

На правах рукописи



Сибирцев Дмитрий Сергеевич

ЧАСТОТНЫЙ СИНХРОНИЗИРОВАННЫЙ АСИНХРОННЫЙ
ЭЛЕКТРОПРИВОД ЛЕНТОЧНОГО КОНВЕЙЕРА

Специальность: 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Липецк – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Мещеряков Виктор Николаевич.

Официальные оппоненты:

Тутаев Геннадий Михайлович, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электроника и электротехника» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва»;

Благодаров Дмитрий Анатольевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированный электропривод» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Магнитогорский государственный технический университет имени Г.И. Носова».

Защита диссертации состоится « 13 » мая 2022 года в 12³⁰ на заседании диссертационного совета Д 212.108.01 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет» по адресу: 398055, г. Липецк, ул. Московская 30, первый корпус, ауд. 601.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте www.stu.lipetsk.ru при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Липецкий государственный технический университет»

Автореферат разослан « 11 » марта 2022 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



В.В. Телегин

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В настоящее время энергосбережение является одним из важнейших направлений в энергетической политике многих производственных предприятий. Учитывая, что большую часть производимой электроэнергии потребляют электроприводы можно говорить о высокой актуальности задач поиска путей энергосбережения при эксплуатации, модернизации систем управления электроприводов.

На подъёмно-транспортных механизмах, в том числе и на конвейерах, отличающихся большими моментами инерции и используемых на многих промышленных предприятиях, широко применяются асинхронные двигатели с фазным ротором (АДФР). Регулирование скорости в таких приводах обеспечивается низкоэффективным способом регулирования сопротивления в цепи ротора, характеризующимся большими потерями. Повышение энергоэффективности работы данных приводов возможно осуществить применением частотных преобразователей. Однако замыкание накоротко обмотки ротора не способствует снижению потерь. Для устранения вышеуказанных недостатков целесообразно выполнять перевод асинхронных двигателей в синхронный режим путем подачи постоянного тока в цепь ротора. При данном способе управления статические механические характеристики асинхронного двигателя на рабочем участке становятся абсолютно жесткими, существенно снижаются потери в двигателе.

На ленточных конвейерах, выполняющих непрерывную транспортировку грузов и материалов, целесообразно поддерживать постоянную скорость движения ленты при изменении нагрузок в широком диапазоне, во многих случаях может потребоваться регулирование установившейся скорости движения ленты. Электропривод должен обеспечивать возможность пуска при полной загрузке конвейера транспортируемым материалом. Существующие системы асинхронного электропривода с параметрическим управлением не всегда в полной мере удовлетворяют возрастающим требованиям к регулировочной способности и энергоэффективности. Таким образом, актуальной задачей является создание энергоэффективных систем частотного управления синхронизированным асинхронным электроприводом конвейеров, обеспечивающих пуск с постоянным ускорением, регулирования скорости в широком диапазоне и формирование жестких механических характеристик.

Большой вклад в развитие систем синхронизированного электропривода внесли ученые: Р.Б. Авринский, Е.Я. Омельченко, М.М. Соколов, И.А. Селиванов, Б.А. Поляков, В.П. Пригода.

Объектом исследования является бездатчиковая система управления частотным синхронизированным электроприводом с включением обмоток ротора асинхронного двигателя в звено постоянного тока преобразователя частоты с гистерезисными регуляторами тока фаз двигателя.

Цель работы. Разработка и исследование систем управления синхронизированным асинхронным электроприводом с частотно-токовым управлением с обес-

печением требуемых пусковых и регулировочных характеристик за счет применения корректирующих контуров регулирования и энергоэффективных алгоритмов управления.

Идея работы заключается в разработке бездатчиковой системы управления частотным синхронизированным электроприводом с повышающим импульсным преобразователем на входе инвертора, обеспечивающим возможность включения обмоток ротора асинхронного двигателя в звено постоянного тока преобразователя с внутренним контуром гистерезисного регулирования токов обмоток статора двигателя и внешним контуром регулирования скорости с применением корректирующих контуров для обеспечения улучшенных энергетических и динамических характеристик электропривода ленточного конвейера.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе необходимо выполнить решение следующих задач:

- анализ систем управления двигателями переменного тока, в частности асинхронным двигателем с фазным ротором;
- исследование математической модели асинхронного двигателя с фазным ротором и анализ вариантов повышения ее устойчивости в синхронном режиме работы за счет построения дополнительных контуров регулирования электромагнитных параметров машины;
- разработка бездатчиковой системы частотно-токового управления синхронизированным электроприводом с повышающим преобразователем в звене постоянного тока для обеспечения возможности последовательного включения обмоток статора и ротора двигателя;
- разработка методов стабилизации момента синхронизированного электропривода в системах частотно-токового управления без датчика положения ротора путем коррекции сигнала задания на частоту тока статора в функции угла нагрузки;
- создание алгоритма управления повышающим импульсным преобразователем, включенным в звено постоянного тока преобразователя частоты, для обеспечения работы инвертора с минимальным количеством коммутаций, позволяющего снизить коммутационные потери в процессе работы электропривода;
- оценка влияния транзистора в схеме включения повышающего импульсного преобразователя в звене постоянного тока на гармонический состав тока, формируемого на выходе инвертора;
- экспериментальная оценка разработанной системы управления, исследование энергетических показателей рассматриваемого электропривода в различных режимах работы.

