

ЕСЕПТЕУ ТЕХНИКАСЫ ЖӘНЕ АҚПАРАТТЫҚ ЖҮЙЕЛЕР / ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И ИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ/ COMPUTER ENGINEERING AND INFORMATION SYSTEMS

Industrial Transport of Kazakhstan
ISSN 1814-5787 (print)
ISSN 3006-0273 (online)
Vol. 23. Is. 1. Number 89 (2026). Pp. 83–102
Journal homepage: <https://prom.mtgu.edu.kz>
<https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.005>
UDC 656.2

STATIC CHARACTERISTICS OF A CONTROLLED ELECTRIC DRIVE IN DYNAMIC BRAKING MODE

A. Abzalkhanov

"Logistic Service Kazakhstan" LLP, Almaty, Kazakhstan.

E-mail: abzalkhanov.alimkhan@gmail.com

Alimkhan Abzalkhanov — manager, "Logistic Service Kazakhstan" LLP, Almaty, Kazakhstan
E-mail: abzalkhanov.alimkhan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-9773-575X>.

© A. Abzalkhanov

Abstract. This paper is devoted to the study of controlled electric drives of direct and alternating current operating in the dynamic braking mode using high-frequency pulse converters. Increasing requirements for energy efficiency, reliability, and controllability of industrial electric drives necessitate an in-depth analysis of the processes occurring in the power circuit during braking, as well as an assessment of the influence of discontinuous and continuous current modes on static and mechanical characteristics. The aim of the research is to substantiate the parameters of the power part of a controlled electric drive and to determine the boundaries of the stable operating range of pulse converters in the dynamic braking mode. To achieve this goal, circuit solutions were analyzed, simulation models were developed, static and mechanical characteristics were investigated, and boundary duty cycle values of pulse converters were determined. Using analytical methods and simulation modeling in the MATLAB–Simulink environment, families of static and mechanical characteristics for electric drives of various power ratings were obtained. It was established that with increasing motor power, the region of discontinuous current operation significantly decreases, while the continuous current region expands. Boundary duty cycle values corresponding to the transition between current modes were determined, and it was shown that these values weakly depend on the armature time constant and are mainly governed by the back electromotive force. The obtained results confirm the proposed hypothesis and contribute to the development of scientific knowledge on controlled dynamic braking modes of electric drives. The practical significance of the study lies in the applicability of the results to the design and tuning of automatic control systems for industrial electric drives.

Keywords: electric drive; dynamic braking; pulse converter; discontinuous current; mechanical characteristic; simulation modeling

For citation: A. Abzalkhanov. Static Characteristics of a Controlled Electric Drive in Dynamic Braking Mode // Industrial Transport of Kazakhstan. 2026. Vol. 23. No. 89. Pp. 83–102. (In Russ.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.005>

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.



ДИНАМИКАЛЫҚ ТЕЖЕУ РЕЖИМІНДЕГІ РЕТТЕЛЕТІН ЭЛЕКТР ЖЕТЕГІНІҢ СТАТИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫ

А.Б. Абзалханов

"Logistic Service Kazakhstan" ЖШС, Алматы, Қазақстан.

E-mail: abzalkhanov.alimkhan@gmail.com

Алимхан Абзалханов — менеджер, "Logistic Service Kazakhstan" ЖШС, Алматы, Қазақстан

E-mail: abzalkhanov.alimkhan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-9773-575X>.

© А.Б. Абзалханов

Аннотация. Бұл жұмыс жоғары жиілікті импульстік түрлендіргіштерді қолдану арқылы басқарылатын динамикалық тежеу режиміндегі тұрақты және айнымалы тоқты реттелетін электр жетектерін зерттеуге арналған. Өнеркәсіптік электр жетектеріне қойылатын энергия тиімділігі мен сенімділік талаптарының артуы тежеу режимдерінде күштік бөлікте жүретін процестерді терең талдауды және токтың үзік және үздіксіз режимдерінің статикалық әрі механикалық сипаттамаларға әсерін бағалауды қажет етеді. Зерттеудің мақсаты – динамикалық тежеу режиміндегі реттелетін электр жетегінің күштік бөлігінің параметрлерін негіздеу және импульстік түрлендіргіштердің тұрақты жұмыс диапазонының шекараларын анықтау. Осы мақсатқа жету үшін схемалық шешімдерді талдау, имитациялық модельдерді әзірлеу, статикалық, реттеу және механикалық сипаттамаларды зерттеу, сондай-ақ импульстік түрлендіргіштің шектік толтыру коэффициентін анықтау міндеттері қойылды. MATLAB–Simulink ортасында жүргізілген аналитикалық және имитациялық модельдеу нәтижесінде әртүрлі қуаттағы электр жетектерінің статикалық және механикалық сипаттамалары алынды. Электр қозғалтқышының қуаты артқан сайын үзік ток аймағының тарылып, үздіксіз ток аймағының кеңейетіні анықталды. Ток режимдерінің ауысуына сәйкес келетін импульстік түрлендіргіштің шектік толтыру коэффициенттері анықталып, олардың якорь тізбегінің уақыт тұрақтысына тәуелділігі әлсіз екені көрсетілді. Алынған нәтижелер ұсынылған гипотезаның дұрыстығын растайды және басқарылатын динамикалық тежеу режимдеріндегі электр жетектер туралы ғылыми түсініктерді толықтырады. Зерттеу нәтижелерін электр жетектерін жобалау мен автоматты басқару жүйелерін баптау кезінде қолдануға болады.

