

На правах рукописи

Новожилов Никита Геннадьевич



**СТРУКТУРА И АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ
АСИНХРОННЫМ ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫМ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ ПРИ ПРОВАЛАХ НАПРЯЖЕНИЯ
В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ**

*Специальность 05.09.03 –
Электротехнические комплексы и системы*

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург - 2017

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

Научный руководитель:

доктор технических наук, старший научный сотрудник
Шонин Олег Борисович

Официальные оппоненты:

Ефимов Александр Андреевич

доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения», кафедра «Управление в технических системах», профессор

Воронцов Алексей Геннадьевич

кандидат технических наук, ООО «НПЦ СЭС», начальник отдела преобразовательной техники

Ведущая организация: ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)»

Защита состоится 31 мая 2017 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.224.07 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, г. Санкт-Петербург, 21-я линия, дом 2, ауд. № 1163.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Санкт-Петербургского горного университета и на сайте www.spmi.ru.

Автореферат разослан 31 марта 2017 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
диссертационного совета



ЗВОНАРЕВ
Иван Евгеньевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Особенностью частотно-регулируемого привода (ЧРП) является его высокая чувствительность к провалам напряжения питания, возникновение которых приводит к срабатыванию защиты минимального напряжения (ЗМН) и отключению двигателя во избежание опасных бросков, как зарядных токов конденсатора, так и пусковых токов двигателя при восстановлении питания. Для ЧРП общепромышленного применения на основе двухзвенного преобразователя частоты время срабатывания ЗМН составляет от 0,02 до 0,04 с., что на порядок меньше длительности кратковременных провалов.

Сохранение работоспособности привода во время провалов напряжения за счет использования дополнительных источников энергии требует экономического обоснования, учитывающего соотношение между ущербом от нарушения технологического процесса и затратами на установку дополнительного оборудования. В тех случаях, когда установка дополнительного оборудования не имеет достаточного экономического обоснования, целесообразно для повышения устойчивости привода к провалам напряжения использовать внутренние энергетические ресурсы привода. Для их реализации предлагается использовать алгоритмы управления двигателем в зоне ослабленного поля с целью сохранения режима приводного механизма в рамках пропускной способности преобразователей и алгоритмы управления процессом рекуперации запасенной кинетической энергии с целью поддержания напряжения звена постоянного тока на требуемом уровне и сохранения тем самым управляемости приводом. Основное достоинство такого способа преодоления провалов напряжения заключается в его реализации программными средствами за счет изменения структуры системы управления приводом без установки дополнительного оборудования в силовую часть преобразователя, что делает этот способ наименее затратным.

В связи с этим тему диссертационной работы, направленную на разработку алгоритмических методов повышения устойчивости привода к провалам напряжения, следует считать актуальной.

Степень разработанности исследуемого направления

Проблеме обеспечения работоспособности привода в условиях нестабильной сети посвящены исследования и разработки ведущих отечественных и зарубежных научных центров, университетов и фирм, таких как НИИПТ, ЦНИИСЭТ, СПбГЭТУ, ИГЭУ, ОАО «Силовые

машинь», *Siemens, Danfoss, Schneider Electric* и др. Большинство решений основано на совершенствовании схем самозапуска, использовании в электроприводе дополнительных накопительных элементов и преобразователей. В последнее время заметное внимание уделяется алгоритмическим методам, которые используют особенности электромеханических процессов в приводе при провалах напряжения сети. Исследованиям в данной области посвящены работы dr. J.Holtz (Bergische University Wuppertal), д.т.н. Виноградова А.Б. (ИГЭУ, каф. ЭиА), д.т.н. Косчинского С.В. (ПГУ, каф. ЭВТИБ), д.т.н. Шрейнера Р.Т. (УрФУ), к.т.н. Дементьева Ю.Н. (ТПУ, каф. ЭПЭО), ms Rajagopalan L.N. (University of Wollongong).

Цель работы

Обоснование и разработка программно-алгоритмических средств управления ЧРП при кратковременных провалах и прерываниях напряжения для сохранения рабочего режима приводного механизма технологического объекта с целью минимизации ущерба от аварий в сети электроснабжения.

Идея работы

Повышение устойчивости ЧРП к провалам напряжения сети достигается с помощью совокупности алгоритмических методов, которые в зависимости от уровня провалов питающего напряжения позволяют сохранить номинальный режим работы приводного механизма без изменения его производительности и/или сохранить управляемость приводом за счет рекуперации кинетической энергии и минимизировать тем самым длительность повторного пуска.

Основные задачи работы:

1. Разработка математической и компьютерной модели частотно-регулируемого привода для исследования режима его работы при различных видах провалов напряжения в сети.
2. Исследование процессов в приводе при работе двигателя в зоне ослабленного поля с целью выявления максимальной глубины провалов напряжения, которую допустимо скомпенсировать с помощью соответствующих алгоритмов управления в рамках существующих ограничений по напряжению и току.
3. Исследование способов и алгоритмов автоматического перезапуска привода, позволяющих минимизировать длительность повторного пуска и пусковые токи двигателя при восстановлении нормального режима работы сети.

4. Разработка структуры и алгоритмов скалярного частотного управления асинхронным электроприводом без датчика положения ротора в нормальном и аварийном режиме на основе переключаемой двухконтурной системы регулирования с возможностью рекуперации кинетической энергии, запасенной в приводе.

Методология и методы исследований

Решение поставленных в работе задач базируется на основных положениях мехатроники, автоматизированного электропривода, теоретических основ электротехники, силовой электроники, современных систем автоматического управления. Для решения задач используются средства компьютерного моделирования динамических систем *MatLab/Simulink* и вычислительные средства *MathCAD*.

Научная новизна:

1. Закономерности протекания электромеханических процессов при работе двигателя в области ослабленного поля, которые позволяют определить зоны устойчивости привода при его различной загруженности по мощности. Оценка предельных значений провалов напряжения, которые могут быть скомпенсированы за счет внутренних ресурсов привода и алгоритмы обеспечения требуемого режима приводного механизма в условиях провала напряжения и существующих ограничениях по току и напряжению.

2. Закономерности запаса и регенерации энергии в зависимости от типа двигателя, способа управления и свойств приводного механизма. Алгоритм рекуперации кинетической энергии и зависимость времени работы привода в режиме рекуперации кинетической энергии.

3. Система скалярного частотного управления асинхронным электроприводом переменной структуры без датчика положения ротора на базе принципа подчиненного регулирования, обеспечивающая эффективную работу привода в нормальном режиме и режиме рекуперации кинетической энергии путем замены внешнего контура регулирования скорости на контур регулирования напряжения звена постоянного тока.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и результатов основывается на использовании известных положений теоретической электромеханики, теории автоматизированного электропривода, методов моделирования с применением ЭВМ.

Практическая значимость работы:

1. Системы векторного управления частотно-регулируемого асинхронного электропривода, реализующей управление приводом в режиме ослабленного поля для обеспечения неизменности режимных параметров приводного механизма при возникновении провалов напряжения в сети питания.

2. Зависимости минимально-допустимого значения напряжения звена постоянного тока от параметров привода, при котором достигается неизменность режимных параметров приводного механизма при реализации режима ослабленного поля.

3. Система скалярного управления асинхронным электроприводом без датчика скорости вращения, основанная на косвенном измерении скорости вращения ротора двигателя по линеаризованной зависимости частоты скольжения от активной составляющей тока статора и реализующая управление приводом в режиме рекуперации кинетической энергии для сохранения работоспособности привода при провале напряжения или перерыве электропитания.

4. Зависимости времени работы привода в режиме рекуперации кинетической энергии от параметров привода, которая используется для оценки максимального времени, в течение которого возможно сохранение заданного значения напряжения звена постоянного тока.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на международном форуме-конкурсе молодых ученых «Проблемы недропользования», 2014 г.; научно-практической конференции с международным участием «Неделя науки СПбПУ», 2014 г.; международной научно-практической конференция «Энергоэффективность энергетического оборудования», 2015 г.; 2-м международном научно-техническом семинаре «Современные разработки в области электроснабжения и электропривода», 2015 г.; международной научно-технической конференция «Пром-Инжиниринг», 2016 г.; 10-й международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения», 2016 г.; 2-й всероссийской молодежной научно-практической конференции «Введение в энергетiku»; конференции молодых исследователей в области электротехники и электроники: *ElConRus*, 2017 г.; международной научно-технической конференции «Инновации и

перспективы развития горного машиностроения и электромеханики: *IPDME-2017*», 2017 г.

