

мостовой кран, асинхронный двигатель, имитационная модель, частотно-регулируемый электропривод.

Объектом исследования является кран мостовой двухбалочный опорный г/п 10 тонн

Цель работы – исследование частотно-регулируемого асинхронного электропривода механизма подъема мостового крана.

В процессе исследования проводились эксперименты в среде Matlab Simulink по исследованию электропривода мостового крана

Выпускная квалификационная работа выполнена в текстовом редакторе Microsoft Word 2010). Также при работе использовались программы Matlab Simulink, Microsoft Visio 2010 и MathCAD.

Введение

1 Обзор и современное состояние электрооборудования мостовых кранов, постановка задачи

1.1 Краткая

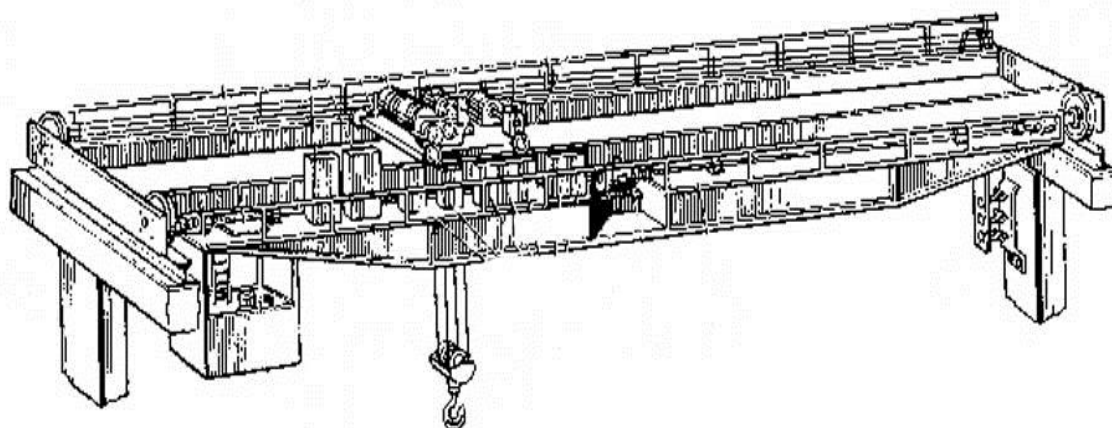


Рисунок 1 – Общий вид мостового крана

1.2 Кинематические схемы механизмов мостового крана

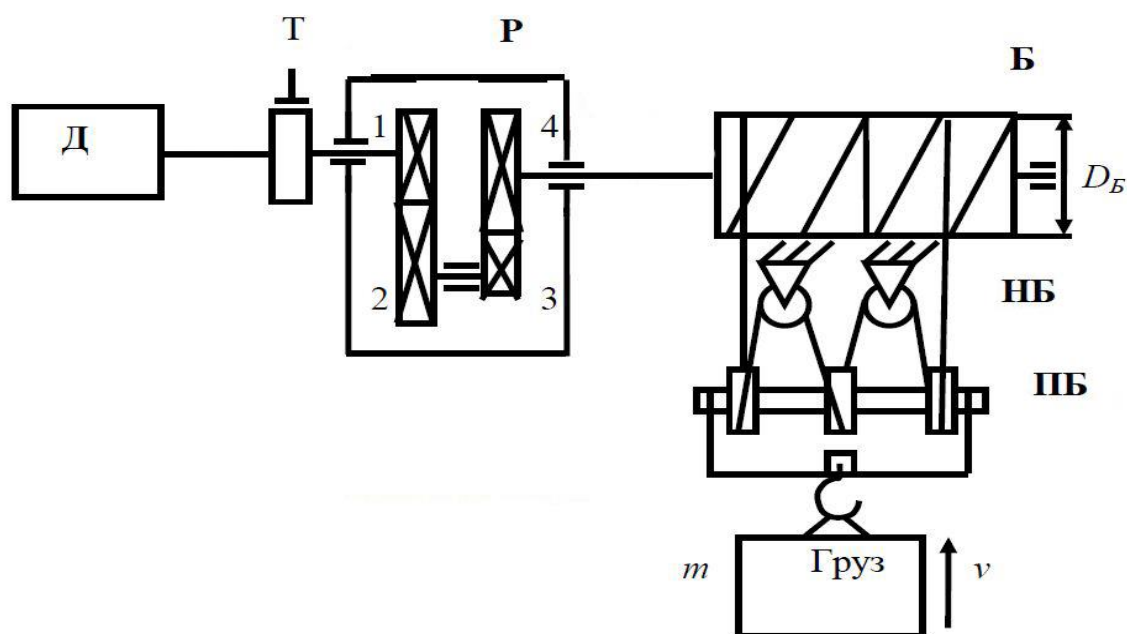


Рисунок 2 – Кинематическая схема механизма подъема

Двигатель Д через редуктор Р приводит во вращение барабан лебедки, на который канат наматывается при подъеме и сматывается при опускании

груза m . Грузозахватное приспособление подвешивается на подвижных блоках ПБ, которые образуют с неподвижными относительно лебедки блоками НБ полиспаст.

Двигатель включается в работу после строповки груза, затем выбирается слабина каната. Далее выполняется разгон с ускорением не выше допустимого до рабочей скорости и обеспечивается подъем груза. При достижении заданной высоты двигатель тормозится, на вал двигателя накладывается тормоз Т. Удержание груза в подвешенном состоянии осуществляется тормозом.

При спуске груза выдерживается ускорение не выше допустимого, двигатель работает в тормозном режиме. При подходе груза к площадке выгрузки скорость спуска снижается, груз плавно устанавливается на площадку. Ослабляется натяжение канатов для расстроповки груза, крюк отцепляется и цикл работы повторяется.

1.3 Условия работы и требования, предъявляемые к электроприводу мостового крана

1.4 Современные крановые электроприводы, обоснование и выбор

Основное назначение электропривода крана - регулирование скорости механизмов подъема и передвижения в некотором диапазоне. В первую очередь, тип электропривода зависит от физических принципов регулирования скорости конкретных видов двигателей.

На практике чаще всего применяются следующие двигатели:

- электродвигатели постоянного тока;
- асинхронные электродвигатели с фазным ротором;
- асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором.

В таблице 1 приведены достоинства и недостатки электродвигателей, используемых на кранах.

Таблица 1 – Сравнение двигателей, используемых на кранах

	Достоинства	Недостатки
--	-------------	------------

Двигатели постоянного тока	– простота устройства и принципов управления; – практически линейные механические и регулировочные характеристики; – большой пусковой момент.	– дороговизна изготовления; – износ и необходимость профилактического обслуживания коллекторно-щёточных узлов; – необходимо дополнительно устанавливать в цеху выпрямители трехфазного напряжения.
----------------------------	---	--

Продолжение таблицы 1

	Достоинства	Недостатки
Асинхронные электродвигатели с фазным ротором	– большой начальный вращающий момент; – приблизительно постоянная скоростью при различных перегрузках; – меньший пусковой ток по сравнению с электродвигателями с короткозамкнутым ротором	– большие габариты; – дороговизна изготовления; – износ и необходимость профилактического обслуживания коллекторно-щёточных узлов.
Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором	– относительная дешевизна; – отсутствие коллекторно-щёточных узлов; – легкость конструкции и простота ее изготовления; – высокий КПД и cos φ по сравнению с двигателями с фазным ротором.	– большой пусковой ток (до 5-7 In); – сложное техническое оборудование для регулирования скорости вращения.

Двигатели постоянного тока получили широкое распространение на тяжелых металлургических производствах, в т.ч. на литейных кранах. В настоящее время, новые краны с двигателями постоянного тока практически не изготавливаются.

Асинхронные электродвигатели с фазным ротором получили наибольшее распространение на кранах в советское время и популярны в наши дни. Двигатели данного типа применяются как для реконструкции, так и для новых грузоподъемных кранов.

Существует множество разновидностей систем управления для двигателей с фазным ротором. Изменение скорости и момента таких двигателей достигается путем включения в цепь ротора дополнительных электрических устройств. В зависимости от требований к диапазону регулирования скорости могут применяться:

- реостатные системы;
- дроссельные системы без регулирования скорости;
- дроссельные системы с тиристорными регуляторами.

В качестве коммутационного оборудования в цепях статора и ротора могут применяться:

- силовые контакторы, пускатели, реверсоры (и другие механические устройства коммутации);
- тиристоры (тиристорные ключи);
- IGBT-транзисторы;
- гибридные системы.