Түйін сөздер: электр жетегі; динамикалық тежеу; импульстік түрлендіргіш; үзік ток; механикалық сипаттама; имитациялық модельдеу

Дәйексөздер үшін: А.Б. Абзалханов. Динамикалық тежеу режиміндегі реттелетін электр жетегінің статикалық сипаттамалары // Қазақстан өндіріс көлігі. 2026. Том. 23. № 89. 83–102 бет. (Орыс тіл.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.005>

Мүдделер қақтығысы: Авторлар осы мақалада мүдделер қақтығысы жоқ деп мәлімдейді.

СТАТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РЕГУЛИРУЕМОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА В РЕЖИМЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ТОРМОЖЕНИЯ

А.Б. Абзалханов

ТОО "Logistic Service Kazakhstan", Алматы, Казахстан.

E-mail: abzalkhanov.alimkhan@gmail.com

Алимхан Абзалханов — менеджер, ТОО "Logistic Service Kazakhstan", Алматы, Казахстан

E-mail: abzalkhanov.alimkhan@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-9773-575X>.

© А.Б. Абзалханов

Аннотация. Работа посвящена исследованию регулируемых электрических приводов постоянного и переменного тока в режиме управляемого динамического торможения с применением высокочастотных импульсных преобразователей. Повышение требований к энергоэффективности, надёжности и управляемости промышленных электроприводов обуславливает необходимость углублённого анализа процессов, протекающих в силовой части привода при торможении, а также оценки влияния режимов прерывистого и непрерывного тока на его статические и механические характеристики. Целью исследования является обоснование параметров силовой части регулируемого электропривода и определение границ устойчивого рабочего диапазона импульсных преобразователей в режиме динамического торможения. Для достижения цели решены задачи выбора схемных решений, разработки имитационных моделей, исследования статических, регулирующих и механических характеристик, а также определения граничных значений скважности импульсных преобразователей. С использованием аналитических методов и имитационного моделирования в среде MATLAB–Simulink получены семейства статических и механических характеристик электроприводов различной мощности. Установлено, что с увеличением мощности электрического двигателя область прерывистого тока существенно сужается, а область непрерывного тока расширяется. Определены граничные значения скважности импульсных преобразователей, соответствующие переходу между режимами тока, и показано, что в широком диапазоне мощностей они слабо зависят от постоянной времени якорной цепи и в основном определяются величиной ЭДС. Полученные результаты подтверждают выдвинутую гипотезу и расширяют научные представления о режимах управляемого динамического торможения. Практическая значимость работы заключается в возможности использования полученных зависимостей при проектировании и настройке систем автоматического регулирования электроприводов.

Ключевые слова: электрический привод; динамическое торможение; импульсный преобразователь; прерывистый ток; механическая характеристика; имитационное моделирование

Для цитирования: А.Б. Абзалханов. Статические характеристики регулируемого электропривода в режиме динамического торможения // Промышленный транспорт Казахстана. 2026. Т. 23. No. 89. Стр. 83–102. (На рус.). <https://doi.org/10.58420/ptk/2026.89.01.005>

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Введение

Современное развитие электроприводов промышленного назначения характеризуется широким внедрением регулируемых систем с использованием силовой полупроводниковой электроники. Особое место в таких системах занимают режимы торможения, в частности режим управляемого динамического торможения, который широко применяется в металлургии, горнодобывающей промышленности, транспортных установках и технологических комплексах с повышенными требованиями к безопасности, энергоэффективности и точности управления.

Несмотря на значительное количество исследований, посвящённых регулируемым электроприводам постоянного и переменного тока, вопросы, связанные с влиянием импульсных преобразователей на статические и механические характеристики электропривода в режиме динамического торможения, остаются недостаточно изученными. В частности, отсутствует единый подход к определению границ рабочего диапазона импульсных преобразователей, условий перехода между режимами прерывистого и непрерывного тока, а также к оценке влияния параметров якорной цепи и управляющих воздействий на устойчивость тормозных режимов.

Актуальность настоящего исследования обусловлена необходимостью повышения надёжности и эффективности регулируемых электроприводов за счёт обоснованного выбора элементов силовой части, оптимизации режимов работы импульсных преобразователей и уточнения методик имитационного моделирования. Практическая значимость работы заключается в возможности применения полученных результатов при проектировании и настройке систем автоматического регулирования электроприводов, работающих в режиме динамического торможения, с использованием высокочастотных импульсных преобразователей (Bołtowski, 2020: 15–421; Gabriel, 2021: 37; Bauer, 2020: 24; Shimizu, 2018: 2; Zhang, 2020: 648–655).

Объектом исследования является регулируемый электрический привод постоянного и переменного тока в режиме управляемого динамического торможения.

Предметом исследования являются статические, регулирующие и механические характеристики электропривода, формируемые при работе импульсных преобразователей в силовой части якорной (или статорной) цепи.