Методы исследования. Задачи диссертационного исследования решались с применением методов теории автоматического управления, методов исследования устойчивости нелинейных систем, методов моделирования динамических систем с применением прикладных программных средств.

Научная новизна работы:

- разработана система частотно-токового управления процессом пуска синхронизированного асинхронного электропривода, отличающаяся наличием блока

коррекции сигнала задания частоты тока статора на основании косвенного определения угла между векторами тока статора и основного потокосцепления, и наблюдателя скорости, обеспечивающего работу контура регулирования скорости двигателя;

- разработан синхронизированный асинхронный электропривод, в котором обмотки статора питаются от преобразователя частоты, а по обмоткам ротора протекает постоянный ток, работающий без датчика положения ротора, отличающийся последовательным включением обмоток ротора в звено постоянного тока преобразователя частоты, использованием дополнительного импульсного преобразователя, а также системой стабилизации, реализующей коррекцию сигнала задания на частоту тока статора в функции угла нагрузки, рассчитываемого косвенно на основе определения ортогональных проекций вектора напряжения статора;

- разработан алгоритм управления преобразователем частоты с дополнительным импульсным преобразователем в звене постоянного тока в составе синхронизированного электропривода, отличающегося снижением требуемого количества коммутаций силовых транзисторов инвертора за счет работы импульсного преобразователя с гистерезисным регулятором выпрямленного тока, действующим по принципу сравнения значений сигнала задания выходного тока инвертора и измеренного значения тока.

Теоретическая значимость работы состоит:

- в разработке системы стабилизации момента синхронизированного электропривода с частотно-токовым управлением за счет применения корректирующих контуров электромагнитных параметров электрической машины, позволяющих регулировать сигнал задания частоты тока статора;

- в разработке системы управления синхронизированным электроприводом, обеспечивающей стабилизацию пускового момента двигателя посредством воздействия на сигнал задания частоты и амплитуды тока статора, с формированием корректирующих сигналов, рассчитываемых на основе анализа положения векторов тока статора и потокосцепления ротора;

- в разработке системы управления синхронизированным асинхронным двигателем, имеющей в своем составе адаптивный наблюдатель скорости, выходной сигнал которого рассчитывается исходя из положения векторов тока и напряжения статора.

Практическая значимость работы:

- снижение коммутационных потерь транзисторов преобразователя частоты в среднем на 12 % за счет применения на входе инвертора импульсного преобразователя, позволяющего обеспечить требуемое значение выпрямленного тока;

- повышение энергоэффективности электроприводов, содержащих в своем составе АДФР, за счет перевода их в синхронный режим с обеспечением уменьшения потребления электроэнергии из-за снижения тока статора примерно на 7-10%, и исключения низкоэффективных способов регулирования скорости по цепи ротора.

- возможность получения одинаковых скоростей в системе двухдвигательного

синхронизированного асинхронного электропривода, без использования замкнутых контуров регулирования скорости.

Достоверность полученных результатов. Подтверждается соответствием зависимостей, снятых при моделировании переходных процессов в программном пакете Matlab Simulink, экспериментальным данным, а также сопоставимостью полученных результатов с положениями общей теории электропривода.

Реализация результатов работы. Диссертация выполнена в ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет». Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, внедрены на ООО «Промэлектроника» г. Липецк, ООО «Огнеупорстрой» г. Липецк.

Научные положения, выносимые на защиту:

- система синхронизированного электропривода с частотно-токовым управлением с повышающим напряжением преобразователем на входе инвертора для обеспечения возможности включения обмоток ротора двигателя в звено постоянного тока преобразователя частоты с внутренним контуром гистерезисного регулирования фазных токов статора и внешним контуром регулирования скорости, а также дополнительными контурами регулирования, обеспечивающими коррекцию сигналов задания частоты и амплитуды тока статора;

- результаты сравнительного анализа гармонического состава кривой тока систем управления с повышающим импульсным преобразователем в звене постоянного тока преобразователя частоты и без него;

- алгоритм работы импульсного преобразователя с релейным управлением, установленного в звене постоянного тока преобразователя частоты и обеспечивающего работу инвертора с минимальным количеством коммутаций;

- схемные решения и принципы построения адаптивного наблюдателя скорости асинхронного двигателя с фазным ротором, осуществляющего расчет значения скорости на основе взаимного расположения векторов тока и напряжения статора.

- результаты исследований энергетических и динамических показателей системы управления синхронизированным электроприводом в различных режимах работы.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности. Диссертация соответствует следующим пунктам Паспорта научной специальности 05.09.03:

1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

2. Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления».