Результаты реализации работы

Результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований приняты к использованию для разработки методов и средств повышения надежности работы технологического электрооборудования при кратковременных провалах напряжения в сети электропитания на предприятии ООО ПО «Киниф».

Личный вклад автора:

1. Разработана имитационная компьютерная модель частотно-регулируемого электропривода с векторной системой управления в среде *Simulink/MatLab* для исследования работы привода в области ослабленного поля.

2. Получена зависимость минимально-допустимого значения напряжения звена постоянного тока от параметров привода, при котором достигается неизменность режимных параметров приводного механизма при реализации режима ослабленного поля.

3. Разработана имитационная компьютерная модель частотно-регулируемого электропривода с бездатчиковой системой скалярного управления, реализующая алгоритм управления приводом в режиме рекуперации кинетической энергии механизма в среде *Simulink/MatLab*.

4. Получена зависимость времени работы привода в режиме рекуперации кинетической энергии от параметров привода, которая используется для оценки максимального времени, в течение которого возможно сохранение заданного значения напряжения звена постоянного тока.

Публикации: По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, в том числе 5 работ в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 103 наименований, содержит 83 рисунка, 4 таблицы и 3 приложения. Общий объем 200 страниц.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, идея работы, научная ценность и задачи исследования.

В первой главе дан анализ современных средств повышения устойчивости привода в условиях нестабильной сети электроснабжения.

Во второй главе рассматривается статистика провалов напряжения в сети электроснабжения предприятия ООО «Кинэф». Представлена имитационная модель электрической сети, на базе которой выявлены наиболее характерные типы провалов напряжения в сети 0,4 кВ и их связь с различными типами коротких замыканий (КЗ) на участках сети с разными уровнями напряжения. Рассмотрено влияние наиболее характерных типов провалов напряжения на изменение напряжения звена постоянного тока частотного преобразователя.

В третьей главе проведен анализ особенностей формирования рабочих областей привода в области ослабленного поля при провалах напряжения и закономерности изменения областей при варьировании скорости вращения ротора и момента сопротивления приводного механизма.

В четвертой главе рассматривается построение алгоритмов и предложенной системы управления приводом в режиме ослабленного поля, при возникновении провалов напряжения в сети. Приводятся результаты компьютерного моделирования работы привода при различном уровне остаточного напряжения в сети и различной загруженности привода.

В пятой главе представлена имитационная модель электропривода с бездатчиковой скалярной системой управления для исследования работы привода в режиме рекуперации кинетической энергии. Приводятся результаты моделирования работы привода при пропадании питания. Представлены результаты оценки максимальной длительности работы привода в режиме рекуперации для механизмов с различной зависимостью момента сопротивления от частоты вращения.

В заключении отражены выводы и рекомендации по результатам исследований.

ЗАЩИЩАЕМЫЕ НАУЧНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1. Сохранение режима приводного механизма при провалах напряжения в сети достигается управлением приводом в области ослабленного поля на основе разработанного алгоритма, учитывающего зависимость минимально допустимого напряжения от параметров привода. Формирование требуемой рабочей точки привода происходит при одновременном регулировании d - и q -компонент тока статора по законам, зависящих от соотношения между требуемым моментом и характеристическим моментом – параметром привода в области ослабленного поля, введенным в рассмотрение

для выделения области ослабленного поля при относительно малых провалах напряжения и области, соответствующей более глубоким провалам.

Результаты анализа статистических данных по провалам напряжения в узлах нагрузки системы электроснабжения ООО «КИНЕФ» и результаты моделирования коротких замыканий разных видов в электрической сети с разными уровнями напряжения позволили выявить основные типы провалов напряжения на входе ЧРП и установить их влияние на напряжение звена постоянного тока (ЗПТ). Показано, что для сохранения работоспособности привода при кратковременных провалах напряжения длительностью порядка 1 с. и глубиной от 10 до 40 % целесообразно использовать управление приводом в зоне ослабленного поля; при более глубоких провалах - управление приводом в режиме рекуперации кинетической энергии для поддержания напряжения ЗПТ на требуемом уровне.

Преодоление провалов напряжения путем управления приводом в зоне ослабленного поля рассматривалось на примере ЧРП с векторной системой управления. Оценка возможностей сохранения требуемого момента путем регулирования i_d , i_q компонент тока статора в зоне ослабленного поля производится на основе анализа влияния провалов напряжения на изменение рабочей области привода с учетом ограничений по напряжению и току. Границы рабочей области в dq – системе координат задаются уравнениями системы (1), первое из которых описывает окружность максимального тока $I_{smax}=const$, А, третья – гиперболу постоянного момента $M_e=const$, Н·м, второе - эллипс максимального значения амплитуды 1-ой гармоники напряжения статора $U_{mlh}^{(max)}=const$, В, которая при синусоидальной модуляции связана с напряжением ЗПТ соотношением $U_{mlh}^{(max)}=U_{dc}/2$.

$$\begin{cases} i_{sd}^2 + i_{sq}^2 = I_{smax}^2 \\ Ai_{sd}^2 + Bi_{sd}i_{sq} + Ci_{sq}^2 = U_{dc}^2/4, \\ i_{sd}i_{sq} = \frac{M_e}{1,5z_p L_m^2/L_r} \end{cases} \quad (1)$$

где i_{sd}, i_{sq} - проекции обобщенного вектора тока статора на оси dq - системы координат, А; U_{dc} - среднее значение напряжения ЗПТ, В; z_p - число пар полюсов; L_m - взаимная индуктивность обмоток двигателя, Гн; L_r - индуктивность обмотки ротора, Гн; A, B, C - коэффициенты уравнения, Ом².

В системе уравнений (1) коэффициенты второго уравнения рассчитываются по формулам:

$$A = R_s^2 + \omega_s^2 L_s^2, \quad B = 2R_s \omega_s L_s (1 - \sigma), \quad C = R_s^2 + \omega_s^2 L_s^2 \sigma^2,$$

где R_s - активное сопротивление обмотки статора, Ом; ω_s - частота тока статора, рад/с; L_s - индуктивность обмотки статора, Гн; σ - коэффициент рассеяния.

Здесь использованы обозначения, принятые при описании асинхронного двигателя (АД) с векторной системой управления по закону неизменности базового вектора потокосцепления ротора.

Ограничение по току связано с пропускной способностью полупроводников преобразователей и принимается в диапазоне от 150 до 200 % от номинального значения тока статора.

Первое и второе уравнение вытекает из выражения для модуля обобщенного вектора через его проекции на оси dq - системы координат. Для получения второго уравнения дополнительно используется выражение для dq - компонент напряжения статора через соответствующие компоненты тока

$$u_{sd}^2 + u_{sq}^2 = (R_s i_{sd} - \omega_s L_s \sigma i_{sq})^2 + (\omega_s L_s i_{sd} + i_{sq} R_s)^2 = U_{dc}^2 / 4. \quad (2)$$

Большая ось эллипса наклонена относительно оси q на угол γ , эл.гр.:

$$\gamma = 0,5 \arctg B / (A - C). \quad (3)$$

Анализ уравнения (2) показывает, что увеличение частоты тока приводит к сужению рабочей области и уменьшению угла наклона γ , провалы напряжения также вызывают уменьшение рабочей области, но не влияют на угол наклона (рисунок 1). Динамику изменения границы рабочей области по напряжению вследствие указанных причин необходимо учитывать при разработке алгоритма управления приводом в области ослабленного поля.