На сегодняшний день такая система управления морально устарела и на фоне современных микропроцессорных систем управления мостовыми кранами зарубежных производителей с частотным регулированием отличается повышенным энергопотреблением. Явным недостатком такой системы является такое явление, как «избыточный динамический момент», который возникает в момент пуска электродвигателя. Это явление порождает ударные нагрузки, приводит к преждевременному износу элементов, появлению люфтов в трансмиссии приводов, снижению точности позиционирования, повышенной утомляемости операторов и, как следствие, ухудшение качества выполняемых грузоподъемным механизмом работ.

Текущие и капитальные ремонты дадут эффект только на несколько месяцев, а дальше снова «разбитые» элементы трансмиссии. Это явление обусловлено спецификой подбора первой ступени резисторов. В релейно-контакторных системах управления со ступенчатым регулированием скорости «избыточного динамического момента» никак не избежать – это

технологическая особенность такого привода, она заключается в том, что первая пусковая ступень резисторов подбирается таким образом, чтобы пусковой момент асинхронного двигателя с фазным ротором был равен критическому моменту для устойчивости от «опрокидывания». То есть при пуске двигатель практически мгновенно развивает максимально-возможный момент, что порождает ударные нагрузки, именуемые «динамическим моментом». При проектировании и изготовлении грузоподъемного оборудования мощность электродвигателей в 2-3 раза превышала фактические требования механизма.

Асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором мало применялись на кранах в советское время в силу технологической сложности регулирования скорости. Использование ограничивалось легкими тельферными подъемниками, кран-балками и прочими одно-, двухскоростными тихоходными механизмами. В остальных случаях заменить двигатели постоянного тока либо двигатели с фазным ротором в то время они не могли. Ситуация изменилась лишь с широким распространением и удешевлением преобразователей частоты.

Снижение цен на полупроводниковые приборы в конце 90-ых годов подтолкнуло краностроителей к переходу к современным системам управления. Начиная с 2000 года в СНГ на новых кранах стали всё чаще применяться системы на базе преобразователей частоты. Преобразователи частоты позволяют плавно изменять величину напряжения и частоту на клеммах двигателя, благодаря чему становится возможным управлять скоростью вращения двигателя, сохраняя номинальный момент во всем диапазоне регулирования.

Использование асинхронного двигателя на базе преобразователя частоты обеспечит:

- абсолютный контроль и безударное регулирование скорости, ускорения и момента при любой массе груза (в пределах допускаемой);

- плавный разгон и торможение всех механизмов крана с заданным ускорением, что обеспечивает плавное нарастание моментов и усилий во всех узлах и механизмах крана;
- регулирование скорости АД с помощью преобразователей частоты дает экономию электроэнергии до 20 %, электроприводы работают с $\cos\varphi$ близким к 1;
- программируемый логический контроллер, использованный в системе кранового электропривода, и имеющий связь по сети с ПЧ, позволяет решить задачи диагностики, статистического сбора и обработки всех сигналов и нагрузок;
- тормозные колодки не требуют частой замены, а тормоза – постоянной регулировки, поскольку управляемое торможение осуществляют ПЧ, а тормоза служат лишь для удержания после полной остановки механизма;
- ограничение моментов как статических, так и динамических;
- устранение перекосов и раскачивания грузов;
- защита электродвигателей (максимально-токовая, время-токовая, тепловая и др.);
- улучшение условий работы оператора крана за счет применения современной аппаратуры управления;
- сокращение количества релейно-контакторной аппаратуры позволяет повысить надежность работы электрооборудования и уменьшить трудозатраты на профилактическое обслуживание;
- уменьшение динамических нагрузок на механизмы крана и увеличение сроков службы оборудования.

1.5 Противораскачивание груза

Каждое движение крана с подвешенным грузом приводит к его колебаниям, поэтому оператор крана должен постоянно корректировать свои действия с учетом этого раскачивания. Опытный и внимательный оператор может достаточно быстро уменьшить колебания груза путем принятия

соответствующих контрмер. Если же оператор не обладает большим опытом управления краном или оператор потерял внимание по причине утомления, то даже самые простые операции могут привести к огромной потере времени или к возникновению рисков коллизий и/или аварийных ситуаций.

Системы уменьшения колебаний груза (системы противораскачивания), снимают с оператора задачи по уменьшению раскачивания груза, как следствие он может сосредоточиться на управлении краном, сконцентрироваться на подъеме груза, его перемещении, позиционировании и опускании в нужную точку.

Системы противораскачивания служат для уменьшения колебаний груза, вызванных ускорениями механизмов в процессе эксплуатации крана. Успокоение достигается за счет точного воздействия на процессы разгона и торможения. Такие системы могут применяться как в составе систем управления для новых кранов, так и в качестве дополнения к уже существующим системам управления. Уменьшение колебаний позволяет снизить риск возникновения коллизий и аварийных ситуаций в сочетании с одновременной быстротой и точностью позиционирования груза. Система противораскачивания позволяет уменьшить колебания при перемещении моста, тележки и поворота крана одновременно.

Существует два основных вида электронных систем противораскачивания: системы с прямой обратной связью, имеющие в своем составе камеру и рефлектор (отражатель), которые обеспечивают получение оперативной достоверной информации об отклонении груза, и системы, работающие на основе математической модели, описывающей колебания груза при движении механизмов крана, то есть угол отклонения груза в той или иной плоскости вычисляется исходя из физических и математических законов [7].

В системах с обратной связью камера с высоким разрешением используется для измерения отклонения крюка или другого типа грузозахватного органа от своей оси. Для того, что бы сделать это возможным, на грузозахватный механизм устанавливается специальный отражатель. В

самом простом случае отражатель представляет собой плоскость квадратной формы с расположенными на ней в шахматном порядке двумя белыми квадратами. Данный тип рефлектора называется пассивным. В случае, когда на него могут воздействовать чрезмерное освещение или тени, которые влияют на точность системы измерения, рекомендуется использовать активный рефлектор, снабженный LED-матрицей, а также обогревом, способствующим таянию снега, если кран используется на открытом воздухе. Самым лучшим же выходом в случае использования системы «камера-рефлектор» является применения инфракрасного рефлектора и оснащение камеры инфракрасным фильтром. Точность определения колебаний составляет 5 мм на расстоянии от камеры до рефлектора 10м, точность определения расстояния между камерой и рефлектором составляет 1%. Такие системы способны также исключать колебания груза при наличии сильного бокового ветра.

Какой бы вид системы противораскачивания груза ни был установлен на кране, ее применение ведет к снижению времени выполнения операций, повышению точности позиционирования груза, уменьшению утомляемости операторов во время работы, а также снижает риск возникновения аварийных ситуаций.

1.6 Исходные данные и постановка задачи

Исходными данными проектирования являются физические и геометрические параметры механизма подъема мостового крана. Исходные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Исходные данные проектирования

Наименование параметра	Значение параметра
Тип крана	кран мостовой опорный
Конструкция кранового моста	двухбалочный мост, балки коробчатые
Грузоподъемность крана, т	10

Кратность полиспаста, α	3
Номинальная скорость подъема, м/с	0,1
Номинальная скорость движения тележки, м/с	0,63
Диаметр барабана лебедки, м	$90 \cdot 10^{-3}$
Напряжение в канате, тс/см ²	2
Модуль упругости каната, тс/см ²	1500

Продолжение таблицы 2

Наименование параметра	Значение параметра
Продолжительность включения крана, %	25
Высота пролетной балки, м	2,5

2 Выбор оборудования и расчет системы управления электропривода механизма подъема

2.1 Выбор электродвигателя и определение параметров схемы замещения

Расчет предварительной мощности двигателя производится по формуле:

$$P \geq \frac{P_c}{k_T}, \quad (2.1)$$

где P – мощность двигателя, Вт;

P_c - статическая мощность электродвигателя, Вт ;

$k_T = 1$ – коэффициент, учитывающий режим работы механизма, вид управляющего устройства и электропривода [8].

Статическая мощность электродвигателя рассчитывается по формуле:

$$P_c = \frac{F_\Gamma \cdot V}{\eta_m}, \quad (2.2)$$

где F_Γ - грузоподъёмная сила, Н;

$\eta_m = 0,9$ — значение КПД механизма подъёма.