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы обсуждались и докладывались на IV Международной научно-технической конференции «Энергосбережение эффективность в технических системах» (Тамбов 2016); Международной научно-технической конференции «Современные сложные системы управления» (Липецк 2017); Международной научно-методической конференции

«95 лет Отечественной школе электропривода» (Санкт-Петербург 2017); III-й Международной научно-технической конференции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» (Уфа 2017); Международной научно-технической конференции «Электроэнергетика и электротехника» (Воронеж 2017); III Международной конференции «Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах» (Тамбов 2016); XXIII Международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии» (Нижний Новгород 2017); XVII Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты» (Алушта 2018); 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA-2020); VI Всероссийской (XXXIX Региональной) научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики» (Нижний Новгород 2020).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 16 работ, из них 2 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, 3 статьи в изданиях, входящих в систему цитирования СКОПУС, 11 тезисов докладов конференций и статей в других изданиях.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации - 173 страницы, 67 рисунков, 3 таблицы, список литературы из 111 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, указан объект исследований, сформулированы цель и идея работы, отражено соответствие работы тематике специальности, приведена научная новизна работы, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведены результаты апробации и реализации диссертационной работы.

В первой главе рассмотрены основные принципы построения систем управления двигателями переменного тока. Выполнен анализ разработок и исследований зарубежных и российских ученых в области каскадных систем управления скоростью асинхронного двигателя с фазным ротором.

Рассмотрены различные схемные решения по переводу асинхронного двигателя в синхронный режим, проведен их сравнительный анализ. Отмечено, что одной из возможных областей применения синхронизированных приводов, является механизмы непрерывного действия, в частности, ленточные конвейеры. Показано, что при реализации последовательного соединения обмоток статора и ротора асинхронного двигателя в синхронизированном асинхронном электроприводе они питаются от сети через общий преобразователь частоты.

Во второй главе выполняется анализ математической модели асинхронного двигателя с фазным ротором. Выбор вектора связанного с осью ротора для ориентации системы координат способствует упрощению исследования статических режимов работы, так как ротор обладает наибольшей инерционностью, а скольжение в установившемся режиме работы отсутствует и, скорость вращения ротора соответствует скорости вращения магнитного поля статора.

Сигнал задания частоты тока статора рассчитывается по выражению:

$$\omega_1^* = (\omega + \Delta\omega) p, \quad (3)$$

где $\Delta\omega$ - задаваемая разность частот вращения поля статора и ротора

$$\Delta\omega_1^* = \frac{1}{p} \frac{R'_2}{L'_2 + L_m}. \quad (4)$$

Для исключения негативного влияния на сигнал измерения возмущений, внешних колебаниями ленты, скорость вращения ротора в разработанной системе вычисляется косвенно с помощью адаптивного наблюдателя – блок НС. Структурная схема наблюдателя и результаты моделирования представлены на рисунках 3, 4. Закон адаптации представляет собой выражение.

$$\hat{\omega}_{eR} = \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) \begin{pmatrix} \hat{\Psi}_{Ra}^R & \hat{\Psi}_{R\beta}^s \\ \hat{\Psi}_{R\beta}^R & \hat{\Psi}_{Ra}^s \end{pmatrix}. \quad (5)$$

где K_p и K_i – соответствующие компоненты регулятора.

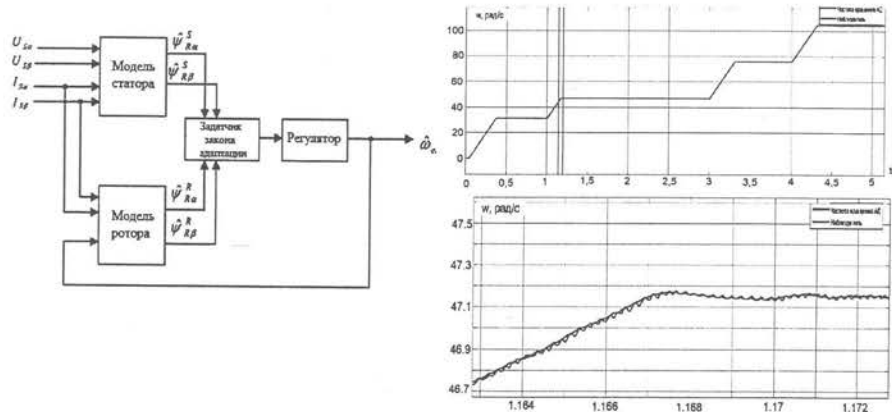


Рисунок 3 – Структурная схема наблюдателя скорости

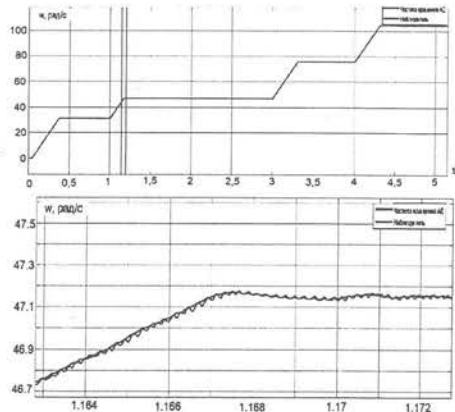


Рисунок 4 – Результаты моделирования наблюдателя скорости

Коррекция динамики и повышение устойчивости системы частотно-токового управления асинхронным двигателем осуществляется путем отслеживания и регулирования угла между векторами тока статора и потокосцепления ротора. Изменение момента двигателя обеспечивается регулировкой модуля и частоты тока статора. Алгоритм идентификации и коррекции угла между векторами тока статора и потокосцепления ротора проиллюстрирован на рисунках 5, 6. В состав системы управления на рисунке 2 входит внешний контур регулирования скорости и внутренний контур регулирования токов фаз статора. Поддержание на постоянном