В системах векторного управления асинхронным приводом наиболее распространено регулирование по закону

$\psi_r^{(\text{ном})} = L_m \cdot i_{sd}^{(\text{ном})} = \text{const}$, Вб. При таком управлении изменение электромагнитного момента осуществляется изменением компоненты i_{sq} , что при снижении напряжения $U_{dc}^{(\text{ном})} \rightarrow U_{dc1}$ и неизменном потокоцеплении ротора приводит снижению электромагнитного момента (рисунок 2а). Для его сохранения необходимо изменить обе компоненты до значений $i_{sd}^{(B)}, i_{sq}^{(B)}$ (рисунок 2б). При более глубоком провале кривая границы по напряжению $U_{dc2} < U_{dc1}$ и кривая момента M_e не будут иметь общих точек, и сохранение заданного режима становится невозможным. Задача состоит в определении минимального значения напряжения ЗПТ $U_{dcmin}^{(\text{он})}$, В, при котором удастся обеспечить требуемый момент при заданном ограничении по току. Для распознавания предельных режимов, предопределяющих тот или иной алгоритм работы системы автоматического управления (САУ), введем понятие характеристического электромагнитного момента $M_{\text{хар}}$, Н·м, кривая которого $i_{sq} = f(i_{sd}, M_{\text{хар}})$ касается кривой ограничения по напряжению $U_{dcmin}^{(\text{хар})}$ в точке ее пересечения Γ с окружностью максимального тока (рисунок 3).

Решение системы уравнений для рассматриваемого случая дает формулу для характеристического момента

$$M_{\text{хар}} = \frac{I_{smax}^2 \cdot \sqrt{\left(I + a_{1r}^2 \cdot b_{1r}^{-2} \cdot \text{tg}^2 \gamma\right) \cdot \left(a_{1r}^2 \cdot b_{1r}^{-2} + \text{tg}^2 \gamma\right)}}{c \cdot \left(I + a_{1r}^2 \cdot b_{1r}^{-2} \cdot \text{tg}^2 \gamma + a_{1r}^2 \cdot b_{1r}^{-2} + \text{tg}^2 \gamma\right)}, \quad (4)$$

$$\text{где } a_{1r} = \sqrt{2} \cdot \left(A + C - \sqrt{(A - C)^2 + B^2}\right)^{-0,5},$$

$$b_{1r} = \sqrt{2} \cdot \left(A + C + \sqrt{(A - C)^2 + B^2}\right)^{-0,5}, \quad c = \left(1,5 \cdot z_p \frac{L_m}{L_r}\right)^{-1}.$$

Координаты критической точки характеристического режима

$$i_{sd}^{\text{хар}} = \sqrt[4]{\frac{I + \frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} \text{tg}^2 \gamma}{\frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} + \text{tg}^2 \gamma}} \cdot c^2 \cdot M_{\text{хар}}^2, \quad i_{sq}^{\text{хар}} = \sqrt[4]{\frac{\frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} + \text{tg}^2 \gamma}{I + \frac{a_{1r}^2}{b_{1r}^2} \text{tg}^2 \gamma}} \cdot c^2 \cdot M_{\text{хар}}^2. \quad (5)$$

Минимальное напряжение $U_{dсmin}^{(хар)}$ вычисляется по 2-ому уравнению системы (1), в которое подставляются координаты критической точки (5).

Выделим наиболее характерные случаи предельных режимов привода, соответствующие разным решениям системы уравнений, которые отличаются взаимным расположением кривых ограничения по току, напряжению и кривой электромагнитного момента. Первая рабочая область ослабленного поля, определяемая из условия превышения требуемого электромагнитного момента характеристического значения $M > M_{хар}$, соответствует относительно малым провалам напряжения. Координаты точки предельного режима в этой области определяются как координаты точки пресечения кривой заданного электромагнитного момента и границы рабочей области по току.

$$i_{sdI}^{np} = \sqrt{\frac{I_{smax}^2 - \sqrt{I_{smax}^4 - 4(c \cdot M)^2}}{2}}, \quad i_{sqI}^{np} = \sqrt{\frac{I_{smax}^2 + \sqrt{I_{smax}^4 - 4(c \cdot M)^2}}{2}}. \quad (6)$$

Минимально допустимое напряжение ЗПТ из условия обеспечения требуемого момента M определяется по формуле:

$$U_{dсmin}^{(опл)} = 2 \cdot \sqrt{A \cdot i_{sdI}^{np2} + B \cdot i_{sdI}^{np} \cdot i_{sqI}^{np} + C \cdot i_{sqI}^{np2}}. \quad (7)$$

Вторая область ослабленного поля, определяемая из условия $M < M_{хар}$, описывает более глубокие провалы напряжений. Точка предельного режима в этой области определяется как точка касания кривой заданного момента $M = const$ и кривой границы по напряжению. Расчет рабочей точки производится по формуле (5), в которой вместо характеристического момента $M_{хар}$ используется текущее значение момента M .

Полученные результаты использованы для построения итерационного алгоритма поиска координат требуемой рабочей точки в области ослабленного поля. Структурная схема системы управления привода в *MatLab/Simulink* показана на рисунке 4, структура блока формирования задания для проекций тока статора на рисунке 5. Переход в режим ослабленного поля происходит в том случае, если рассчитанное значение проекции i_{sd} будет меньше номинального значения $i_{sd}^{ном}$. Для формирования задания $i_{sq}^{(зад)}$ используются два

вычислительных блока, один из которых определяет компоненту тока $i_{sq}^{(M)}$ через задание по электромагнитному моменту $M_{зад}$ и текущее значение компоненты i_{sd} в соответствии с третьим уравнением системы (1). Другой блок вычисляет компоненту тока $i_{sq}^{(I)}$ по текущему значению компоненты i_{sd} в соответствии с первым уравнением этой системы. Значение i_{sd} рассчитывается по текущему сигналу наблюдателя потокоцепления ротора Ψ_r (рисунок 4) в соответствии с формулой: $i_{sd} = \Psi_r \cdot L_m^{-1}$. В качестве задания $i_{sq}^{(зад)}$ выбирается минимальное значение из двух рассчитанных величин. Формирование задания по потокообразующей компоненте тока статора $i_{sd}^{(зад)}$ происходит в результате сравнения расчетной величины $i_{sd}^{(U)}$ и номинального значения $i_{sd}^{(ном)}$. Величина $i_{sd}^{(U)}$ находится из второго уравнения системы (1) по известному напряжению ЗПТ U_{dc} , частоте тока статора ω_s и заданию по компоненте $i_{sq}^{(зад)}$, ответственной за электромагнитный момент. В качестве задания $i_{sd}^{(зад)}$ выбирается минимальное значение их двух величин.

Из анализа результатов моделирования (рисунок 6) следует, что управление приводом на базе двигателя ВАСО-37-14 ($P_{ном}=37$ кВт, $U_n=380$ В, $U_{dc}=537$ В, $z_p=7$, $M_{ном}=850$ Н·м, $M_{хар}=642$ Н·м) в режиме ослабленного поля при снижении напряжения до 80 % от номинального значения обеспечивает требуемый момент. При снижении напряжения до 70 % имеет место отклонение частоты вращения ротора на $\Delta\omega=6$ % и отклонение момента на $\Delta M_e=11$ %. Заметим, что при использовании традиционной системы управления отклонения от требуемого режима в четыре раза больше и составляют $\Delta\omega=25$ % и $\Delta M_e=43$ %, соответственно. Поведение осциллограмм иллюстрируется изменением рабочей точки при провалах напряжения (рисунок 7). Отклонение от требуемого режима на 11 % по скорости при глубине провала 30 % объясняется ограничением по току при перемещении точки Б в точку В. Показано, что при неполной загрузке привода сохранение режима привода возможно при более глубоких провалах. Результаты

моделирования подтверждают работоспособность предложенного алгоритма.

2. Минимизация времени повторного пуска асинхронного привода со скалярной системой управления и наблюдателем скорости вращения достигается реконfigurацией двухконтурной системы подчиненного регулирования для осуществления электрической рекуперации кинетической энергии с целью поддержания напряжения ЗПТ на требуемом уровне. Оценка эффективного времени рекуперации производится на основе предложенной модели выбега двигателя с учетом тормозного электромагнитного момента, параметров ЗПТ и приводного механизма. Кратное превышение максимального времени рекуперации по отношению к среднестатистической длительности провалов напряжения позволяет говорить о рекуперации кинетической энергии как эффективном методе преодоления приводом провалов напряжения.