Целью исследования является разработка и анализ имитационных моделей регулируемых электроприводов для обоснования параметров силовой части и определения граничных условий устойчивой работы в режиме управляемого динамического торможения.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- анализ и выбор основных схемных решений силовой части электропривода в режиме регулируемого динамического торможения;
- разработка имитационных моделей и программных средств для исследования статических и динамических характеристик электроприводов;
- определение рабочего диапазона импульсного преобразователя, обходящего якорную цепь, и установление граничных значений скважности;
- исследование влияния параметров импульсного преобразователя и индуктивных элементов цепи якоря на характеристики электропривода;
- анализ механических характеристик электроприводов различной мощности в режимах прерывистого и непрерывного тока.

Методы исследования включают аналитические методы теории электрических цепей и электромеханических систем, а также методы имитационного моделирования с использованием программных пакетов MATLAB и Simulink (включая библиотеки SimPowerSystems). В процессе работы применялись численные методы интегрирования дифференциальных уравнений с переменным шагом, обеспечивающие адекватный учёт нелинейных процессов в силовых полупроводниковых устройствах.

Научная новизна работы заключается в установлении закономерностей перехода электропривода из режима прерывистого тока в режим непрерывного при динамическом торможении, а также в получении алгебраических зависимостей граничных значений скважности импульсных преобразователей, слабо зависящих от постоянной времени якорной цепи в широком диапазоне мощностей.

Практическая значимость состоит в возможности использования полученных зависимостей и рекомендаций при проектировании регулируемых электроприводов и синтезе систем автоматического регулирования, обеспечивающих устойчивое и энергоэффективное динамическое торможение.

Материалы и методы исследования

Методология исследования направлена на комплексное изучение процессов, протекающих в регулируемых электрических приводах постоянного и переменного тока в режиме управляемого динамического торможения, с учётом влияния импульсных преобразователей на их статические, регулирующие и механические характеристики.

В рамках работы рассматривались следующие основные исследовательские вопросы:

- каким образом параметры импульсного преобразователя и якорной цепи электрического двигателя влияют на статические и механические характеристики электропривода в режиме динамического торможения;

- каковы граничные условия перехода электропривода от режима прерывистого тока к режиму непрерывного;

- как изменяется рабочий диапазон импульсного преобразователя при варьировании мощности электрического двигателя и значений ЭДС якоря;

- в какой степени параметры индуктивных и активных элементов силовой части определяют устойчивость и жёсткость механических характеристик электропривода.

В качестве рабочей гипотезы принято положение о том, что устойчивость и рабочий диапазон регулируемого электропривода в режиме динамического торможения в значительной степени определяются режимом тока якорной (или статорной) цепи, а граничные значения скважности импульсного преобразователя слабо зависят от постоянной времени якорной цепи в широком диапазоне мощностей электрических машин. Предполагается, что переход от режима прерывистого тока к режиму непрерывного может быть описан аналитической зависимостью, подтверждаемой средствами имитационного моделирования.

Исследование проводилось в несколько последовательных этапов:

- Аналитический этап, включающий анализ известных схемных решений регулируемых электроприводов в режиме динамического торможения, а также теоретическое описание процессов в якорной цепи при использовании импульсных преобразователей.

- Этап разработки имитационных моделей, на котором создавались математические и структурные модели электроприводов постоянного и переменного тока с независимым возбуждением и частотным управлением. Модели учитывали нелинейные элементы, импульсные режимы работы силовых ключей и реальные параметры электрических машин.

- Этап имитационных экспериментов, включающий исследование статических, регулирующих и механических характеристик электроприводов различной мощности, а также определение граничных значений скважности импульсных преобразователей.

- Этап обработки и анализа результатов, на котором выполнялась интерпретация полученных зависимостей, сравнительный анализ характеристик для различных мощностей и формулировка обобщённых выводов.

Материалом исследования являлись:

- математические модели регулируемых электроприводов постоянного тока с независимым возбуждением мощностью 5,5; 15; 30 и 68 кВт;

- модели асинхронных электроприводов с частотным управлением в диапазоне мощностей от 4 до 160 кВт;

- параметры якорных и статорных цепей электрических машин, включая активные сопротивления, индуктивности, ЭДС и электромеханические постоянные времени;

- результаты имитационных экспериментов, полученные в среде MATLAB–Simulink.

Характеристика материала исследования носит как качественный, так и количественный характер. Качественный анализ включал изучение форм характеристик, областей устойчивости и режимов работы, тогда как количественный анализ основывался на вычислении токов, напряжений, моментов, угловых скоростей и коэффициентов жёсткости в относительных и абсолютных единицах. Выбор диапазонов параметров и мощности электрических машин обеспечивает репрезентативность и достоверность полученных выводов.

В работе использовались следующие методы:

- аналитические методы теории электрических цепей и электромеханических систем для вывода уравнений состояния и установления функциональных зависимостей;

- методы имитационного моделирования, реализованные в программных пакетах MATLAB 7.01 – Simulink 6.1 и MATLAB 7.0 (R2010b) – Simulink 7, с применением библиотек SimPowerSystems;

- численные методы интегрирования дифференциальных уравнений, включая одношаговый метод Рунге–Кутты второго и третьего порядка (ode23tb) с переменным шагом интегрирования;

- графоаналитические методы для определения жёсткости механических характеристик и анализа переходных границ режимов работы;

- методы сравнительного анализа для сопоставления характеристик электроприводов различной мощности и типов.