уровне момента обеспечивается формированием на заданном уровне значения амплитуды тока статора I_1 и значения разности скоростей вращения поля статора и ротора $\Delta\omega^*$, а также стабилизация угла Φ_0 . Максимальное значение момента реализуется при условии поддержания постоянного значения разности скоростей

$$\Delta\omega_{\text{опт}} = (\omega_1 - \omega_2)_{\text{опт}}. \quad (6)$$

С блока ограничения сигнал поступает в функциональный преобразователь, формирующий сигнал задания на амплитуду тока статора. Далее сигнал поступает в блок БЗТ, который формирует сигналы задания мгновенных токов каждой фазы. С помощью релейных регуляторов задаются сигналы управления вентилями инвертора. При переходе от асинхронного режима работы АД к синхронному меняется часть системы управления между выходом регулятора скорости и входом блока определения мгновенных значений модуля тока статора.

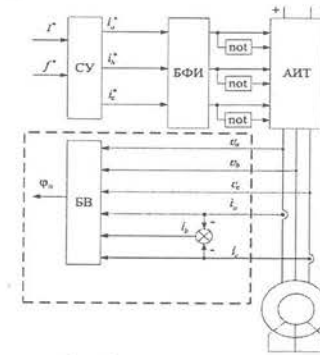


Рисунок 5 – Структурная схема блока расчета угла Φ_0

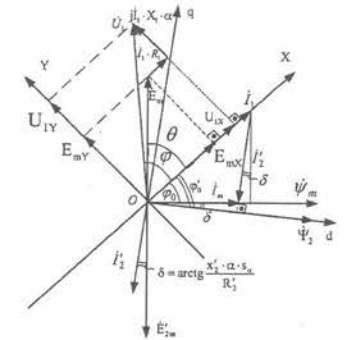


Рисунок 6 – Векторная диаграмма асинхронного двигателя

После разгона двигателя в асинхронном режиме с частотно-токовым управлением с принудительным заданием скольжения до подсинхронной установившейся скорости в ротор подается постоянный ток. Одновременно в системе управления при определении сигнала задания на частоту тока статора в синхронном режиме отключается блок задания сигнала $\Delta\omega^*$.

В результате частота тока статора станет равной частоте вращения ротора, а сигнал задания на входе и выходе регулятора скорости не изменится. На выходе регулятора скорости и входе блока формирования мгновенных значений тока статора логические переключающие элементы выводят из работы блоки расчета заданного тока статора в асинхронном режиме и вводят блоки расчета этого тока в синхронном режиме.

На второй вход блока задания мгновенных значений тока статора поступает сигнал задания частоты, который рассчитывается по формуле

$$\omega_{1\text{эл}}^* = \Delta\omega^* + \Delta\omega + \omega_1^*, \quad (7)$$

где ω_{1st}^* - сигнал задания частоты тока статора; $\Delta\omega^*$ - задаваемая разность частот вращения поля статора и ротора в блоке задания; $\Delta\omega$ - корректирующий сигнал, рассчитываемый в функции угла регулирования φ_0 и поступающий с выхода блока БК; ω_1^* - сигнал с выхода блока БВ. На рисунке 7 изображены процессы при синхронизации АД.

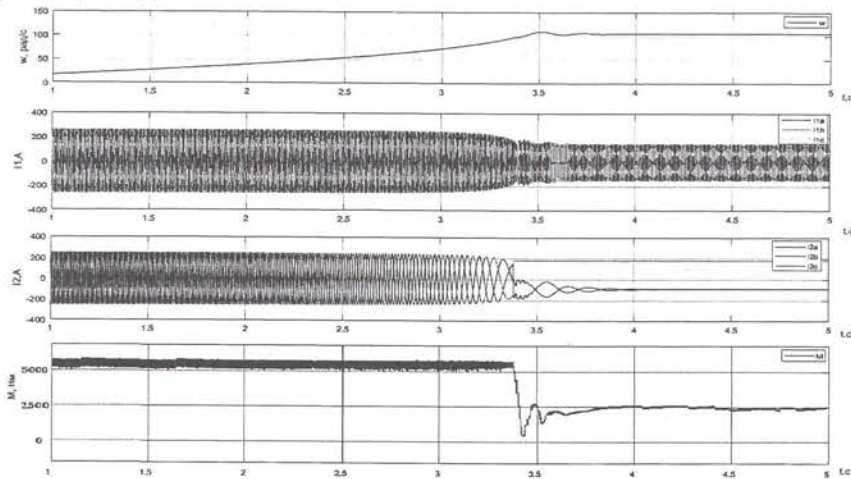


Рисунок 7 – Переходные процессы в синхронизированном электроприводе при асинхронном пуске и переходе в синхронный режим работы

Для снижения импульсных потерь, возникающих в процессе коммутации силовых вентилях, система управления определенным образом управляет величиной тока в звене постоянного тока. Обеспечивается величина выпрямленного тока равной наибольшему по модулю фазному току инвертора.