В случае глубокого снижения напряжения и невозможности сохранения требуемого электромагнитного момента за счет управления приводом в режиме ослабленного поля важно сохранить управляемость приводом и безаварийно осуществить повторный пуск после восстановления напряжения в сети. Чтобы избежать проблем, связанных с повторным пуском выбегающего или остановленного двигателя, целесообразно поддерживать напряжение конденсатора во время провалов на требуемом уровне за счет электрической рекуперации кинетической энергии привода, сохранив тем самым питание системы управления, которая обеспечивает синхронизацию выходного напряжения инвертора с электромеханическими процессами в двигателе. В свете современных тенденций развития ЧРП приводов без датчиков скорости, в работе предложена двухконтурная система скалярного частотного управления асинхронным приводом с наблюдателем скорости вращения ротора и IR -компенсацией, в которой в случае провала напряжения внешний контур регулирования заменяется контуром стабилизации напряжения ЗПТ (рисунок 8).

Наблюдатель скорости вращения ω , рад/с, строится на использовании линеаризованной зависимости активной составляющей тока статора от частоты скольжения $I_{sa} = k_a \omega_r$:

$$\omega = (\omega_s - k_\omega I_{sa}) / z_p, \quad k_\omega = I / k_a = \omega_r^{\text{НОМ}} / I_{sa}^{\text{НОМ}} \quad (8)$$

где $\omega_r^{\text{НОМ}}$ - номинальные значения частоты тока ротора, рад/с; $I_{sa}^{\text{НОМ}}$ - номинальное значение активной составляющей тока статора, А;

Активная составляющая тока определялась в соответствии с векторной диаграммой, в которой в качестве базового вектора использован обобщенный вектор напряжения статора (рисунок 9). Результаты компьютерного моделирования показали, что точность косвенного измерения скорости вращения ротора не хуже 1 % в диапазоне ее регулирования 1:10.

Компьютерная модель, построенная в среде MatLab/Simulink, использовалась для исследования предложенной структуры привода в нормальном режиме, режиме свободного выбега и режиме рекуперации кинетической энергии при различных видах механической нагрузки.

Исследования свободного выбега двигателя при варьированной нагрузке привода позволили уточнить формулу для расчета кривой разряда конденсатора, основанную на уравнении баланса энергии, которую принято использовать для выбора удельной емкости конденсатора $\hat{C} = C/P$, мкФ/кВт, на основе заданных параметров вольт-секундной характеристики реле минимального напряжения. Как следует из рисунка 10, кривую разряда можно аппроксимировать линейной функцией, угловой коэффициент которой прямо пропорционален мощности привода до его отключения. Кусочно-линейной функции разряда соответствует примерно постоянному значению разрядного тока на входе инвертора $I_{вх}$, А, которое определяется по предшествующему режиму работы привода. Это позволяет предложить модель разряда в виде:

$$U_{dc}(t) = U_{dc}^{(\text{НОМ})} - I_{вх} \cdot t / C, \quad I_{вх} = 3mI_{sam} / (4 \cdot C), \quad I_{sam} = I_{sm}^{(\text{НОМ})} \cos \varphi \quad (9)$$

Здесь m – коэффициент модуляции ШИМ инвертора; φ – угол сдвига фаз между основными гармониками напряжения и тока двигателя, эл.гр.; I_{sam} – амплитуда активной составляющей номинального тока $I_{sm}^{(\text{НОМ})}$, А; C – ёмкость конденсаторной батареи, мкФ; t – время, с.

Сравнение результатов расчета времени срабатывания ЗМН из условия $U_{dc}(T_{з\text{МН}}) = U_{з\text{МН}}$ с результатами компьютерного моделирования привода показало, что ошибка оценки времени $T_{з\text{МН}}$, с., по предложенной формуле (2) не превышает 6 %, в то время как ошибка оценки по известной формуле оказывается выше и возрастает с

уменьшением мощности нагрузки, достигая 70 % при скорости $\omega = 0,3 \cdot \omega_{\text{ном}}$.

Результаты исследования привода в режиме рекуперации представлены на рисунках 11, 12. Переход в режим рекуперации (рисунок 11) сопровождается уменьшением электромагнитного момента до нулевого значения, изменением знака и последующим возрастанием в связи с необходимостью компенсации потерь энергии в сопротивлении статора. Активная составляющая тока статора и входной ток инвертора изменяются аналогичным образом. Изменение знака этих величин соответствует переходу привода от двигательного режима к генераторному режиму работы.

Особенностью работы привода в режиме рекуперации является отличие формы входного тока инвертора в нормальном режиме (рисунок 12А) от формы тока в режиме рекуперации (рисунок 12Б). Для режима рекуперации характерна симметрия относительно оси времени, а также равенство длительности и проводящего состояний обратного диода λ и длительности проводящего состояния транзисторов моста инвертора, что примерно соответствует предельному режиму работы инвертора. Токи двигателя в режиме рекуперации носят реактивный характер. Амплитуда тока равна амплитуде реактивного тока статора в нормальном режиме до перехода привода в режим рекуперации.

Приведенные кривые показывают, что при провале напряжения сети синхронизация преобразователя и двигателя не прерывается. Это позволяет осуществить контролируемый повторный пуск выбегающего двигателя с известной скоростью в момент восстановления напряжения сети.

Режим рекуперации кинетической энергии является эффективным решением проблемы сохранения управляемости приводом при глубоких провалах напряжения и перерывах электропитания в том случае, если максимально возможная длительность работы привода $T_{\text{рек}}$, с., в этом режиме будет больше длительности существования аварийного режима в сети.

Оценка максимального времени работы привода в режиме рекуперации производилась по данным компьютерного эксперимента, воспроизведившего провал напряжения глубиной 100 % и длительностью до полного выбега двигателя. Дополнительно в состав

компьютерной модели введен блок вычисления реактивной составляющей тока статора $i_{sp} = i_p \cos\theta - i_a \sin\theta$.

Результаты моделирования представлены на рисунке 13. В установившемся режиме напряжение U_{dc} поддерживается на номинальном уровне, активная составляющая тока статора и электромагнитный момент двигателя находятся в области отрицательных значений, что соответствует тормозному режиму двигателя. Из графиков следует, что эффективную длительность работы привода в режиме рекуперации целесообразно определять по уровню снижения скорости вращения до 10 % от начального значения $\omega(T_{рек}) = 0,1\omega_0$.

Определим максимальную длительность рекуперации аналитически на основе уравнений баланса моментов – момента инерции M_J , момента сопротивления M_c и электромагнитного момента $M_e^{рек}$, возникающего из-за необходимости компенсировать потери энергии ΔP_s , Вт, на активном сопротивлении статора. В работе показано, что электромагнитный момент может быть определен в виде:

$$M_e^{рек} = -\Delta P_s / \omega, \quad \Delta P_s = 3I_{sp}^2 R_s = const, \quad (10)$$

где I_{sp} - действующее значение реактивной составляющей тока статора, А.

Для привода с вентиляторной нагрузкой уравнение выбега двигателя в режиме рекуперации имеет вид:

$$-\frac{\Delta P_s}{\omega} - k_M \cdot \omega^2 = J \frac{d\omega}{dt}, \quad \omega(0) = \omega_0, \quad k_M = M_c^{ном} / \omega_{ном}^2, \quad (11)$$

где J – момент инерции привода, кг·м².

Результаты расчета скорости двигателя в режиме рекуперации по формуле (12) показаны на рисунке 14, на котором также представлены кривые свободного выбега и выбега в режиме рекуперации в предположении неизменности электромагнитного момента. Кривые выбега для других видов приводных механизмов здесь не приводятся. Из поведения кривых следует, что расчет выбега по предложенной модели (кривая 3), практически полностью совпадает с результатами моделирования, которые выделены точками (кривая 4). Это позволяет утверждать, что предложенная модель адекватно отражает процессы в выбегающем двигателе и может быть рекомендована для оценки максимального времени работы привода в режиме рекуперации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе дано научно-техническое решение важной задачи обеспечения работоспособности частотно-регулируемого привода при провалах напряжения в сети электроснабжения.

Основные научные и практические выводы и рекомендации заключаются в следующем:

1. На основе анализа статистики отказов в системе электроснабжения ООО «КИНЕФ» и результатов компьютерного моделирования аварийных процессов в электрической сети выявлены основные типы провалов напряжения на входе ЧРП. Установлено соответствие между параметрами провалов и параметрами вольт-секундной характеристики реле минимального напряжения, предопределяющее выбор одного из предложенных способов преодоления провалов - на основе управления приводом в зоне ослабленного поля и/или на основе рекуперации кинетической энергии для сохранения управляемости приводом при более глубоких провалах напряжения.