Грузоподъёмная сила рассчитывается по формуле:

$$F_\Gamma = m_\Gamma \cdot g, \quad (2.3)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения,

m_Γ - номинальная масса груза, кг.

$$F_\Gamma = 10000 \cdot 9,81 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Н.}$$

Статическая мощность электродвигателя

$$P_c = \frac{9,81 \cdot 10^4 \cdot 0,1}{0,9} = 10,9 \text{ кВт}$$

$$P \geq \frac{10,9 \cdot 10^3}{1} = 10,9 \cdot 10^3 \text{ Вт}$$

Из справочника [9] выбираем с учетом ПВ = 25% и мощности $P > 10,9$ кВт электродвигатель серии 5А. Технические данные электродвигателя приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры электродвигателя

Типо- размер	$P_{ДВ.Н}$, кВт	$n_{ном}$, об/мин	$\eta, \%$	$\cos \varphi_H$	$M_n /$ $M_{ном}$	$I_n /$ $I_{ном}$	$s_H, \%$	$J_{ДВ}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$
5А160S6	11	970	87	0,82	1,9	6,5	3	0,11

Синхронная угловая частота вращения двигателя:

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_{1н}}{z_p} = \frac{\pi \cdot n_0}{30} = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,7 \text{ рад/с}. \quad (2.4)$$

Угловая скорость вращения двигателя:

$$\omega_{\text{дв.н}} = (1 - s_n) \cdot \omega_0 = (1 - 0,03) \cdot 104,7 = 101,5 \text{ рад/с}. \quad (2.5)$$

Номинальный момент двигателя

$$M_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}} \cdot 10^3}{\omega_{\text{дв.н}}} = \frac{11 \cdot 10^3}{101,5} = 108,3 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.6)$$

Номинальное фазное напряжение и номинальный фазный и линейный ток (действующие значения) статора при схеме соединения обмоток звезда:

$$U_{1фн} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}}, \text{ В}; \quad (2.7)$$

$$I_{1фн} = I_{1лн} = I_{\text{дв.н}} = \frac{P_{\text{дв.н}}}{3 \cdot U_{1фн} \cdot \cos \phi_n \cdot \eta_n} = \frac{11 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot 0,82 \cdot 0,87} = 23,36 \text{ А}. \quad (2.8)$$

Максимальный потребляемый ток двигателя при прямом пуске:

$$I_{1\text{макс}} = k_{i\text{дв}} \cdot I_{1лн} = 6,5 \cdot 23,36 = 151,84 \text{ А}. \quad (2.9)$$

Критический момент двигателя на естественной характеристике:

$$M_k = m_k \cdot M_{\text{дв.н}} = 2,5 \cdot 108,3 = 270,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.10)$$

Пусковой момент двигателя при прямом пуске:

$$M_{\text{дв.пуск}} = m_{\text{п}} \cdot M_{\text{дв.н}} = 1,9 \cdot 108,3 = 205,7 \text{ Н} \cdot \text{м}. \quad (2.11)$$

Ток холостого хода двигателя [10]:

$$I_0 = I_{1н} \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{I_{1p^*}}{I_{1н}}\right)^2 - \left[\frac{p^* \cdot (1 - s_n)}{(1 - p^* \cdot s_n)}\right]^2}{1 - \left[\frac{p^* \cdot (1 - s_n)}{(1 - p^* \cdot s_n)}\right]^2}}, \text{ А} \quad (2.12)$$

где

$$I_{1p^*} = \frac{p^* \cdot P_{\text{двн}}}{3 \cdot U_{1\text{фн}} \cdot (\cos \phi_{p^*} \cdot \eta_{p^*})} = \frac{0,75 \cdot 11 \cdot 10^3}{3 \cdot 220 \cdot (0,77 \cdot 0,87)} = 18,66 \text{ А} \quad - \quad \text{ток фазы}$$

статора при частичной нагрузке;

$p^* = 0,75$ – степень загрузки;

$\eta_{p^*} = \eta_n = 0,87$ – КПД при частичной нагрузке;

$\cos \phi_{p^*} = 0,77$ – коэффициент мощности в режиме частичной загрузки.

$$I_0 = 23,362 \cdot \sqrt{\frac{\left(\frac{18,66}{23,362}\right)^2 - \left[\frac{0,75 \cdot (1 - 0,03)}{(1 - 0,75 \cdot 0,03)}\right]^2}{1 - \left[\frac{0,75 \cdot (1 - 0,03)}{(1 - 0,75 \cdot 0,03)}\right]^2}} = 10,139 \text{ А.}$$

Приведенное к обмотке статора активное сопротивление обмотки ротора в номинальном режиме:

$$R_2' = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot (1 - s_n)}{2 \cdot m_k \cdot P_{\text{двн}} \cdot C_1^2 \cdot \left(\beta + \frac{1}{s_k}\right)}, \text{ Ом} \quad (2.13)$$

где $C_1 = 1 + \frac{I_0}{2 \cdot k_i \cdot I_{1\text{фн}}} = 1 + \frac{10,139}{2 \cdot 6,5 \cdot 23,3} = 1,033$ – коэффициент,

характеризующий соотношением $\frac{X_\mu + X_{1\sigma}}{X_\mu}$;

$$R_2' = \frac{3 \cdot 220^2 \cdot (1 - 0,03)}{2 \cdot 2,5 \cdot 11 \cdot 10^3 \cdot 1,033^2 \cdot \left(1 + \frac{1}{0,03}\right)} = 0,328 \text{ Ом}$$

Критическое скольжение:

$$\begin{aligned} s_k &= s_n \cdot \frac{m_k + \sqrt{m_k^2 - [1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (m_k - 1)]}}{1 - 2 \cdot s_n \cdot \beta \cdot (m_k - 1)} = \\ &= 0,03 \cdot \frac{2,5 + \sqrt{2,5^2 - [1 - 2 \cdot 0,03 \cdot 1 \cdot (2,5 - 1)]}}{1 - 2 \cdot 0,03 \cdot 1 \cdot (2,5 - 1)} = 0,159 \end{aligned} \quad (2.14)$$

где $\beta=1$ – коэффициент, характеризующий соотношение активных сопротивлений статора и ротора.

Активное сопротивление обмотки статора в номинальном режиме:

$$R_1 = R_2' \cdot \beta \cdot C_1 = 0,328 \cdot 1 \cdot 1,033 = 0,339 \text{ Ом}. \quad (2.15)$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания в номинальном режиме

$$X_{\text{кн}} = R_2' \cdot \gamma \cdot C_1 = 0,328 \cdot 6,225 \cdot 1,033 = 2,112 \text{ Ом}, \quad (2.16)$$

где $\gamma = \sqrt{\left(\frac{1}{s_{\text{к}}}\right)^2 - \beta^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{0,03}\right)^2 - 1^2} = 6,225$ – коэффициент,

характеризующий соотношение индуктивного сопротивления короткого замыкания и приведенного активного сопротивления ротора.

Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора в номинальном режиме:

$$X_{1\sigma} = 0,42 \cdot X_{\text{кн}} = 0,42 \cdot 2,112 = 0,887 \text{ Ом}. \quad (2.17)$$

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

$$L_{1\sigma} = \frac{X_{1\sigma}}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{0,887}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 2,823 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (2.18)$$

Приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора в номинальном режиме:

$$X_{2\sigma}' = 0,58 \cdot \frac{X_{\text{кн}}}{C_1} = 0,58 \cdot \frac{2,112}{1,033} = 1,185 \text{ Ом}. \quad (2.19)$$

Приведенная индуктивность обмотки ротора, обусловленная потоком рассеяния, в номинальном режиме:

$$L_{2\sigma}' = \frac{X_{2\sigma}'}{2 \cdot \pi \cdot f_{1\text{н}}} = \frac{1,185}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 3,773 \cdot 10^{-3} \text{ Гн}. \quad (2.20)$$

ЭДС ветви намагничивания $E_{\text{м}}$, наведенная потоком воздушного зазора в обмотке статора в номинальном режиме, равна:

$$E_1 = \sqrt{(U_{1\phi H} \cdot \cos \phi_H - I_{1\phi H} \cdot R_1)^2 + (U_{1\phi H} \cdot \sin \phi_H - I_{1\phi H} \cdot X_{1\sigma})^2} =$$

$$= \sqrt{(220 \cdot 0,82 - 23,36 \cdot 0,339)^2 + (220 \cdot 0,572 - 23,36 \cdot 0,887)^2} = 202,026 \text{ В} \quad (2.21)$$