При проведении имитационных экспериментов максимальный шаг интегрирования выбирался с учётом наименьших постоянных времени исследуемых систем и частоты коммутации импульсных преобразователей, что обеспечивало допустимую погрешность моделирования и корректный учёт нелинейных процессов.

Новизна используемых материалов и методов заключается в совместном применении аналитических зависимостей и имитационных моделей для определения граничных значений скважности импульсных преобразователей, а также в исследовании их слабой зависимости от постоянной времени якорной цепи в широком диапазоне мощностей электрических машин.

Результаты и обсуждение

Для выбора элементов силовой части регулируемого электропривода в режиме динамического торможения, определения границ рабочего диапазона и оценки влияния управляющих воздействий на статические характеристики решаются следующие задачи (Terzić, 2016: 117–123; Кудрявцев, 2007: 86–90; Мещеряков, 2015: 175–17; Isembergenov, 2018: 59–66; Демина, 2019: 50):

Выбор основных вариантов схемных решений силовой части электропривода в режиме регулируемого динамического торможения.

Разработка имитационных моделей и программ для проведения экспериментов.

Определение рабочего диапазона импульсного преобразователя, обходящего якорную цепь, для обеспечения устойчивого торможения.

Исследование влияния работы импульсного преобразователя в цепи якоря электрического двигателя на статические и динамические характеристики электропривода.

Изучение регулирующих и механических характеристик статической части электропривода.

Для определения статических характеристик применялись аналитические методы и методы имитационного моделирования. Экспериментальное моделирование проводилось с использованием программного пакета MATLAB 7.01 – Simulink 6.1 и MATLAB 7.0 (R2010b) – Simulink 7. В ходе имитационных экспериментов было установлено, что параметры индуктивных компонентов цепи якоря электрического двигателя существенно влияют на статические характеристики постоянного тока электропривода при работе с импульсным широтно-импульсным преобразователем (ШИМ).

Для определения статических характеристик электропривода с помощью MATLAB–Simulink предлагается следующий метод имитационного эксперимента:

Использовать метод интеграции, учитывающий нелинейные динамические связи, такие как «импульсный преобразователь», с применением широтно-импульсной модуляции.

Рекомендуется применять одношаговый метод Рунге–Кутты второго и третьего порядка, называемый ode23tb.

Для сокращения времени эксперимента предлагается использовать метод с переменным шагом интегрирования. При проведении имитационных экспериментов с

полупроводниковыми силовыми элементами опыт показывает, что ограничение ставится только на максимальный шаг интеграции, а минимальный шаг выбирается автоматически.

Выбор максимального значения шага интегрирования определяется следующими условиями:

- шаг не должен превышать 0,1 от наименьшей временной постоянной исследуемой системы;
- для случая применения широтно-импульсной модуляции размер шага не должен превышать значение, определённое диапазоном регулирования и частотой коммутации импульсного преобразователя.

В таблице 1 приведены рекомендуемые значения максимального шага интегрирования для имитационного моделирования регулируемых электроприводов постоянного тока (РЭПТ) с импульсными частотными преобразователями для различных классов машин и механизмов.

Таблица 1 – Рекомендуемые значения максимального шага интегрирования

Вид преобразователя	Режим работы привода	Диапазон контроля	Коммутационная частота преобразователя	Рекомендуемый максимальный шаг интеграции
Импульсно-импульсный модулятор с высокочастотным импульсным преобразователем	Динамическое торможение	1:100	1 кГц	0,01 мкс

Таблица показывает тип преобразователя, режим работы привода, диапазон регулирования, частоту коммутации преобразователя и рекомендуемый максимальный шаг интегрирования. Для высокочастотного импульсного преобразователя с импульсной модуляцией в режиме динамического торможения с диапазоном регулирования 1:100 и частотой коммутации 1 кГц рекомендуется использовать максимальный шаг интегрирования 0,01 мкс. Это рекомендуется для обоснования допустимой погрешности моделирования.

Величина погрешности зависит от ожидаемых максимальных значений сигналов. Рекомендуемое соотношение составляет 0,01–0,001 от максимального значения токового и напряженческого сигналов в цепи силовой части электропривода.

Время моделирования задается значениями начала и окончания исследуемого процесса.

При получении статических характеристик моделей, включая типичные динамические звенья, скорость изменения заданного линейного возмущения определяется необходимостью снижения влияния динамических процессов в электромеханической части двигателя на статические характеристики РЭПТ.

На рисунке 1 приведена обобщённая функциональная схема модели РЭПТ для исследования статических характеристик.