2. Выявлены закономерности формирования рабочей области в условиях ограничения по напряжению и току в зависимости от соотношения между требуемым моментом и характеристическим моментом - параметром, введенным в рассмотрение для выделения областей ослабленного поля при относительно малых провалах напряжения и при более глубоких провалах. На базе полученных соотношений разработан алгоритм управления приводом в зоне ослабленного поля.

3. На базе компьютерной модели привода показано преимущество предложенного алгоритма по сравнению с традиционным алгоритмом векторного управления по преодолению провалов напряжения глубиной до 30 %. При наличии устройства ограничения зарядных токов и частичной загрузке привода возможна работа с предложенной системой управления при снижении напряжения ЗПТ ниже уставки срабатывания ЗМН.

4. Разработана структура системы скалярного частотного управления асинхронным электроприводом с наблюдателем скорости вращения. Показано, что ошибка определения скорости вращения, разработанного наблюдателя не превышает 1 % в диапазоне регулирования 1:10. Точность разработанного наблюдателя сопоставима с современными системами векторного управления.

5. Предложена формула для определения времени разряда конденсатора, которая дает точность оценки не хуже 6 % против значений

от 20 до 50 % по известной формуле, полученной на основе уравнения баланса энергии.

6. Предложена модель выбега двигателя в режиме рекуперации кинетической энергии, которая позволяет производить оценку эффективного времени рекуперации по 10 %-ому уровню остаточной скорости относительно начального значения.

7. Показано, что типичные значения эффективного времени рекуперации намного превышает характерную длительность провалов напряжения, что позволяет говорить о режиме рекуперации как эффективном способе преодоления провалов напряжения.

8. Полученные в работе результаты могут быть использованы при проектировании новых или модернизации существующих типов ЧРП с целью обеспечения работоспособности приводов и сохранения непрерывности технологических процессов в условиях нестабильных сетей.

Основные результаты диссертации представлены в следующих печатных работах:

1. Новожилов, Н.Г. Наблюдатель частоты вращения ротора в скалярной системе управления асинхронного электропривода / Н.Г. Новожилов, О.Б. Шонин, С.Б. Крыльцов // Электротехнические системы и комплексы.- 2016. - №2(31) - С. 15-19.

2. Новожилов, Н.Г. Повышение устойчивости асинхронного электропривода с бездатчиковой скалярной системой управления при провалах напряжения сети / Н.Г. Новожилов, О.Б. Шонин, С.Б. Крыльцов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. - 2016. - В.11, Ч.2. - С. 507-520.

3. Новожилов, Н.Г. Определение параметров кривой устойчивости частотно-регулируемого привода при провалах напряжения в сети / Н.Г. Новожилов, О.Б. Шонин, С.Б. Крыльцов // Труды Крыловского государственного научного центра. - 2017. - 1(379) – С. 120-127.

4. Novozhilov, N.G. Assessment of duration of the drive operation in the mode of kinetic energy recovery under power supply voltage sags in electrical grids of mechanical engineering enterprises / N.G. Novozhilov, O.B. Shonin// IOP: Materials Science and Engineering.- 2017. - V.177 – P. 1-6.URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/177/1/012142/pdf> (дата обращения: 19.03.17).

5. Novozhilov, N.G. Digital algorithm for fast detecting and identifying the asymmetry of voltages in three-phase electric grids of mechan-

ical engineering facilities / N.G. Novozhilov, O.B. Shonin, S.B. Kryltcov // IOP: Materials Science and Engineering. - 2017. - V.177 – P. 1-6. URL: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/177/1/012011/pdf> (дата обращения: 19.03.17).

6. Свидетельство №2016617881 Российская Федерация. Программа вычисления обобщенных симметричных составляющих трёхфазной системы напряжений в реальном масштабе времени: свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ/ Н.Г. Новожилов, О.Б. Шонин, С.Б. Крыльцов; правообладатель: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет» - 2016615244; заявл. 24.05.2016; регистр.15.07.2016 – 1 с.

7. Новожилов, Н.Г. Обеспечение бесперебойной работы частотно-регулируемого электропривода технологической установки при провалах напряжения за счет рекуперации кинетической энергии./ О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов // Сборник научных трудов международного форума-конкурса молодых ученых «Проблемы недропользования». – СПб, 2014. – Ч.2. – С. 236.

8. Новожилов, Н.Г. Кинетическая поддержка частотно-регулируемого привода со скалярной системой управления при провалах напряжения сети./ О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов, В.С. Пронько // Материалы научно-практической конференции с международным участием. Институт энергетики и транспортных систем СПбПУ. – СПб, 2015. – Ч.1. – С. 264-267.

9. Новожилов, Н.Г. Сравнительный расчет ёмкости конденсатора звена постоянного тока частотного преобразователя./ Н.Г. Новожилов // Научно-практический журнал Современная наука и практика// г. Санкт-Петербург, 2015г. №1(1) - С. 20-24.

10. Новожилов, Н.Г. Сохранение работоспособности асинхронного частотно-регулируемого привода при провалах напряжения./ О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов // Сборник трудов международной научно-практической конференции «Энергоэффективность энергетического оборудования». - СПб, 2015. - Ч.2. – С. 177.

11. Новожилов, Н.Г. Оценка устойчивости частотно-регулируемого привода при провалах напряжения в сети/ О.Б. Шонин, Н.Г. Новожилов // Сборник трудов 2-й всероссийской молодежной научно-практической конференции «ВВЕДЕНИЕ В ЭНЕРГЕТИКУ». - Кемерово, 2016. – С. 155-160.

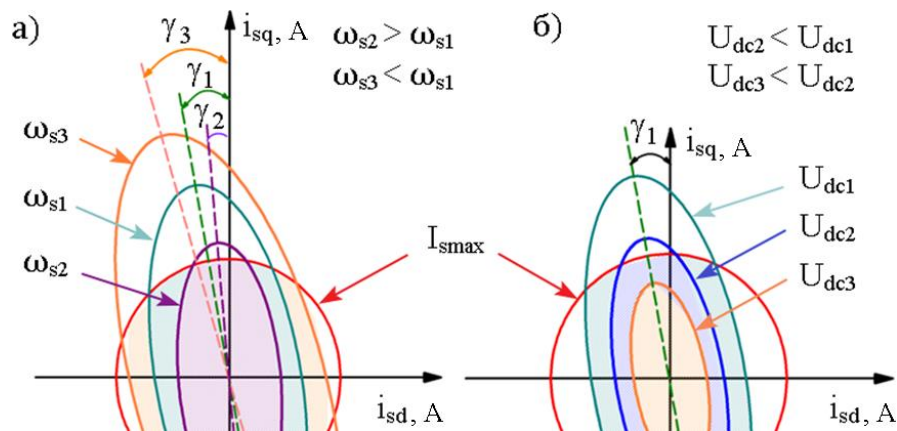


Рисунок 1 - Влияние синхронной частоты – а) и напряжения ЗПТ – б) на границу рабочей области по напряжению

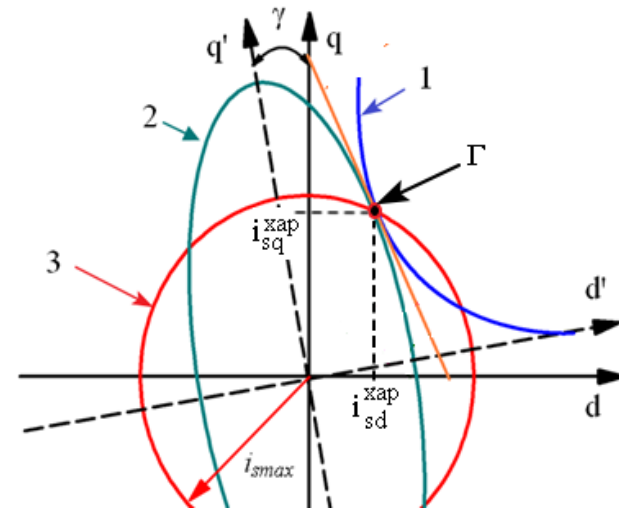


Рисунок 3 - Положение рабочей точки в предельном режиме работы при $U_{dc} = U_{dcmin}^{(xap)}$ и $M = M_{xap}$