Тогда индуктивное сопротивление контура намагничивания

$$X_\mu = \frac{E_1}{I_0} = \frac{202,026}{10,139} = 19,92 \text{ Ом.} \quad (2.22)$$

Результирующая индуктивность, обусловленная магнитным потоком в воздушном зазоре:

$$L_m = \frac{X_\mu}{2 \cdot \pi \cdot f_{1H}} = \frac{19,925}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,063 \text{ Гн.} \quad (2.23)$$

Параметры схемы замещения электродвигателя сведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры схемы замещения электродвигателя

R_1 , Ом	$X_{1\sigma}$, Ом	$L_{1\sigma}$, мГн	X_μ , мГн	L_μ , Гн	R_2' , Ом	$X_{2\sigma}'$, Ом	$L_{2\sigma}'$, мГн	X_{KH} , Ом
0,339	0,887	2,823	19,925	0,063	0,328	1,185	3,773	2,112

При найденных параметрах рассчитываются значения номинального электромагнитного момента двигателя [11]:

$$M_{\text{эм.н}}^* = \frac{3 \cdot U_{1\phi H}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_H \cdot \left[X_{KH}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_H} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_H \cdot X_\mu} \right)^2 \right]} = 115,146 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.24)$$

$$M_{\text{эм.н}}^{**} = \frac{3}{2} \cdot z_p \cdot \frac{L_m}{(L_m + L_{2\sigma}')} \cdot \Psi_{2H} \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{I_{1H}^2 - I_0^2} = 114,975 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.25)$$

где

$$\Psi_{2H} = \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot L_m = \sqrt{2} \cdot 10,139 \cdot 0,063 = 0,909 \text{ Вб.} \quad (2.26)$$

Условия выполняются:

$$M_{\text{дв.н}} < M_{\text{эм.н}}^* \leq 1,1 \cdot M_{\text{дв.н}}$$

$$108,3 < 115,146 \leq 1,1 \cdot 114,975 = 119,12;$$

$$M_{\text{ЭМ.Н}}^{**} = 114,975 \approx M_{\text{ЭМ.Н}}^{*} = 115,146.$$

Следовательно, предварительно принятые значения $(\cos \varphi_{p^{*}} \cdot \eta_{p^{*}})$ и β выбраны верно.

2.2 Расчет редуктора и тормозного устройства

Угловая скорость барабана вычисляется по формуле [12]:

$$\omega_{\delta} = \frac{2 \cdot V \cdot \alpha}{D_{\delta}}, \text{ рад / с} \quad (2.27)$$

где $\alpha = 3$ – кратность полиспаста;

$D_{\delta} = 90 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ – диаметр барабана.

$$\omega_{\delta} = \frac{2 \cdot 0,1 \cdot 3}{90 \cdot 10^{-3}} = 6,6 \text{ рад / с}$$

Передаточное число вычисляется по формуле:

$$i = \frac{\omega_{\delta \text{в}}}{\omega_{\delta}}, \quad (2.28)$$

Следовательно:

$$i = \frac{101,526}{6,6} = 15,3$$

Выбираем редуктор с передаточным отношением $i = 16$.

Статический момент на входном валу редуктора при торможении определяется по формуле:

$$M_{\text{ст}} = \frac{M_{\Gamma} \cdot \eta_m \cdot \eta_a}{i} \quad (2.29)$$

где $M_{\text{ст}}$ – статистический момент на входном валу редуктора при торможении, Н·м;

M_{Γ} – грузовой момент на барабане, Н·м;

$\eta_m = 0,9$ – КПД механизма, принимаем равным КПД редуктора;

η_a – КПД полиспаста;

i – номинальное передаточное число редуктора.

Определяем КПД полиспаста по следующей формуле:

$$\eta_a = \left(\frac{1 + \eta_1 + \eta_1^2 + \dots + \eta_1^{a-1}}{a} \right) \cdot \eta_1^k, \quad (2.30)$$

где $\eta_1 = 0,98$ — КПД блока на подшипниках качения;

k — число обводных блоков (для мостового крана $k = 0$).

КПД полиспаста:

$$\eta_a = \frac{1 + 0,98 + 0,98^2}{3} = 0,98;$$

Наибольшее натяжение ветви каната, набегающего на барабан при подъёме груза, вычисляется по формуле:

$$F_a = \frac{F_r}{\alpha \cdot \mu \cdot \eta_a}, \quad (2.31)$$

где F_a — натяжение ветви каната, Н·м

μ - число полиспастов. Для мостового крана $\mu=2$ т.е. оба конца каната закреплены на барабане для строго вертикального подъёма груза и выравнивания усилий на опоры барабана [2] (рисунок 3).

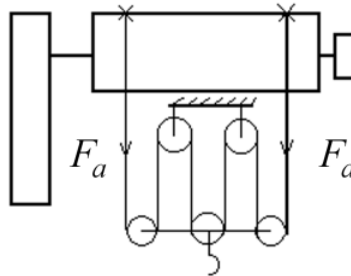


Рисунок 3 – Схема полиспаста механизма подъёма груза: $\mu = 2$, $\alpha = 3$

$$F_a = \frac{9,81 \cdot 10^4}{3 \cdot 2 \cdot 0,98} = 16,68 \cdot 10^3 \text{ Н}$$

Грузовой момент на барабане вычисляется по формуле:

$$M_r = \frac{\mu \cdot F_a \cdot D_o}{2}, \quad (2.32)$$

Получим:

$$M_r = \frac{2 \cdot 1,98 \cdot 10^4 \cdot 90 \cdot 10^{-3}}{2} = 1782 \text{ Н·м};$$

Статический момент на входном валу редуктора:

$$M_{\text{ст}} = \frac{1782 \cdot 0,9 \cdot 0,98}{16} = 98 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Тормозной момент, на который регулируют тормоз, рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{тр}} \geq k \cdot M_{\text{ср}}, \quad (2.33)$$

где $M_{\text{тр}}$ – тормозной момент, Н·м;

k — коэффициент запаса торможения.

Согласно [2] $k > 1,5$. Принимаем $k = 2$.

$$M_{\text{тр}} = 2 \cdot 98 = 196 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

2.3 Расчет статических характеристик электродвигателя

Естественная механическая характеристика $M_{\text{эм}}(s)$ электродвигателя для частоты $f_{1\text{н}} = 50$ Гц рассчитывается по выражению [11]:

$$M_{\text{эм}}(s) = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]}, \quad (2.34)$$

где $M_{\text{эм}}$ – электромагнитный момент двигателя, Н·м.

Механическая характеристика $\omega(M_{\text{эм}})$ показана на рисунке 4.

Значение электромагнитного номинального момента при номинальном скольжении $s_{\text{н}}$:

$$M_{\text{эм}}(s_{\text{н}}) = M_{\text{эм.н}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{\text{н}} \cdot \left[X_{\text{кн}}^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_{\text{н}}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{\text{н}} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} = 115,146 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

Рисунок 4 – Механическая характеристика асинхронного двигателя $\omega(M)$

Момент трения на валу двигателя:

$$M_{\text{с.дв}} = M_{\text{эм.н}} - M_{\text{дв.н}} = 115,146 - 108,23 = 6,8 \text{ Нм}. \quad (2.35)$$

Критическое скольжение:

$$s_k = R_2' \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{R_1}{X_\mu}\right)^2}{R_1^2 + X_{\text{кн}}^2}} = 0,328 \cdot \sqrt{\frac{1 + \left(\frac{0,339}{19,925}\right)^2}{0,339^2 + 2,112^2}} = 0,153 ; \quad (2.36)$$

Электромагнитный критический момент при критическом скольжении:

$$M_{\text{эм}}(s_k) = M_{\text{эм.к}} = \frac{3 \cdot U_{1\text{фн}}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot \left\{ R_1 + \sqrt{(R_1^2 + X_{\text{кн}}^2) \cdot \left[1 + \left(\frac{R_1}{X_\mu}\right)^2 \right]} \right\}} = 279,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Естественные электромеханические характеристики $I_1(s)$ и $I_2'(s)$ электродвигателя рассчитывается для частоты $f_{1\text{н}} = 50$ Гц по выражению

$$I_1(s) = \sqrt{I_0^2 + I_2'^2(s) + 2 \cdot I_0 \cdot I_2'(s) \cdot \sin \phi_2(s)} , \quad (2.37)$$