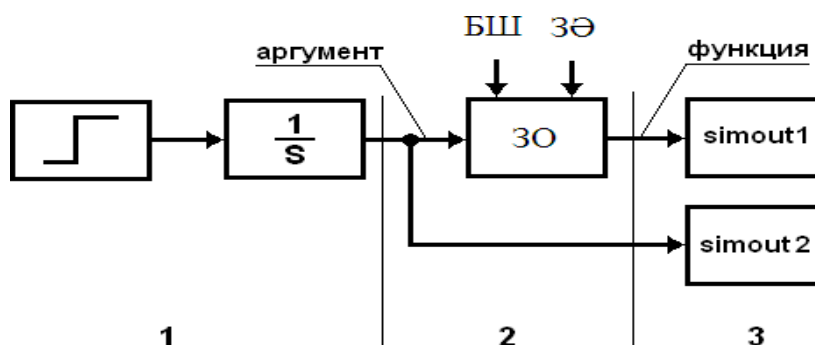


Рис. 1. Обобщённая функциональная схема модели для исследования статических характеристик электропривода

В функциональной схеме (Рис. 1) соответствующие блоки и координаты имеют следующие функциональные назначения:

- 1 – определитель линейно изменяющегося управляющего воздействия;
- 2 – исследуемый объект (ИО), начальные условия (НУ), вредное воздействие (ВВ);
- 3 – комплекс регистрации и измерений.

Значение постоянной составляющей на входе интегратора, формирующего заданное линейное изменение воздействия, выбирается по условию достижения аргументом номинального значения к концу периода моделирования. Для электропривода средней мощности рекомендуемые значения периода моделирования можно получить из соотношения (1).

$$\Delta t = 4 T_{\max \text{ОИ}} \quad (1)$$

Здесь Δt — длительность переходного временного интервала, $T_{\max \text{ОИ}}$ — максимальная постоянная времени исследуемого объекта. Конкретные характеристики исследуемого объекта, такие как входные и выходные координаты, начальные условия, диапазоны изменения, а также значения управляющих воздействий и возмущений определяются для каждой отдельной задачи имитационного моделирования. При решении различных задач в процессе моделирования эти параметры могут изменяться в зависимости от их характера.

Для анализа зависимости интегрального значения тока якоря от управляющего сигнала импульсного преобразователя в силовой части электропривода с независимым возбуждением электрического двигателя была создана имитационная модель неизменяемой части, показанная на рисунке 2.

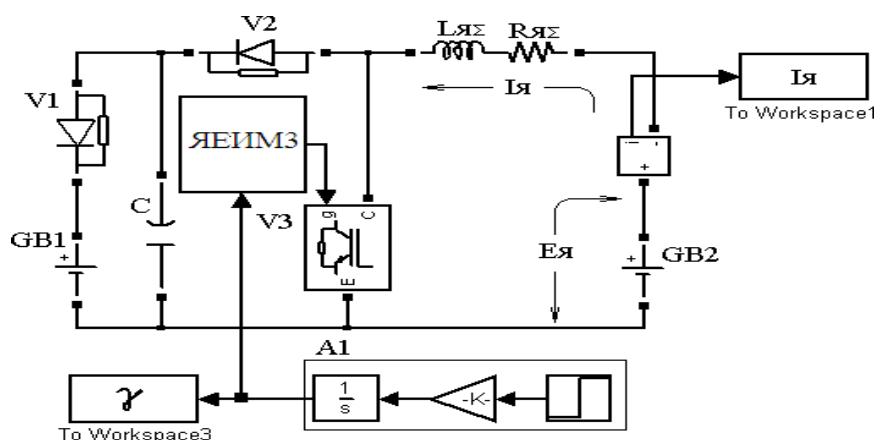


Рис. 2. Имитационная модель неизменяемой части электропривода с ограничением напряжения на конденсаторе

Блок A1 предназначен для формирования линейно изменяющегося управляющего воздействия.

Модель якорной электрической цепи электродвигателя включает активное сопротивление $R_{\text{я}}$, источник постоянного напряжения – GB2, модель ЭДС якоря. Управление режимом торможения осуществляется с помощью импульсного преобразователя V3, обозначенного как E3, и диода V2. В имитационной модели имеется нелинейная обратная связь, состоящая из элементов GB1 и V1. Регистрация зависимости тока якоря от управляющего сигнала осуществляется через блоки to workspace 3 и to workspace 1. Регулирующие характеристики снимаются при неизменных значениях постоянной ЭДС якоря в каждом эксперименте. Моделирование проводилось на примере электродвигателей номинальной угловой скорости 1500 об/мин и мощностями 5,5; 15; 30 и 68 кВт. В таблице 1 приведены технические характеристики электродвигателей. Результаты

имитационных экспериментов для соответствующих электродвигателей представлены на рисунке 3.

