекты производства и проектирования электропривода. Учтены вопросы социальной безопасности труда. Были выявлены вредные и опасные факторы производства.

Список использованных источников и литературы

1. Удут Л.С., Мальцева О.П., Кояин Н.В., Проектирование и исследование автоматизированных электроприводов: учебное пособие. Ч.8. Асинхронный частотно-регулируемый электропривод; Томский политехнический университет. – 2-е изд., перераб. и доп. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 648 с.
2. Ключев В.И. Теория электропривода: Учеб. для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 2001. – 704 с.: ил.
3. Чернышев А.Ю., Кояин Н.В. Проектирование электрических приводов: Учебно-методическое пособие. – Томск: Изд-во ТПУ, 2005. – 120 с.
4. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; под редакцией И.П. Копылов. – 3-е изд., испр. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 757 с.: ил.
5. Попова С.Н. Управление проектами. Часть I: учебное пособие / С.Н. Попова; Томский политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 121 с.
6. А.И. Балашов., Е.М. Рогова., и др. Управление проектами. Учебник для бакалавров. «Юрайт». Москва 2013. – 383 с.
7. Ф.Н. Филина., И.А. Толмачёв. Всё об индивидуальном предпринимателе: . - (3-е изд., перераб. и доп.). «Российский Бухгалтер» Москва 2009. - 504 с.
8. ГОСТ 12.0.003-74 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы
9. ГОСТ 12.1.002-84 ССБТ. Электрические поля промышленной частоты
- 10.ГОСТ 12.4.011-89 ССБТ. Средства защиты рабочих. Классификация
- 11.СанПиН 2.1.7.1322-03. Гигиенические требования к размещению и обезвреживанию отходов производства и потребления.

- 12.НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывоопасной и пожарной безопасности.
- 13.ПОТ Р М-016-2001. Межотраслевые правила по охране труда при эксплуатации электроустановок.
- 14.Правила устройства электроустановок. М.: Минэнергоиздат, - 640с.
- 15.ГОСТ 12.1.038–82 ССБТ Электробезопасность.Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.
- 16.ГОСТ 12.2.061-81 «Оборудование производственное. Общие требования безопасности к рабочим местам».
- 17.Atlas Copco, Компрессоры GA 90+, GA 110, GA 110+, GA 132, GA 132+, GA 160, GA 160+, Инструкция по эксплуатации. 2008-03 № 2920 1727 00
- 18.ABB Motors and Generators | Low voltage General performance IE2 steel motors EN 06-2011 © Copyright 2011 ABB.