где $I_1 = I_{1\text{ф}}$ – действующее значение фазного тока двигателя, А;

$$\begin{aligned} I_2'(s) &= \frac{U_{1\text{фн}}}{\pm \sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + X_{\text{кн}}^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s \cdot X_\mu}\right)^2}} = \\ &= \frac{220}{\pm \sqrt{\left(0,339 + \frac{0,328}{s}\right)^2 + 2,112^2 + \left(\frac{0,339 \cdot 0,328}{s \cdot 19,925}\right)^2}}; \end{aligned}$$

– приведенный к обмотке статора ток ротора, А;

$$I_0 = \frac{U_{1\text{фн}}}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X_\mu)^2}} = \frac{220}{\sqrt{0,339^2 + (0,887 + 19,925)^2}} = 10,56 \text{ А},$$

– действующее значение тока холостого хода, А;

$$\sin \phi_2(s) = \frac{X_{\text{кн}}}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (X_{\text{кн}})^2}} = \frac{2,112}{\sqrt{\left(0,339 + \frac{0,328}{s}\right)^2 + (2,112)^2}}.$$

По результатам расчета построены электромеханические характеристики двигателя $\omega(I_1)$ и $\omega(I_2')$ (рисунок 5), где значения угловой скорости вращения двигателя находятся по выражению

$$\omega = \omega_0 \cdot (1 - s), \frac{\text{рад}}{\text{с}}. \quad (2.38)$$

Для скольжения $s = s_H$ рассчитывается значения номинального тока статора $I_{1H}(s_H)$.

Рисунок 5 – Естественные электромеханические характеристики двигателя $\omega(I_1)$ и $\omega(I_2')$

В результате расчёта естественных характеристик двигателя получены следующие параметры для их характерных точек:

$$s_H = 3\%; \quad s_K = 15,3\%; \quad I_{1H} = 23,52 \text{ A}; \quad I_{1\text{макс}} = 109,4 \text{ A};$$

$$I_{1\text{макс}} / I_{1H} = 4,68 \text{ A}; \quad M_{\text{эм.н}} = 115,14 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{\text{эм.к}} = 279,7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{\text{эм.к}} / M_{\text{эм.н}} = 2,42; \quad M_{\text{эм.пуск}} = 93 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{\text{эм.пуск}} / M_{\text{эм.н}} = 0,8;$$

Справочные и расчётные параметры двигателя:

$$s_H = 3\%; \quad s_K = 15,9\%; \quad I_{\text{дв.н}} = 23,36 \text{ A}; \quad I_{\text{дв.макс}} = 151,84 \text{ A}$$

$$I_{\text{дв.макс}} / I_{\text{дв.н}} = 6,5; \quad M_{\text{дв.н}} = 108,3 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_K = 270,7 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_K / M_{\text{дв.н}} = 2,5; \quad M_{\text{дв.пуск}} = 205,7 \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad M_{\text{дв.пуск}} / M_{\text{дв.н}} = 1,899$$

Сравнения параметров расчётных характеристик со справочными параметрами двигателя показывают соответствие условиям для их характерных точек $M_{\text{эм.н}} > M_{\text{дв.н}}$, $M_{\text{эм.к}} > M_K$. Условие $M_{\text{эм.пуск}} > M_{\text{дв.пуск}}$ не выполняется, поэтому часть характеристики $\omega(M)$ показана пунктиром.

2.4 Выбор типа преобразователя и расчет параметров структурной схемы двигателя

Для регулируемого асинхронного электропривода подъема мостового крана используем преобразователь серии Mitsubishi FR-F740-00250 [13], параметры которого приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры преобразователя частоты Mitsubishi

Модель	Число фаз на входе	U_n , В	$I_{н.н}$, А	$I_{н.макс}$, А	Рекомендуемая мощность двигателя, кВт
Mitsubishi FR-F740-00250	3	380	25	30	11

Общие технические данные преобразователя частоты Mitsubishi:

- коэффициент мощности 0,8;
- КПД не менее 0,96;
- выходная частота 0,5÷400 Гц;
- частота ШИМ 0,7÷14,5 кГц, (принимается 10 кГц).

Способ управления – векторный.

К электроприводам механизмов подъема мостовых кранов предъявляются наиболее жесткие требования, поэтому был выбран векторный способ управления. Использование преобразователя частоты с векторным управлением позволит повысить скорость перемещения и точность останова груза, за счет ограничения рывка и ускорения обеспечить отсутствие ощутимых толчков при старте и останове, увеличить срок службы основных механических узлов – тяговых тросов, тормозных колодок, редукторов, подвески противовеса.

Эквивалентные индуктивности обмоток статора:

$$L_1 = L_{1\sigma} + L_m = 0,002823 + 0,063 = 0,066 \text{ Гн}; \quad (2.39)$$

ротора, приведённой к цепи статора:

$$L'_2 = L'_{2\sigma} + L_m = 0,003773 + 0,063 = 0,067 \text{ Гн}; \quad (2.40)$$

Коэффициент рассеяния:

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_1 \cdot L'_2} = 1 - \frac{0,063^2}{0,066 \cdot 0,067} = 0,096. \quad (2.41)$$

Эквивалентное сопротивление цепи статора:

$$R_{1\sigma} = R_1 + R'_2 \cdot \frac{L_m^2}{L'^2_2} = 0,339 + 0,328 \cdot \frac{0,063^2}{0,067^2} = 0,632 \text{ Ом}. \quad (2.42)$$

Электромагнитные постоянные времени цепи статора и ротора:

$$T_{1\sigma} = \frac{\sigma \cdot L_1}{R_{1\sigma}} = \frac{0,096 \cdot 0,066}{0,632} = 0,01 \text{ с}. \quad (2.43)$$

$$T_2 = \frac{L'_2}{R'_2} = \frac{0,067}{0,328} = 0,205 \text{ с}. \quad (2.44)$$

2.5 Расчет характеристик двигателя при векторном управлении и проверка выбора двигателя и преобразователя

В плоскости механической характеристики $\omega(M)$ рисунка 2.4 рассчитаны и построены:

1. Характеристика электромагнитного номинального момента $M_{\text{эм.н}} = 115,14 \text{ Н} \cdot \text{м}$;

2. Характеристика статического момента максимальной нагрузки $M_{\text{с эм.макс}}(\omega) = M_{\text{с макс}}(\omega) + \Delta M_{\text{с дв}}$, где,

$$M_{\text{с макс}} = M_{\text{гр.макс}} = (1 + a + b) \left(\frac{m_{\text{г}} \cdot g}{\alpha} \cdot R_6 \right) \frac{1}{i_{\text{ред}}}, \quad (2.45)$$

где $a = b = \frac{1 - \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{ред}}}{2 \cdot \eta_{\text{пер}} \cdot \eta_{\text{ред}}}$ - коэффициенты постоянных (a) и переменных

(b) потерь механизма, $\eta_{\text{пер}} = 0,96$; $\eta_{\text{ред}} = 0,98$.

$m_{\text{гр}} = 10 \cdot 10^3 \text{ кг}$ - масса груза;

$R_6 = 45 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - радиус барабана;

$$M_{с макс} = (1 + 0,031 + 0,031) \left(\frac{10^4 \cdot 9,8}{3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \right) \frac{1}{16} = 98 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{с эм. макс}(\omega) = 98 + 6,8 = 104,8 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

3. Характеристика статического момента минимальной нагрузки

$M_{с эм. мин}(\omega) = M_{с мин}(\omega) + \Delta M_{с дв}$, где

$$M_{с мин}(\omega) = a \cdot \left(\frac{m_{гр} \cdot g}{\alpha} \cdot R_6 \right) \frac{1}{i_{ред}}, \text{ Н} \cdot \text{м}; \quad (2.46)$$

$$M_{с мин}(\omega) = 0,031 \cdot \left(\frac{10^4 \cdot 9,8}{3} \cdot 45 \cdot 10^{-3} \right) \frac{1}{16} = 2,8 \text{ Н} \cdot \text{м};$$

$$M_{с эм. мин}(\omega) = 2,8 + 6,8 = 9,7 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

4. Зависимость длительно допустимого момента электродвигателя

$M_{эм. длит. доп}(\omega)$ по выражению:

$$\begin{cases} M_{эм. длит. доп}(\omega) = \left(k + (1-k) \cdot \frac{2 \cdot \omega}{\omega_{дв.н}} \right) \cdot M_{эм.н} & \text{при } 0 < \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{дв.н}; \\ M_{эм. длит. доп}(\omega) = M_{эм.н} = 115,14 \text{ Н} \cdot \text{м}, & \text{при } 0,5 \cdot \omega_{дв.н} < \omega \leq \omega_{дв.н}. \end{cases}$$

где $k = 0,95$ – коэффициент ухудшения теплоотдачи двигателя при неподвижном роторе.