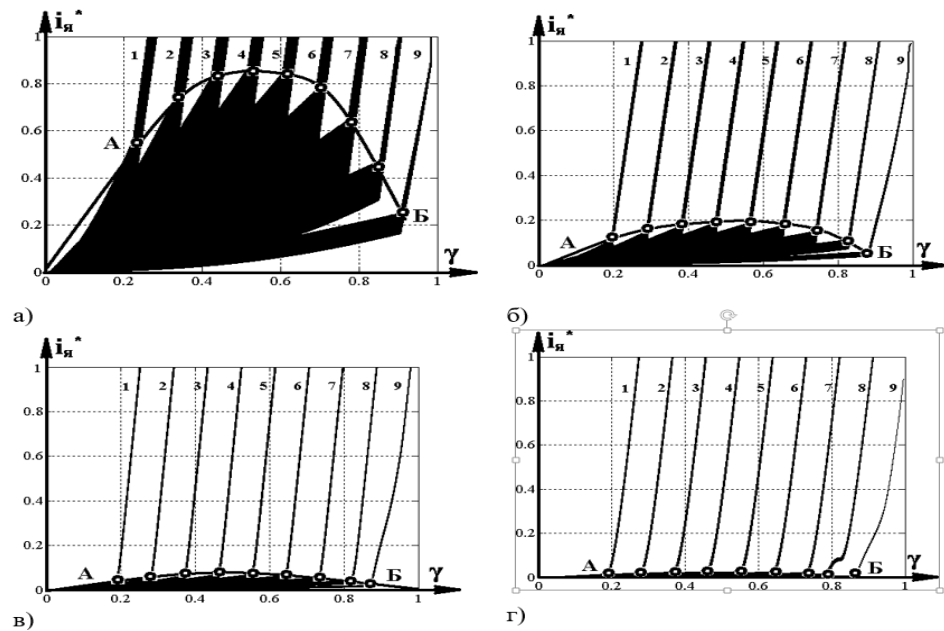


Рис. 3. Регулирующие характеристики электропривода по току якоря в скажонной функции импульсного преобразователя

Регулирующие характеристики приведены для различных значений напряжения ΔU_n .

$$\square U_n = U_{c.\max} - E_{\text{я}}, \quad (2)$$

Соответствие количества регулирующих характеристик и значений разницы напряжений U_1 приведено в таблице 2.

Таблица 2. Соответствие значений U_n и регулирующих характеристик

№ характеристики	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\square U, \text{В}$	50	100	150	200	250	300	350	400	450

В регулирующих характеристиках имеются две области: прерывистого и непрерывного тока. В нижней части характеристик, ограниченной дугами А–Б, электрический привод работает в режиме прерывистого тока, а в верхней части — в режиме непрерывного тока. При увеличении мощности электрического привода происходят следующие изменения: область прерывистого тока сужается, а область непрерывного тока расширяется. Это объясняется увеличением общей индуктивности якорной цепи и уменьшением её общего активного сопротивления (Рис. 3). При увеличении значения U_n переход от режима прерывистого тока к режиму непрерывного тока происходит при более высокой величине скажности, что указывает на сужение диапазона работы преобразователя при возрастании значения U_1 . Для расширения диапазона работы импульсного преобразователя V3–E3 (Рис. 3) необходимо уменьшить значение U_1 .

Граничное значение якорного тока, при котором происходит переход от режима двигателя к режиму торможения, сильно зависит от скажности преобразователя V3–E3 (Рис. 2) и достигает максимума при $\gamma = 0,5$. Это связано с наибольшей амплитудой пульсаций якорного тока, вызванной работой импульсного преобразователя V3 (Рис. 2), когда времена замкнутого и разомкнутого состояний ключа V3 совпадают, что

Результаты имитационных экспериментов показаны на рисунке 5

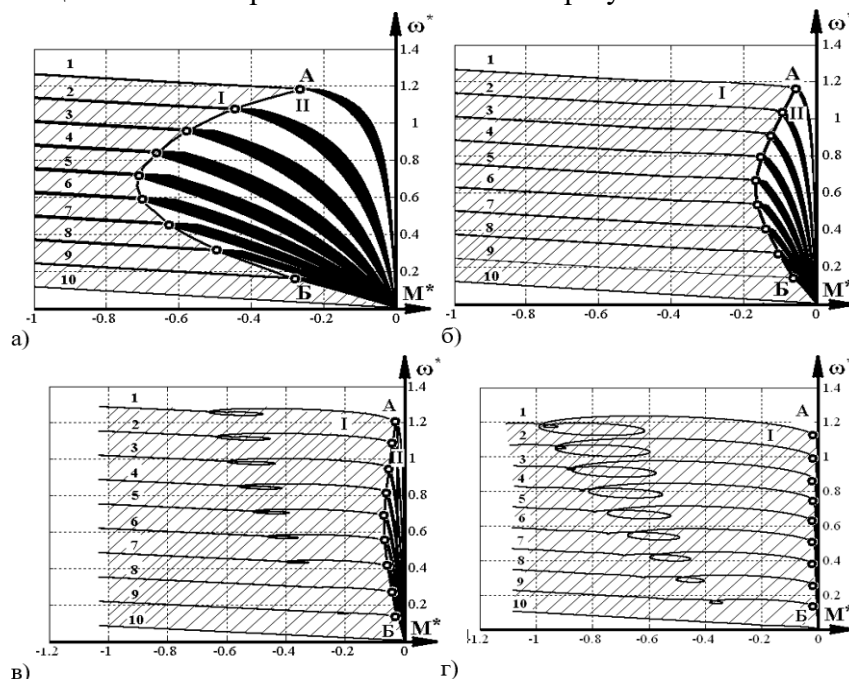


Рис. 5. Механические характеристики электрического привода с независимым возбуждением

Механические характеристики электрического привода с независимым возбуждением в режиме управляемого динамического торможения имеют две отчетливо выраженные области: область I, соответствующая непрерывному току, и область II — прерывистого тока, которые разделены между собой дугой "А–Б".