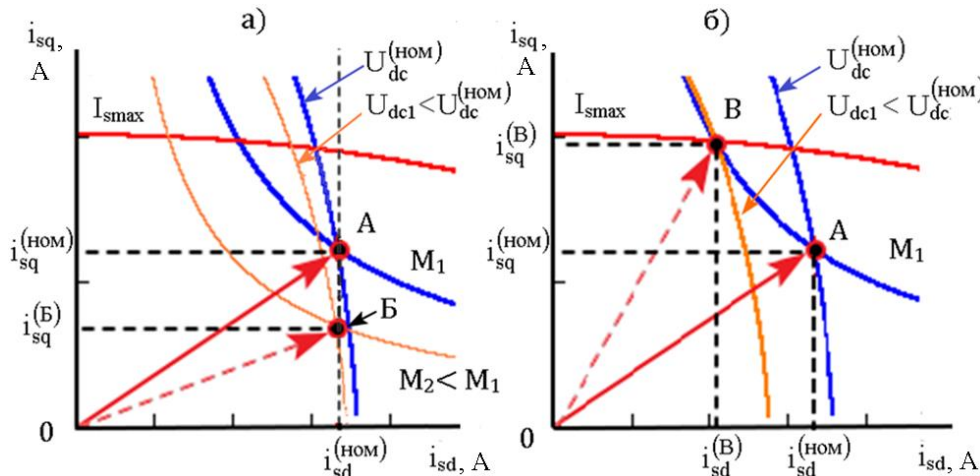


Рисунок 2 - Движение рабочей точки в случае векторной системы управления при постоянном потокоцеплении ротора $\psi_r^{(nom)} = L_m i_{sd}^{(nom)}$ – а) и обеспечение постоянства электромагнитного момента при провале напряжения $U_{dc}^{(nom)} \rightarrow U_{dc1}$ за счет одновременного регулирования обеих компонент тока статора i_{sd}, i_{sq} . – б)

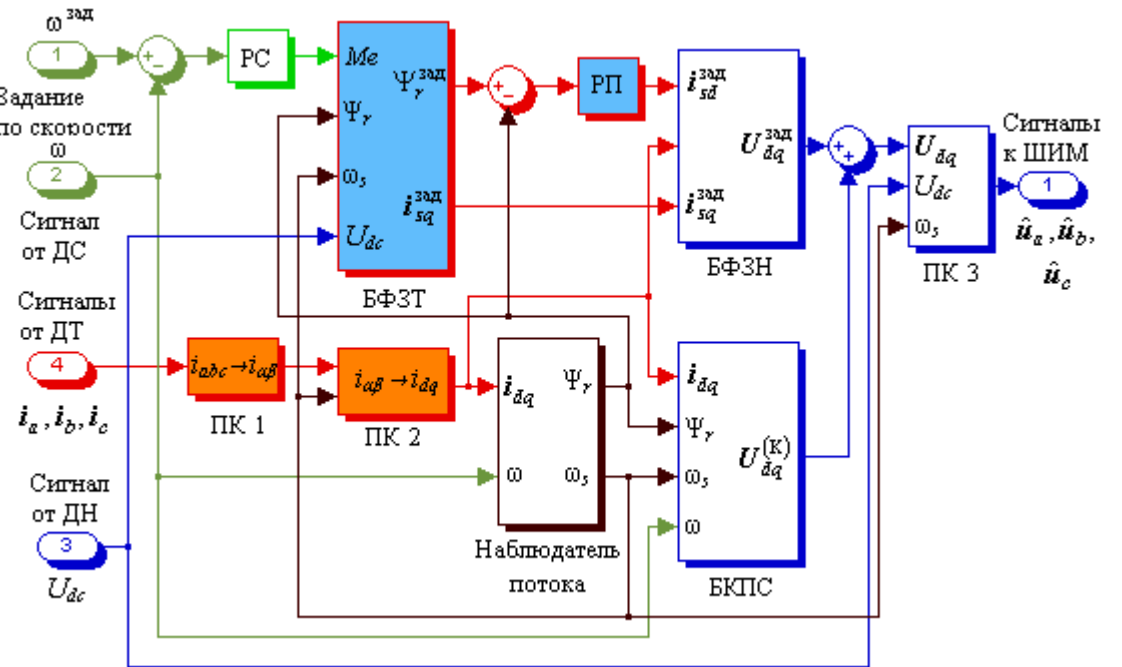


Рисунок 4 - Структурная схема системы управления компьютерной модели привода в *MatLab/Simulink*: PC – регулятор скорости; РП – регулятор потока; БФЗТ – блок формирования задания проекций тока; БФЗН – блок формирования задания проекций напряжения; ПК - преобразователь системы координат; БКПС – блок компенсации перекрестных связей; ШИМ – широтно-импульсный модулятор; ДС – датчик скорости вращения ротора; ДТ – датчики тока статора

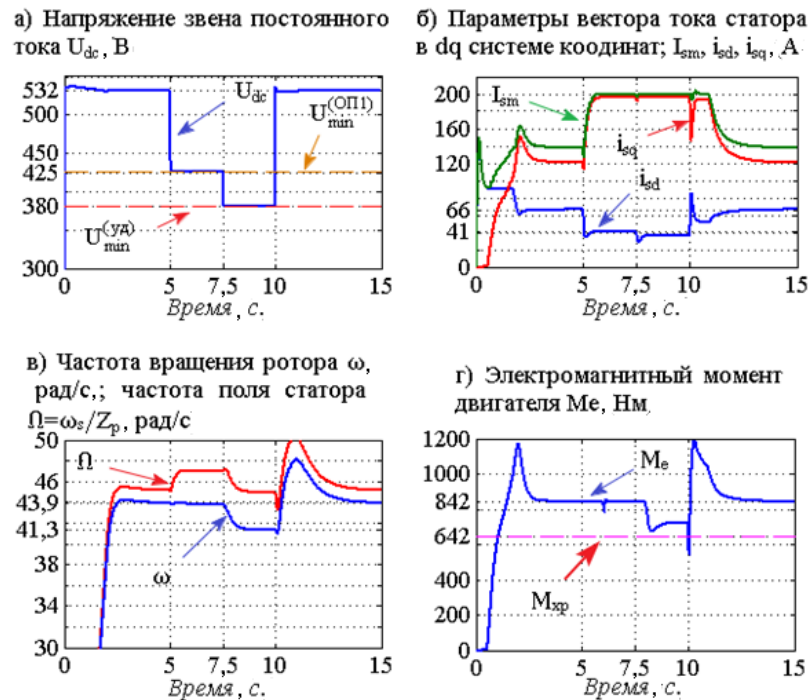


Рисунок 6 - Осциллограммы работы привода с векторной системой управления, реализующей режим ослабленного поля, при провале напряжения питания

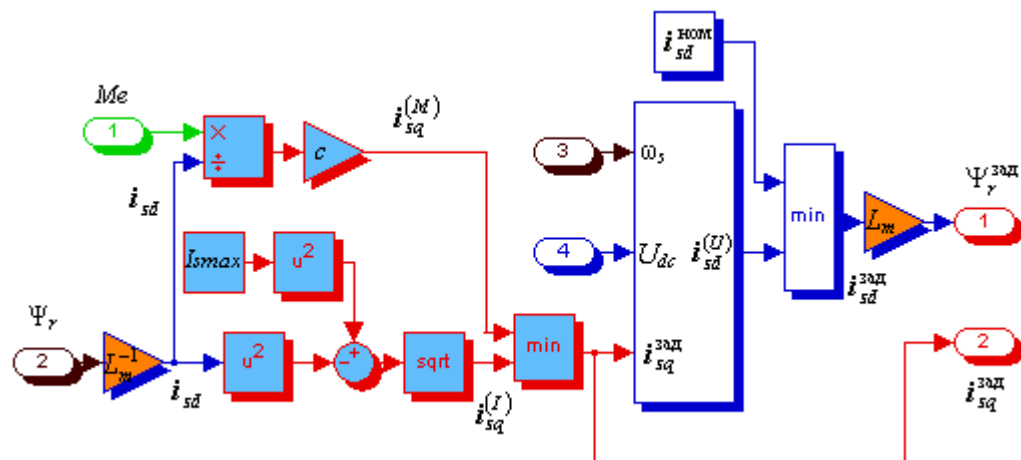


Рисунок 5 - Структура блока реализации алгоритма управления приводом в режиме ослабленного поля