5. Значение $M_{эп. макс}$ соответствующее максимальному току электропривода $I_{эп. макс}$. Для этого на естественной электромеханической характеристике определено соответствующее $I_{эп. макс} = I_{и. макс}$ значение

скольжения $s_{T.1} = \frac{\omega_0 - \omega_{T.1}}{\omega_0} = \frac{104,7 - 100,43}{104,7} = 0,041$ и при этом скольжении

найден значение максимального электромагнитного момента

$$M_{\text{эм. макс}} = \frac{3 \cdot U_{1\phi \text{ н}}^2 \cdot R_2'}{\omega_0 \cdot s_{T.2} \cdot \left[(X_{\text{кн}})^2 + \left(R_1 + \frac{R_2'}{s_{T.2}} \right)^2 + \left(\frac{R_1 \cdot R_2'}{s_{T.2} \cdot X_{\mu}} \right)^2 \right]} =$$

$$= \frac{3 \cdot 220^2 \cdot 0,328}{104,72 \cdot 0,041 \cdot \left[(2,112)^2 + \left(0,339 + \frac{0,328}{0,041} \right)^2 + \left(\frac{0,339 \cdot 0,328}{0,041 \cdot 19,925} \right)^2 \right]} = 149,65 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

В плоскости электромеханической характеристики $\omega(I_1)$ рисунка 6 рассчитаны и построены:

1. Зависимость максимальной нагрузки:

$$I_{\text{с макс}}(\omega) = \sqrt{\left(\frac{M_{\text{с эм. макс}}(\omega)}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot \sqrt{2}} \right)^2} + I_0^2 =$$

$$= \sqrt{\left(\frac{104,8}{\frac{3}{2} \cdot \frac{0,063}{0,067} \cdot 3 \cdot 0,909 \cdot \sqrt{2}} \right)^2} + 10,56 = 21,9 \text{ А.} \quad (2.47)$$

где при $\omega \leq \omega_{\text{дв.н}} \quad \Psi_{2d} = \Psi_{2\text{н}}$;

2. Зависимость от скорости длительно допустимого тока электродвигателя

$$I_{1\phi \text{ длит. доп}}(\omega) = \begin{cases} I_{1\phi \text{ н}} \cdot \left[k + (1-k) \cdot \frac{2 \cdot \omega}{\omega_{\text{дв.н}}} \right] & \text{при } \omega \leq 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}; \\ I_{1\phi \text{ н}} & \text{при } \omega > 0,5 \cdot \omega_{\text{дв.н}}; \end{cases}$$

3. Номинального тока инвертора $I_{\text{и.н}} = 25 \text{ А};$

4. Максимального тока инвертора $I_{\text{и. макс}} = 30 \text{ А};$

5. Выбранного кратковременно допустимого (максимального) тока двигателя в пуско-тормозных режимах

$$I_{1\phi \text{ кратк. доп}}(\omega) \leq I_{\text{и. макс}}$$

или соответствующего значению выбранного выше кратковременно допустимого (максимального) электромагнитного момента двигателя $M_{\text{эм.кратк.доп}}(\omega)$

$$\begin{aligned}
 I_{1\text{ф.кратк.доп}}(\omega) = I_{\text{эл.макс}}(\omega) &= \sqrt{\left(\frac{M_{\text{эм.кратк.доп}}(\omega)}{\frac{3}{2} \cdot \frac{L_m}{L'_2} \cdot z_p \cdot \Psi_{2d} \cdot \sqrt{2}} \right)^2 + I_0^2} = \\
 &= \sqrt{\left(\frac{149,65}{\frac{3}{2} \cdot \frac{0,063}{0,067} \cdot 3 \cdot 0,909 \cdot \sqrt{2}} \right)^2 + 10,56} = 29,363 \text{ A.}
 \end{aligned} \tag{2.48}$$

Рисунок 6 – Механическая характеристика электропривода и нагрузки $\omega(M)$ при векторном управлении

Рисунок 7 – Электромеханическая характеристика электропривода $\omega(I_1)$ и нагрузки при векторном управлении

Анализ приведенных на рисунке 2.4 механической характеристики электропривода $\omega(M)$ и нагрузки $M(\omega)$ показывает, что во всем диапазоне регулирования скорости выполняются условия:

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

следовательно, двигатель по моменту выбран правильно.

По результатам построения электромеханических характеристик электропривода $\omega(I_1)$ (рисунок 2.5) во всем диапазоне регулирования скорости имеем:

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

что подтверждает правильность выбора двигателя по току.

На рисунке 2.5 в плоскости электромеханических характеристик построены характеристики, соответствующие номинальному и максимально допустимому току

преобразователя: $I_{и.н} = 25 \text{ А}$, $I_{и.макс} = 30 \text{ А}$. Из рисунка видно, что условие $I_{и.н.} \geq I_{с.макс}$ выполняется, следовательно преобразователь по току выбран правильно.

2.6 Выбор напряжения питающей сети асинхронного электропривода с векторным управлением

Поскольку жесткость статических характеристик разомкнутой системы преобразователь – двигатель оказывается меньше жесткости естественных характеристик двигателя, то, очевидно, что необходимо иметь некоторый запас по напряжению питающей сети для обеспечения требуемой максимальной рабочей скорости электропривода и его быстродействия.

Напряжение питающей сети выбираем из следующего условия:

– при скорости двигателя $\omega^* = \omega_{эп.макс}$ преобразователь должен обеспечивать ток $I_{1ф}^* \geq I_{с макс}$ (максимальное быстродействие электропривода достигается при выполнении условия $I_{1ф}^* \geq I_{1ф макс}$).

При выбранных значениях максимальной скорости ω^* и тока $I_{1ф}^*$ рассчитаны требуемые значения:

– составляющей тока I_{1q} двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат d, q :

$$I_{1q}^* = \sqrt{2} \cdot \sqrt{(I_{1ф}^*)^2 - I_0^2} = \sqrt{2} \cdot \sqrt{21,9^2 - 10,56^2} = 27,13 \text{ А}; \quad (2.49)$$

– частоты питающего напряжения:

$$\begin{aligned} f_1^* &= \frac{1}{2\pi} \cdot \left(\omega^* \cdot z_p + R_2' \cdot \frac{L_m}{L_2'} \cdot \frac{I_{1q}^*}{\Psi_{2н}} \right) = \\ &= \frac{1}{2\pi} \cdot \left(101,6 \cdot 3 + 0,328 \cdot \frac{0,063}{0,067} \cdot \frac{27,13}{0,909} \right) = 49,97 \text{ Гц}; \end{aligned} \quad (2.50)$$

– составляющей напряжения U_{1d} двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат d, q :

$$U_{1d}^* = \left(\frac{R_{1\varnothing}}{L_m} - R_2' \cdot \frac{L_m}{L_2'^2} \right) \cdot \Psi_{2H} - 2\pi \cdot f_1^* \cdot \sigma \cdot L_1 \cdot I_{1q}^*, B \quad (2.51)$$

$$U_{1d}^* = \left(\frac{0,632}{0,063} - 0,328 \cdot \frac{0,063}{0,067^2} \right) \cdot 0,909 - 2\pi \cdot 49,97 \cdot 0,096 \cdot 0,066 \cdot 27,13 = -49,52 B;$$

– составляющей напряжения U_{1q} двухфазной модели двигателя во вращающейся системе координат d, q :

$$U_{1q}^* = 2\pi \cdot f_1^* \cdot \frac{\sigma \cdot L_1}{L_m} \cdot \Psi_{2H} + \frac{L_m}{L_2'} \cdot \Psi_{2H} \cdot z_p \cdot \omega^* + R_{1\varnothing} \cdot I_{1q}^*, B \quad (2.52)$$

$$U_{1q}^* = 2\pi \cdot 49,97 \cdot \frac{0,096 \cdot 0,066}{0,063} \cdot 0,909 + \frac{0,063}{0,067} \cdot 0,909 \cdot 3 \cdot 101,6 + 0,632 \cdot 27,13 =$$

$$= 307,456 B;$$

– фазного напряжения трехфазного двигателя:

$$U_{1\phi}^* = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(U_{1d}^*)^2 + (U_{1q}^*)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(-49,52)^2 + (307,456)^2} = 220,2 B; \quad (2.53)$$

– напряжения звена постоянного тока преобразователя:

$$U_d^* = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_{1\phi}^* = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot 220,2 = 539,39 B; \quad (2.54)$$

– напряжения питающей сети:

$$U_c^* = \frac{U_d^*}{1,35} = \frac{539,39}{1,35} = 399,5 B. \quad (2.55)$$

2.7 Имитационная модель электрической части силового канала

Пример реализации имитационной модели следящего асинхронного электропривода с векторным управлением, учитывающий квантование сигналов обратных связей по уровню и времени и сигналов управления по времени, приведен на рисунке 2.6.