$$(\pi/3-2\pi/3)+\pi\text{-фаза А; } (0-\pi/3)+\pi\text{-фаза В; } (2\pi/3-\pi)+\pi\text{-фаза С.} \quad (8)$$

В данных диапазонах ток максимален, переключения силовых вентилях инвертора не требуется, таким образом снижаются потери. Проведенные исследования показали, что включение в звено постоянного тока импульсного преобразователя в незначительной степени сказывается на гармоническом составе тока статора. Однако, следует отметить, что в системе управления с импульсным преобразователем снижен суммарный коэффициент THD в среднем на 15%, но увеличено влияние гармоник в диапазоне 3-11. Применение импульсного преобразователя позволило снизить количество переключений транзисторов инвертора и сократить коммутационные потери на 12%.

Далее рассмотрена система с подключением обмоток ротора в звено постоянного тока преобразователя частоты (Рисунок 8). Компенсация падения напряжения

на входе инвертора обеспечивается повышающим преобразователем, установленным в звене постоянного тока. Подобное схемное решение позволит организовать схему частотного синхронизированного электропривода используя только один вентильный преобразователь частоты.

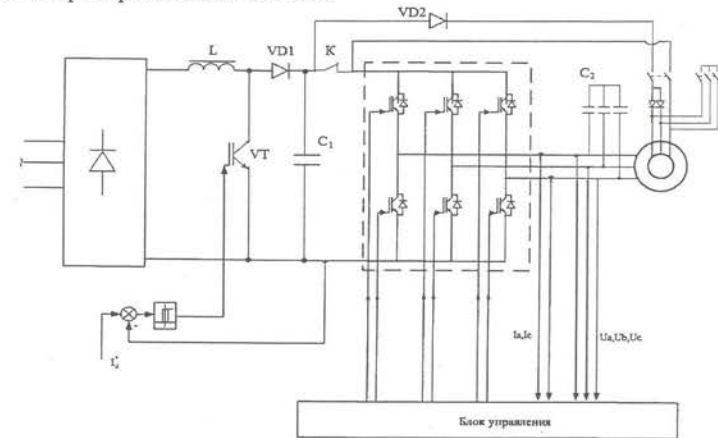


Рисунок 8 – Схема управления синхронизированным ЭП с включением обмоток ротора асинхронного двигателя в звено постоянного тока

Схема управления инвертором синхронизированного электропривода с последовательным питанием обмоток статора и ротора представлена на рисунке 9.

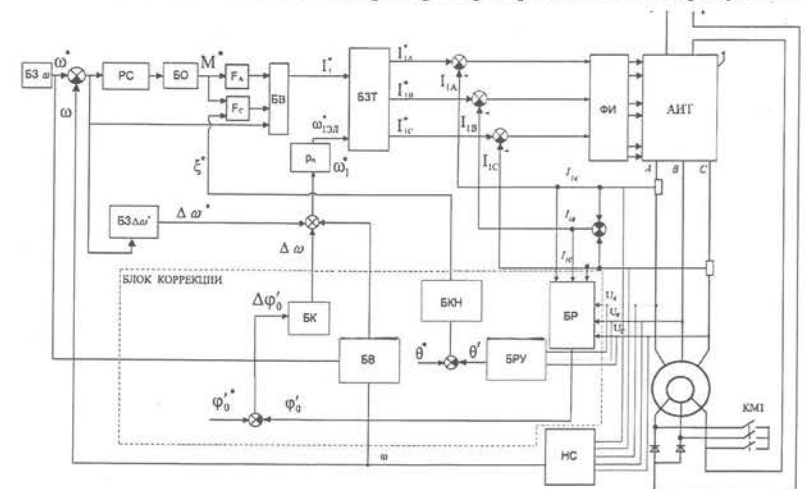


Рисунок 9 – Схема управления инвертором синхронизированного электропривода с последовательным питанием обмоток статора и ротора

Для обеспечения стабильности работы и снижения склонности системы к колебаниям в процессе пуска и изменения нагрузки в системе с последовательным соединением статора и ротора выполняется корректировка сигнала задания вектора тока статора путем введения в систему управления дополнительного контура контроля и регулирования в заданном диапазоне значения угла нагрузки θ .

В системе управления, не имеющей в своем составе датчик положения ротора, расчет мгновенного значения угла нагрузки осуществляется косвенно на основе значений проекций вектора напряжения статора в блоке БРУ по выражению.

$$\theta = \arctg \frac{U_{ld}}{U_{lq}}, \quad (9)$$

где U_{ld} , U_{lq} - проекции вектора напряжения статора на оси d,q.

Выражение, связывающее сигнал задания момента и тока статора в синхронном режиме, будет иметь следующий вид

$$I = MF_c + \xi^*, \quad (10)$$

где $F_c = \frac{2\omega_n x_d}{3p_n E_o \sin\theta} \frac{1}{R_l} \frac{1}{T_p + 1}$; ξ^* - сигнал коррекции с выхода блока БКН.

Результаты моделирования представлены на рисунке 10.