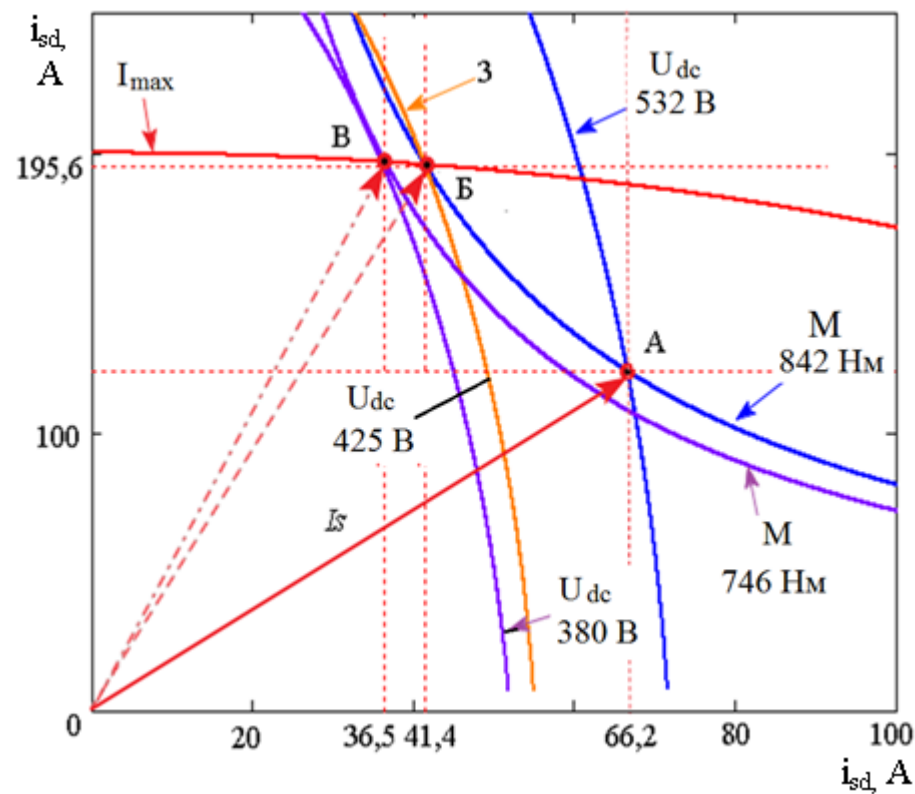


Рисунок 7 - Изменение рабочей точки электропривода при управлении в режиме ослабленного поля

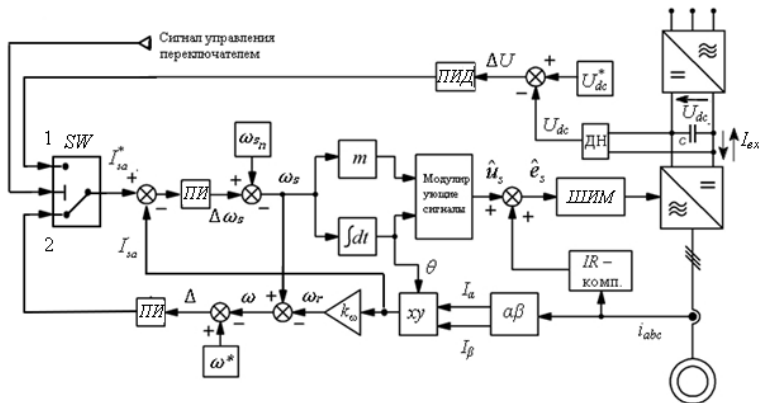


Рисунок 8 - Структурная схема бездатчиковой системы скалярного управления асинхронным приводом.

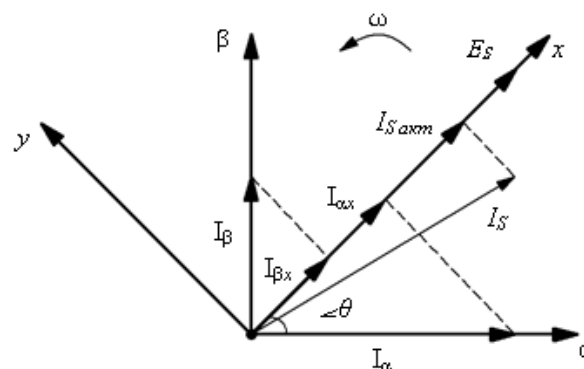


Рисунок 9 - Схема вычисления активной составляющей тока

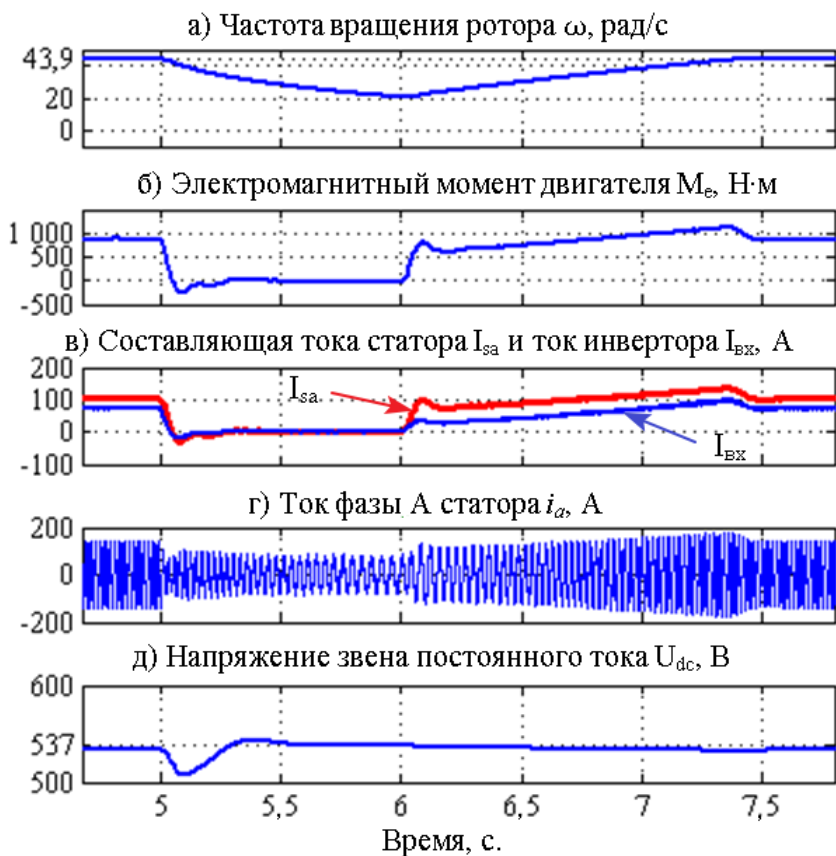


Рисунок 11 - Изменение скорости вращения двигателя, электромагнитного момента, активной составляющей тока статора и среднего значения тока инвертора, а также фазного тока статора и напряжения ЗПТ

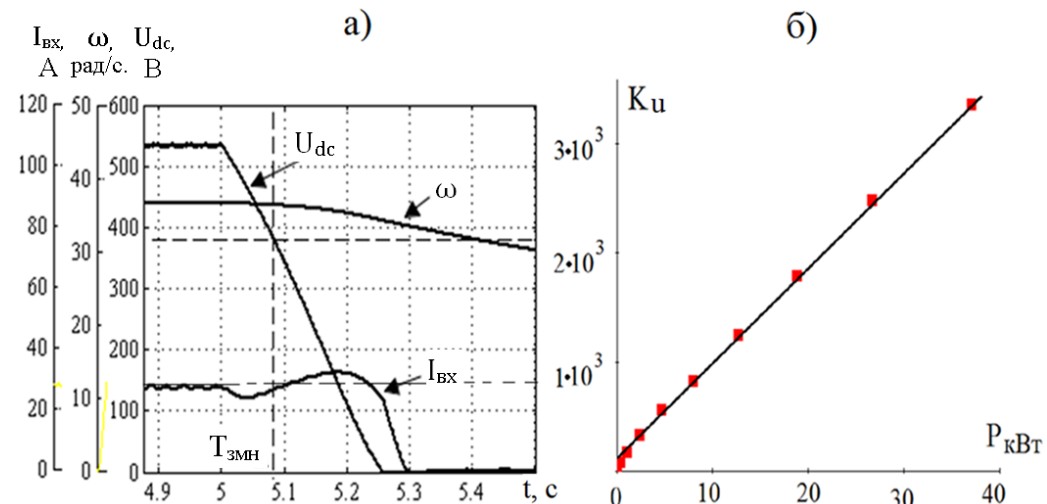


Рисунок 10 - Осциллограммы разряда конденсатора $U_{dc}(t)$, разрядного тока $I_{\beta x}(t)$, скорости вращения выбегающего двигателя $\omega(t)$ – а) и изменение углового коэффициента линеаризованной кривой разряда конденсатора в зависимости от мощности привода в начальный момент выбега – б).