В режиме непрерывного тока механические характеристики для одного типа электрического двигателя располагаются параллельно друг другу в пределах одной диаграммы. В связи с этим жесткость характеристики можно определить, рассматривая вариант с полностью открытым транзистором VT2 в схеме импульсного преобразователя ЕИМ2–VT2 при любом значении скважности.

По мере увеличения мощности электрического привода область применения прерывистого тока уменьшается. Для привода мощностью 68 кВт установить режим непрерывного тока на всём диапазоне крутящего момента и значениях скважности импульсного преобразователя оказалось невозможным. В режиме непрерывного тока механическая жёсткость значительно выше, чем в режиме прерывистого тока, и разница в механической жёсткости между этими двумя режимами возрастает с увеличением электрической мощности.

Эти особенности механических характеристик необходимо учитывать при синтезе систем автоматического регулирования электрических приводов в режиме динамического торможения с использованием высокочастотных импульсных преобразователей.

Следует отметить, что в управляемом режиме торможения в приводе постоянного тока наблюдаются следующие явления: – изменение коэффициента передачи при переходе от режима прерывистого тока к непрерывному; – при этом с увеличением мощности электродвигателя область прерывистого тока существенно уменьшается, однако величина коэффициента передачи возрастает.

Установлено, что в процессе имитационных экспериментов режим прерывистого тока характерен для электрического привода в режиме динамического торможения, реализуемом с использованием обходной цепи якорного контура через импульсный преобразователь. В связи с этим возникает важная задача — определить граничные значения скважности импульсного преобразователя, описывающие переход от режима прерывистого тока к непрерывному.

Для реализации режима динамического торможения была разработана схема включения регулируемого электрического привода, показанная на рисунке 6.

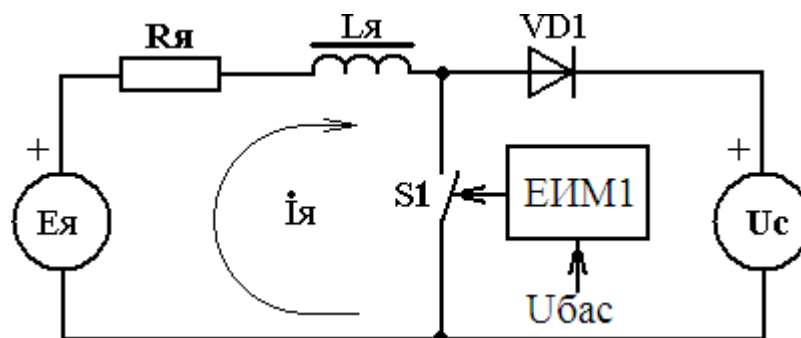


Рис. 6. Схема переключения регулируемого электрического привода в режиме динамического торможения

На рисунке 6 представлена схема переключения электрического привода в режиме динамического торможения. Коммутационный цикл импульсного преобразователя состоит из двух временных интервалов: – t_1 соответствует замкнутому состоянию силового ключа S1, – t_2 — открытому состоянию.

В течение первого интервала T_1 , при непрерывном токе на каждом этапе, начальные условия якорного тока принимают нулевые значения.

Для дальнейшего исследования перехода электрического привода от режима прерывистого тока к режиму непрерывного тока и определения области граничных значений скважности использовался численный метод. Исследование выполнено с использованием средств имитационного моделирования в среде MATLAB. Модель, применяемая в исследовании, показана на рисунке 7.