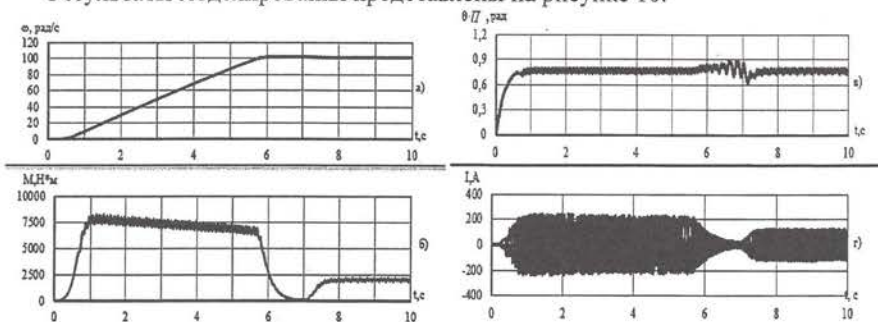


Рисунок 10 – Результаты моделирования частотного пуска синхронизированного ЭП с выходом на установившуюся скорость и последующим набросом нагрузки

В четвертой главе рассмотрены особенности построения систем управления приводами ленточных конвейеров. К основным требованиям, предъявляемым к таким системам, относятся:

- плавный пуск с ограничением момента и контролем ускорения;
- стабилизация и ограничение динамических воздействий на тяговый орган;
- поддержание требуемой скорости в установившемся режиме работы;
- схожая жесткость механических характеристик двигателей в составе двухбарабанных приводов для обеспечения равномерного распределения нагрузок.

В ленточных конвейерах, оснащенных однодвигательным электроприводом, при близких значениях номинальных токов статора и ротора АДФР целесообразно использовать систему синхронизированного электропривода с последовательным

соединением обмоток статора и ротора (рисунок 8). Если установлен АДФР, у которого значительно различаются значения номинальных токов статора и ротора, целесообразно использовать систему синхронизированного электропривода с независимым питанием обмоток статора и ротора (рисунок 1).

На конвейерах большой мощности применяются двух- и многодвигательные электроприводы. В ходе проведенных экспериментальных исследований на двухбарабанном ленточном конвейере с двухдвигательным электроприводом, работающим на одну механическую нагрузку, была выявлена неравномерная отличающаяся в 2 раза загрузка двух АДФР, вследствие разной жесткости механических характеристик при резисторной системе управления. На таких механизмах целесообразно использовать схему двухдвигательного синхронизированного асинхронного электропривода с независимым питанием обмоток ротора от отдельных управляемых источников, позволяющих, за счет действия системы коррекции, регулировать ток ротора каждого двигателя, и тем самым обеспечивать выравнивание значений токов статоров и повышать равномерность распределения нагрузок.

Для получения экспериментальных данных и подтверждения возможности применения системы синхронизированного электропривода выполнены измерения на стенде для испытания электрических машин. В качестве объекта испытаний использовался асинхронный двигатель с фазным ротором МТФ-512-8.

На рисунке 11 представлена осциллограмма переходного процесса синхронизации асинхронного двигателя с фазным ротором. В ходе исследований отмечено, что после подачи постоянного тока в обмотку ротора наблюдается некоторое увеличение амплитуды тока статора, однако после окончания процесса синхронизации ток статора снижается.

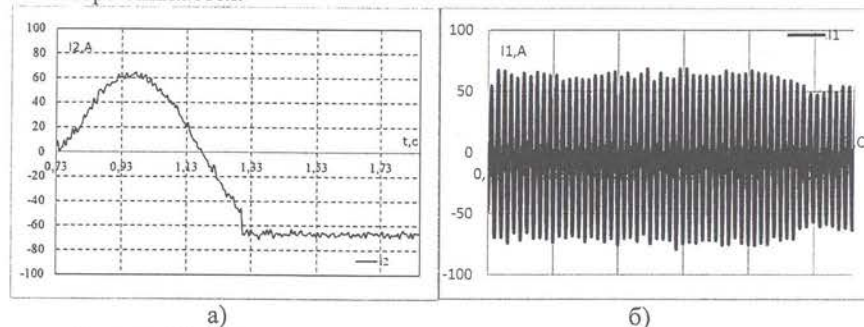


Рисунок 11 – Осциллограмма переходного процесса синхронизации асинхронного двигателя с фазным ротором:
а) – ток ротора; б) – ток статора

Длительность переходного процесса зависит от мощности двигателя, момента инерции механизма и от фазы тока в обмотке ротора в момент подачи постоянного тока. Также исследованы энергетические параметры разработанных систем.

Выполнено сравнение рабочих характеристик электропривода в синхронном и асинхронном режимах.

По результатам проведенных исследований отмечено, что коэффициент полезного действия асинхронного двигателя в синхронном режиме работы выше в среднем на 5%. Зависимости, представленные на рисунке 12, подтверждают, что в синхронном режиме по обмоткам статора при регулировании мощности на валу протекает ток, значение которого меньше в среднем на 10%, чем в асинхронном режиме. При этом следует отметить, что при малых нагрузках система с последовательным соединением обмоток предпочтительнее вследствие одновременного снижения тока в статоре и роторе. В целом, синхронный режим характеризуется меньшим потреблением энергии и большей энергоэффективностью.