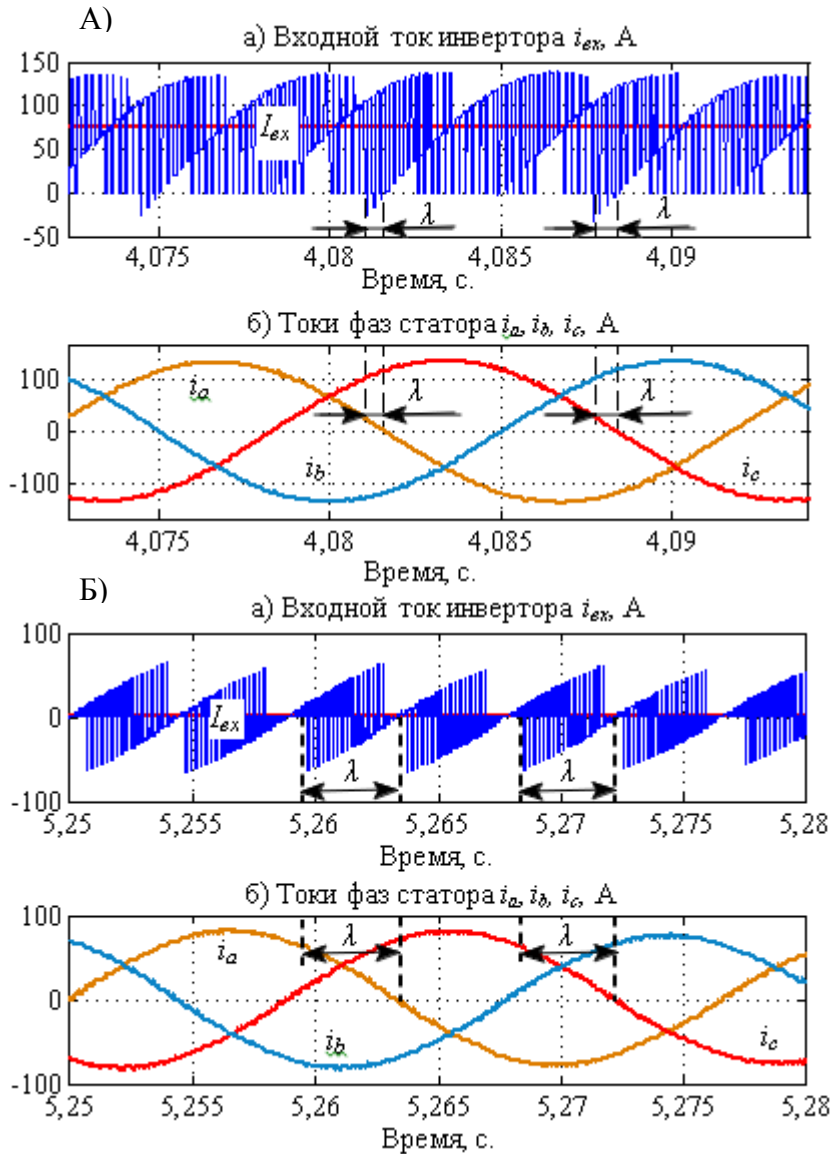


Рисунок 12 - Осциллограммы тока инвертора и токов фаз АД в нормальном режиме работы –а) и в режиме рекуперации кинетической энергии – б)

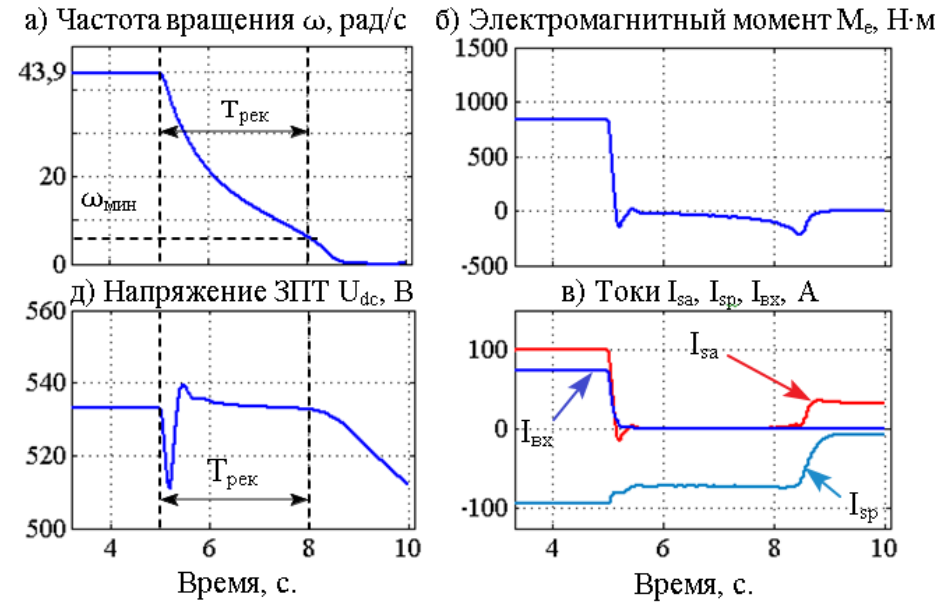


Рисунок 13 - Режимные параметры привода при рекуперации кинетической энергии во время провала напряжения глубиной 100 %

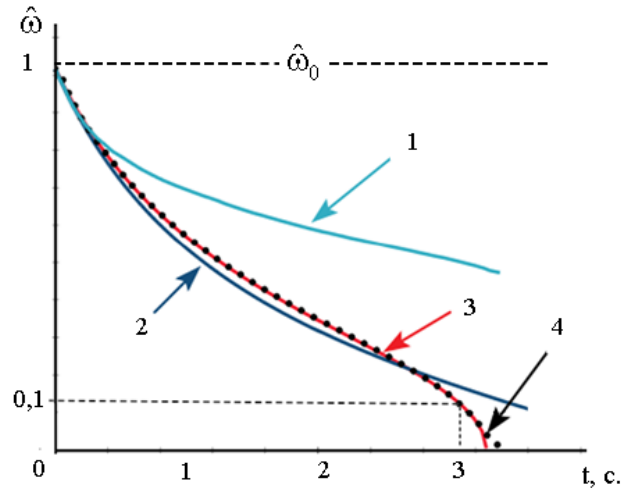


Рисунок 14 - Зависимость частоты вращения от времени на интервале рекуперации кинетической энергии и при свободном выбеге.

Кривая 1 - случай свободного выбега; кривая 2 - расчетная зависимость выбега при рекуперации в предположении постоянства момента торможения; кривая 3 - расчетная зависимость выбега при рекуперации с учетом зависимости тормозного момента от скорости вращения; кривая 4, выделенная на графике точками - изменение частоты вращения в компьютерной модели привода.

Зависимость времени работы привода в режиме рекуперации:

$$t(\omega) = \frac{W_{ke} \cdot \sqrt[3]{\rho}}{3 \cdot P_{ном}} \left(\ln \frac{(\sqrt[3]{\rho^2} \cdot \hat{\omega}^2 - \sqrt[3]{\rho} \cdot \hat{\omega} + 1)}{(\sqrt[3]{\rho} \cdot \hat{\omega} + 1)^2} + 2\sqrt{3} \arctg \left(\frac{2\sqrt[3]{\rho} \cdot \hat{\omega} - 1}{\sqrt{3}} \right) \right) \Bigg|_{\omega_{мин}}^{\omega_0} \quad (12)$$

где $\rho = P_{ном} / \Delta P_s$; $W_{ke} = J \cdot \omega_{ном}^2 / 2$; $\hat{\omega} = \omega / \omega_{ном}$; $\omega_0 = \omega(0)$