Имитационная модель асинхронного электропривода с векторным управлением состоит из следующих функциональных элементов:

– источник трехфазного переменного тока неограниченной мощности;

- реактор на стороне питающей сети;
- неуправляемый диодный выпрямитель;
- конденсатор в звене постоянного тока;
- инвертор напряжения на *IGBT* транзисторах;
- модели асинхронного двигателя;
- цепь разряда конденсатора, состоящая из тормозного резистора и транзисторного ключа.

Система управления электропривода реализована как многоконтурная система регулирования и включает в себя модели:

- контура регулирования тока I_{1d} с ПИ-регулятором;
- контура регулирования тока I_{1q} с ПИ-регулятором;
- контура регулирования скорости (рисунок 8) двигателя $\omega_{дв}$ с ПИ-регулятором;
- контура регулирования потокосцепления ротора (рисунок 2.8) Ψ_{2d} с ПИ-регулятором;
- преобразователей координат управляющих напряжений;
- формирователя регулируемых координат привода в общем случае с датчиками токов, потоков и скорости двигателя.

В данном случае принята модель двухфазного асинхронного двигателя во вращающейся системе координат d, q . Предполагается, что токи I_{1d} , I_{1q} и потокосцепление ротора Ψ_{2d} измеряются аналоговыми датчиками, а затем аналоговый сигнал оцифровывается с помощью АЦП. Скорость вращения двигателя может измеряться с помощью аналогового датчика скорости, установленного на валу двигателя, а положение исполнительного органа механизма – импульсным датчиком, установленным на выходном валу механизма.

Рисунок 8 – Имитационная модель электрической части силового канала системы преобразователь частоты-асинхронный электродвигатель

Рисунок 9 – Имитационная модель контура скорости с аналоговым датчиком и внутренним контуром тока I_{1q}

Рисунок 10 – Имитационная модель контура потокосцепления с внутренним контуром тока I_{1d}

Допустимое значение выходного сигнала регулятора потокосцепления ротора ограничивается на постоянном уровне

$$N_{\text{р}\Psi \text{ доп}} = N_{\text{зт. макс}} = 0,833.$$

2.9 Исследования имитационной модели электропривода подъема мостового крана с учетом крановой нагрузки

На рисунке 11 представлена модель электропривода механизма подъема в среде MATLAB SIMULINK.

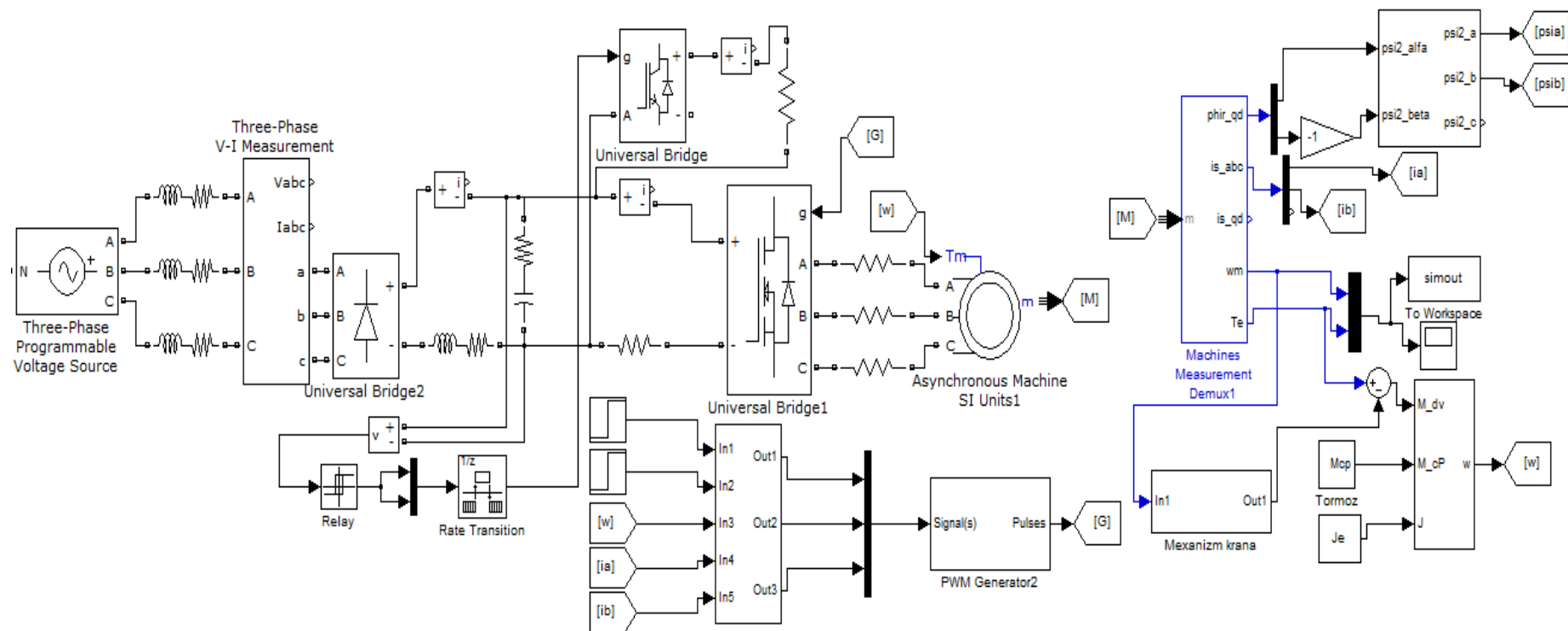


Рисунок 11 – Имитационная модель механизма подъема мостового крана

На рисунке 12 представлен пуск асинхронного двигателя без нагрузки на номинальную скорость $\omega_{\text{дв.ном}} = 101,5 \text{ рад/с}$, а затем наброс нагрузки в момент времени $t=0,5 \text{ сек}$ $M_{\text{нагр}} = 108 \text{ Нм}$. Из графиков видно пусковые параметры двигателя: $M_{\text{эп.макс}} = 149,5 \text{ Нм}$, $I_{\text{эп.макс}} = 29,3 \text{ А}$; параметры двигателя при работе без нагрузки на заданной скорости $\omega_{\text{зад}} = 101,5 \text{ рад/с}$ при $I_0 = 10 \text{ А}$ и параметры нагруженного двигателя. В момент нагрузки из графика видно что скорость незначительно уменьшается, но затем она достигает своего заданного значения $\omega_{\text{зад}} = 101,5 \text{ рад/с}$. При этом ток соответствует расчетному значению номинального тока двигателя $I_{\text{ф.ном}} = 23,3 \text{ А}$.

Данные переходные характеристики $\omega = f(t)$, $M = f(t)$ и $I = f(t)$ позволяют утверждать, что все три контура регулирования рассчитаны и настроены верно, т.к. на представленных графиках не наблюдается перерегулирований, превышающих допустимых значений, выполняется точная отработка задающих воздействий, а так же все значения скоростей, токов и моментов совпадают с расчетными.