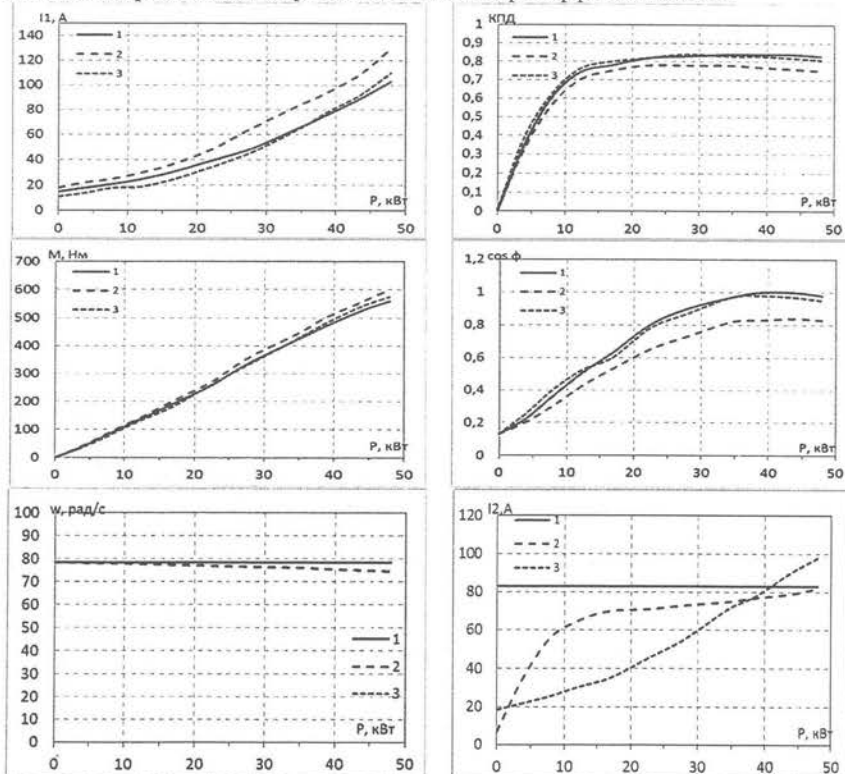


Рисунок 12 – Рабочие характеристики:

- 1 – синхронный режим с независимым питанием обмоток ротора;
- 2 – асинхронный режим;
- 3 – синхронный режим с последовательным соединением обмоток статора и ротора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных в диссертационной работе исследований решена актуальная задача, состоящая в разработке синхронизированного частотного электропривода с гистерезисными регуляторами в цепи статора и звене постоянного тока и адаптивным наблюдателем скорости с реализованными алгоритмами коррекции электромагнитных параметров электропривода для ленточных конвейеров. Результаты, полученные в ходе исследования, позволяют сделать следующие выводы.

1. Проанализированы существующие алгоритмы и способы управления асинхронным двигателем с фазным ротором, определены недостатки каждого способа, определены тенденции развития современных систем управления, сформулированы принципы организации и области применения синхронизированных электроприводов.

2. Разработана система скалярного частотно-токового управления, позволяющая выполнять асинхронный пуск синхронизированного электропривода, и обеспечивающая за счет синтеза дополнительных корректирующих контуров поддержание постоянного момента в процессе пуска.

3. Разработана бездатчиковая система управления с адаптивным наблюдателем скорости асинхронного двигателя, позволяющая исключить погрешность сигнала с датчика скорости под действием механических воздействий на объект управления и повышающим импульсным преобразователем в звене постоянного тока для обеспечения возможности последовательного включения обмоток статора и ротора двигателя.

4. Разработан метод стабилизации момента синхронизированного электропривода в системах частотно-токового управления с последовательным соединением статора и ротора АД без датчика положения ротора путем коррекции сигнала задания на частоту тока статора в функции угла нагрузки, рассчитываемого косвенно на основе взаимного положения векторов тока и напряжения статора.

5. Построена система управления с повышающим импульсным преобразователем в звене постоянного тока, обеспечивающая сниженное количество коммутаций силовых транзисторов инвертора за счет алгоритма формирования тока в звене постоянного тока, что способствует снижению коммутационных потерь в среднем на 12 %.

6. Выполнен анализ влияния повышающего импульсного преобразователя в звене постоянного тока на гармонический состав тока на выходе инвертора преобразователя частоты, при этом установлено, что применение такого преобразователя способствует снижению коэффициента несинусоидальности кривой тока в среднем на 15 %.

7. Выполнены экспериментальные исследования, подтверждающие возможность и целесообразность использования разработанного синхронизированного электропривода в ленточных конвейерах, исследованы энергетические показатели разработанного электропривода, полученные результаты подтверждают выполненные расчеты и результаты моделирования.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Мещеряков, В.Н. Система управления частотным асинхронным синхронизированным электроприводом / В.Н. Мещеряков, Д.С. Сибирцев, С. Валтчев, Е.И. Грачева // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. Том 23 №3. с. 116-126. DOI:10.30724/1998-9903-2021-23-3-116-126.

2. Мещеряков, В. Н. Синхронизированный асинхронный электропривод с частотным управлением / В. Н. Мещеряков, Д. С. Сибирцев // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №1(38).с.4-8. DOI:10.18503/2311-8318-2018-1(38)-4-8.

Публикации в изданиях из базы SCOPUS

3. V. Meshcheryakov. Mathematical Simulation of the Synchronized Asynchronous Electric Drive/ V. Meshcheryakov, D. Sibirtsev, E. Mikhailova// E3S Web of Conferences Volume 178 (2020), High Speed Turbomachines and Electrical Drives Conference 2020 (HSTED-2020).

4. V. Meshcheryakov. Frequency Control System for a Synchronized Asynchronous Electric Drive/ V. Meshcheryakov, D. Sibirtsev, Elena Gracheva// E3S Web of Conferences Volume 220 (2020), Sustainable Energy Systems: Innovative Perspectives (SES-2020)

5. D. Sibirtsev. Control System for a Synchronized Electric Drive. / 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA-2020). P. 832-835

Другие публикации

6. Мещеряков, В. Н. Частотный асинхронный электропривод с коррекцией фазового сдвига между моментобразующими векторами / В. Н. Мещеряков, Д. С. Сибирцев// Системы управления и информационные технологии. 2017. №2(68).с. 57-60.

7. Мещеряков В.Н. Моделирование процессов в синхронизированном электроприводе/ В. Н. Мещеряков, Д. С. Сибирцев// Материалы VI Всероссийской (XXXIX Региональной) научно-технической конференции «Актуальные проблемы электроэнергетики», посвященной 100-летию плана ГОЭЛРО. Нижний Новгород, 2020, с. 102-107

8. Мещеряков, В. Н. Система управления синхронизированным асинхронным электроприводом/ В. Н. Мещеряков, Д. С. Сибирцев// Труды XVII Международной конференции «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты», Крым, Алушта, 24-28 сентября 2018 г, с.166-168

9. Мещеряков, В. Н. Система управления асинхронным электроприводом с принудительным заданием скольжения/ В. Н. Мещеряков, Д. С. Сибирцев// Вестник Липецкого государственного технического университета. 2017. № 1 (31). с. 24-28.

10. Мещеряков, В. Н. Математическое моделирование синхронного электропривода/ В. Н. Мещеряков, Д. С. Сибирцев// Материалы Международной конференции с элементами научной школы «Актуальные проблемы энергосбережения и эффективности в технических системах» Тамбов, 25-27 апреля 2016. с. 100-101.

11. Сибирцев, Д.С. Система управления асинхронным электроприводом с коррекцией частоты тока статора/ Материалы XII Международной научно-практической конференции «Современные сложные системы управления» Липецк, 25-27 октября 2017. с. 174-178.

12. Мещеряков, В. Н. Частотный асинхронный электропривод с автономным инвертором, управляемым током/ В. Н. Мещеряков, Д. С. Сибирцев//Труды научно- методической конференции «95 лет Отечественной школе электропривода» Санкт-Петербург, 20 апреля 2017. с. 125-127.

13. Мещеряков, В. Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод/ В. Н. Мещеряков, Д. С. Сибирцев// Материалы IV Международной научно-технической конференции студентов, молодых ученых и специалистов «Энергосбережение и эффективность в технических системах». Тамбов, 10-12 июля 2017. с. 137

14. Мещеряков, В. Н. Система управления асинхронным электроприводом с коррекцией угла между моментобразующими векторами/ В. Н. Мещеряков, Д. С. Сибирцев// Сборник научных трудов III Международной (VI Всероссийской) научно-технической конференции «Электропривод, электротехнологии и электрооборудование предприятий» Уфа, 26-27 апреля 2017. с. 25-28.

15. Мещеряков, В. Н. Частотный асинхронный электропривод с коррекцией фазового сдвига между моментобразующими векторами / В. Н. Мещеряков, Д. С. Сибирцев// Материалы XXIII Международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии» Нижний Новгород, 28 апреля 2017.

16. Мещеряков, В. Н. Система управления асинхронным электроприводом с поддержанием постоянного угла между током статора и потокосцеплением ротора / В. Н. Мещеряков, Д. С. Сибирцев// Сборник трудов Международной научной конференции «Электроэнергетика и электротехника» Воронеж, 18 мая 2017 года. с.69-74.

Личный вклад автора в работах, написанных в соавторстве, заключается в следующем: разработка системы частотно-токового управления синхронизированным электроприводом [1, 3]; разработка алгоритмов коррекции динамики систем управления, обеспечивающих асинхронный пуск синхронизированного электропривода [2, 9, 11, 12]; исследование переходных процессов в синхронизированном электроприводе [4, 7, 8, 10]; разработка системы синхронизированного электропривода с подключением ротора в звено постоянного тока преобразователя частоты [5]; синтез адаптивного наблюдателя скорости синхронизированного двигателя [6]; разработка алгоритмов, обеспечивающих повышение энергоэффективности систем управления [13, 14, 15, 16].

Подписано в печать 02.03.2022. Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная.

Цифровая печать. Объем 1,0 п.л. Тираж 120 экз. Заказ № 104.

Издательство Липецкого государственного технического университета.

Полиграфическое подразделение Издательства ЛГТУ.

398055, Липецк, ул. Московская, 30.