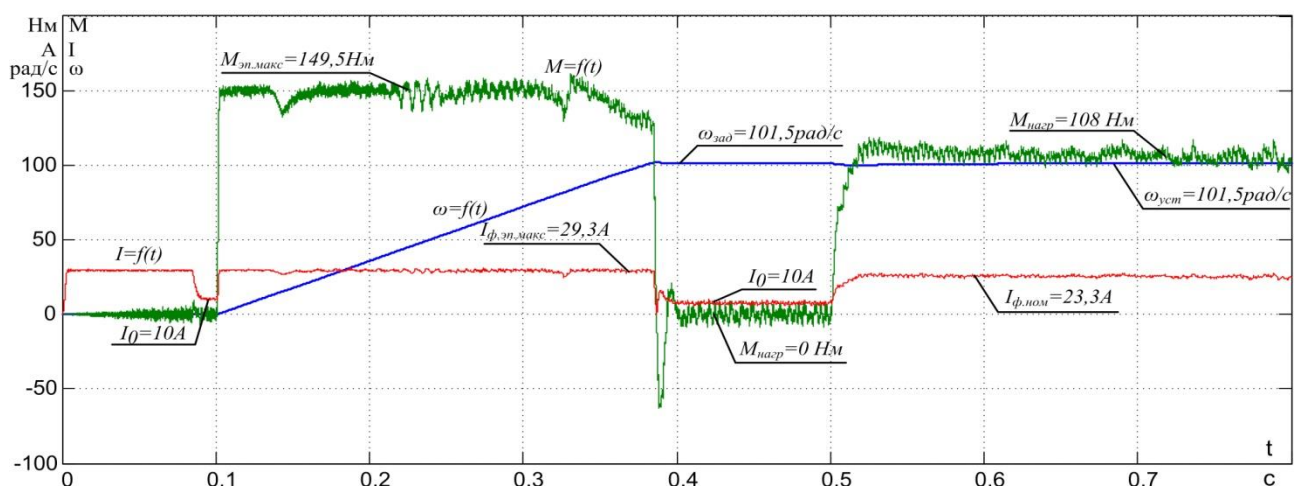


Рисунок 12 – Диаграммы электромагнитного момента $M_{\text{эм}}(t)$, скорости вращения $\omega(t)$ и фазного тока $i_{\text{ф}}(t)$ двигателя

На рисунке 4.2 представлены переходные характеристики скорости вращения ротора $\omega(t)$ двигателя при задании на скорость $\omega_{зад1}=101,5\text{ рад/с}$ и $\omega_{зад2}=1,01\text{ рад/с}$.

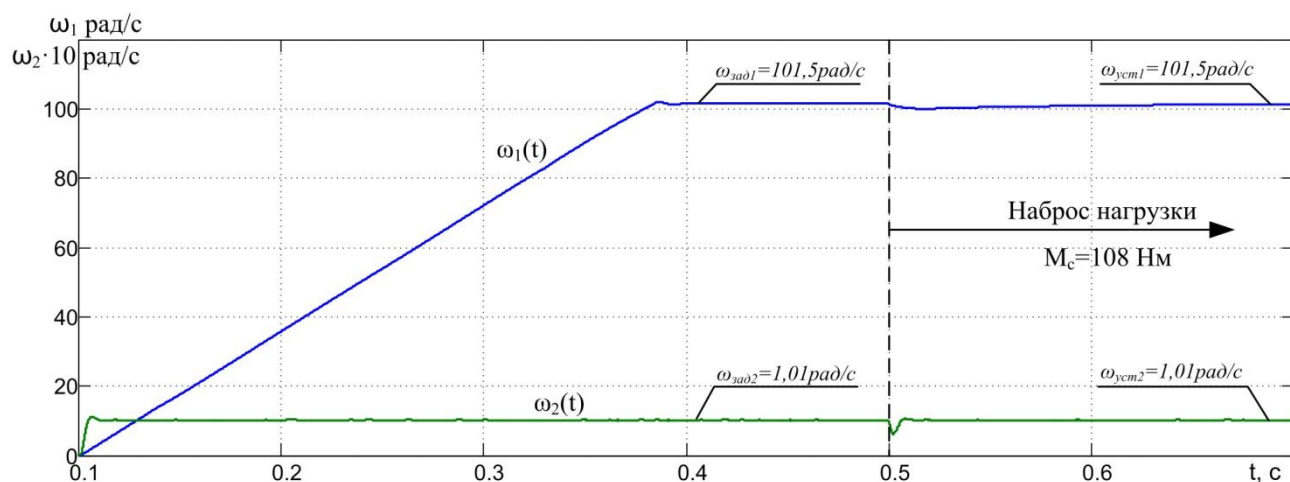


Рисунок 13 – Переходные характеристики скорости вращения ротора $\omega(t)$ двигателя при различных заданиях скорости

Из графика, представленного на рисунке 13, вычислим диапазон регулирования скорости:

$$D = \frac{\omega_{зад1}}{\omega_{зад2}} = \frac{101,5}{1,01} = 100,5.$$

Диапазон регулирования соответствует требованиям, заявленным в техническом задании.

В модель электропривода механизма подъема, помимо вышеперечисленных блоков, входит: модель тормозного устройства; модель системы управления электроприводом; модель механической системы с моментом нагрузки реактивного характера; модель механической части механизма подъема.

На рисунке 14 представлен пуск модели регулируемого асинхронного электропривода механизма подъема мостового крана с S– образным задатчиком скорости.

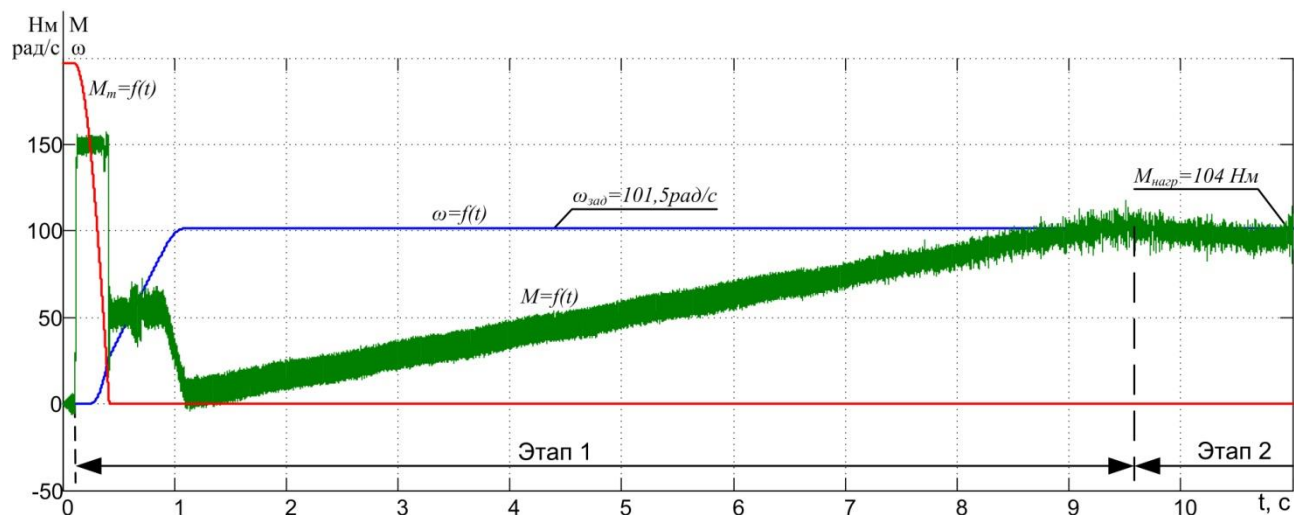


Рисунок 14 – Пуск АД и его работа под нагрузкой

В момент пуска скорость вращения вала двигателя остается неизменной и равна нулю. Разгону двигателя препятствует момент тормозного устройства $M_T = f(t)$, который со временем уменьшается. При превышении момента двигателя, момента тормозного устройства, двигатель начинает разгоняться и плавно выходит на скорость холостого хода.

Заключение

В ходе выполнения работы был выполнен обзор современного электропривода мостовых кранов и выявлены проблемы, которые присутствуют в крановом электроприводе.

В данной работе был рассмотрен и рассчитан частотно-регулируемый электропривод переменного тока. ЭП питается от 3х – фазной промышленной сети переменного тока с линейным напряжением 380 В частотой 50 Гц.

Произведен расчет системы управления электроприводами механизма.

С помощью имитационной модели, собранной в приложении Simulink программы MATLAB, была представлена работа мостового .

В экономической части выпускной квалификационной работы рассмотрены вопросы планирования, проведения пуско-наладочных работ электропривода мостового крана. Составлена смета на проведение ПНР и построен график выполнения пуско-наладочных работ и занятости исполнителей, а так же доказана экономическая целесообразность от внедрения спроектированного электропривода.

В разделе безопасности и экологичности проекта освещены вопросы: производственной безопасности; экологической безопасности; рассмотрены вероятные чрезвычайные ситуации при работе мостового крана.