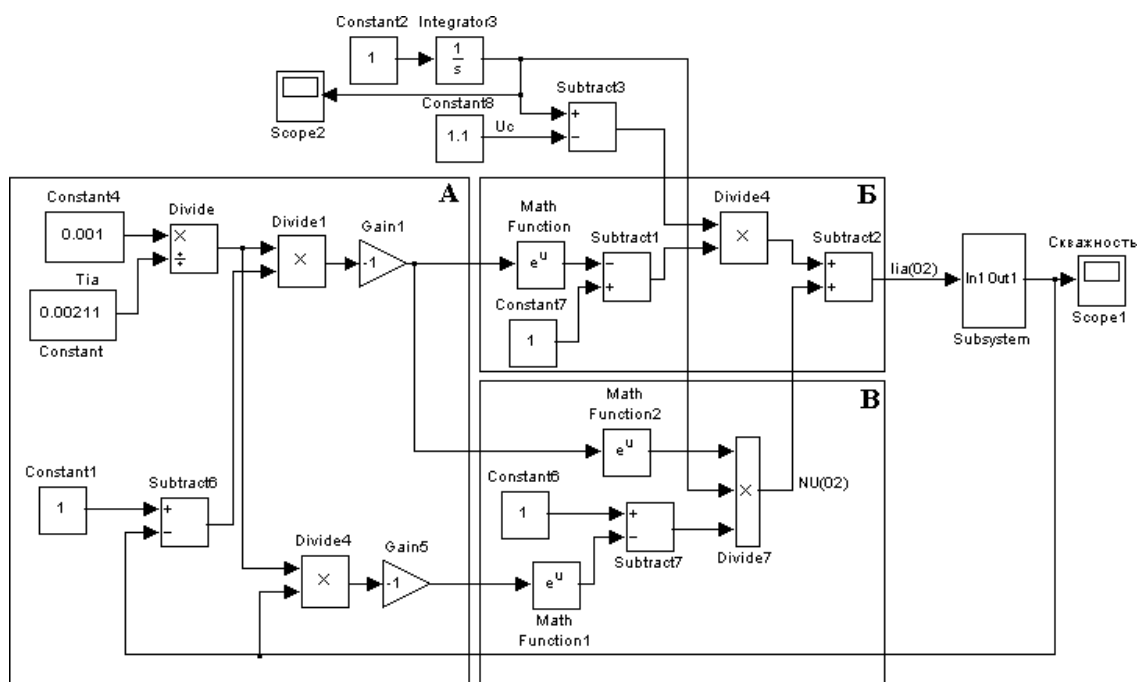


Рис. 7. Имитационная модель расчёта граничного значения скважности импульсного преобразователя в зависимости от ЭДС якоря

В блоке «А» рассчитываются значения показателей степени двух слагаемых выражения (8). Первое слагаемое моделируется с помощью блока «В», второе — с помощью блока «в». Линейное возрастание значения ЭДС якоря формируется с использованием блоков Constant2 и Integrator3.

Для заданного постоянного значения времени якоря, в соответствии с таблицей 4, с целью расчёта граничного значения скважности и обеспечения выполнения условия, выражение (10), а также модель выражения (12), реализованы в виде блока Subsystem на рисунке 7 и дополнены отрицательной обратной связью с интегральным законом.

В результате имитационного эксперимента была получена графическая зависимость граничного значения скважности от постоянной времени якоря и ЭДС.

Таблица 4 – Значения постоянной времени якоря для имитационных экспериментов с 1 по 8.

№ И.Э.	1	2	3	4	5	6	7	8
Дви гатель (Р,кВт)	–	4ПФ112S (5,5)	4ПФ132S (15)	–	4ПФ160S (30)	–	–	4ПФ180 М (68)
Тя, мС		2,11	9,44		39			154

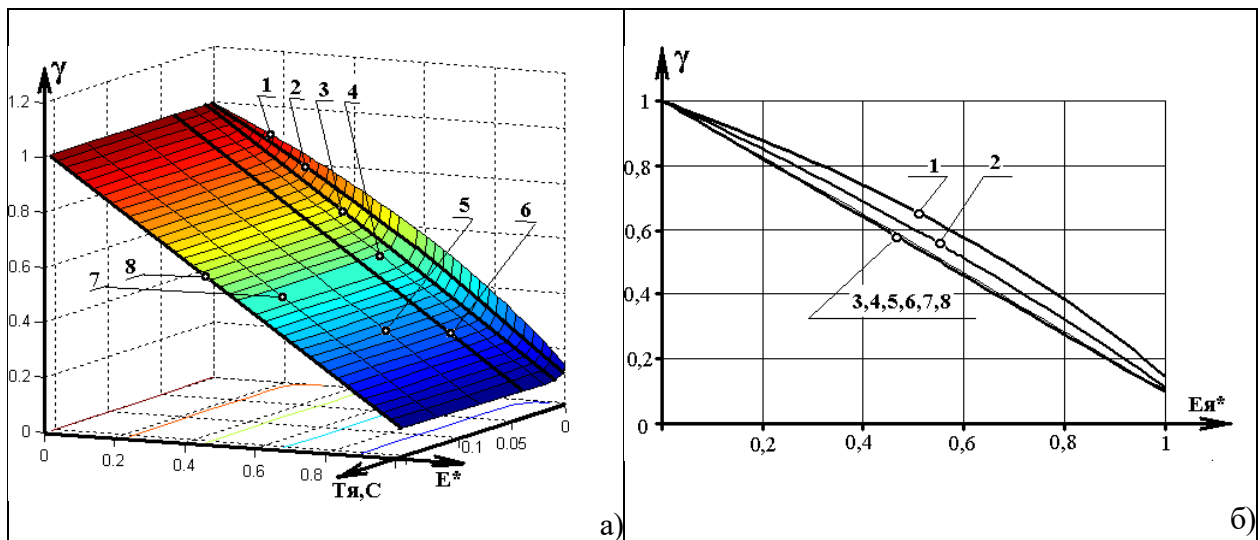


Рис. 8. Граничные значения скважности

На рисунке 8а представлены граничные значения скважности для электрического привода в режиме прерывистого тока. На рисунке 8б показаны проекции зависимости скважности импульсного преобразователя от ЭДС якоря. В целях изучения этих зависимостей были проведены имитационные эксперименты.

Для электродвигателей с постоянным соотношением времени импульса 0,1 с временем, граничные значения скважности демонстрируют почти линейную зависимость от ЭДС якоря. Однако на практике эти значения практически не зависят от значения постоянной времени. Для подтверждения этого вывода были построены проекции зависимости скважности от ЭДС якоря при различных значениях постоянной времени якоря с использованием табличного редактора Excel. Максимальная ошибка между зависимостями для скважности при значениях 0,009469 с и 0,1541 с не превысила 1 %.

Таким образом, для регулируемого привода постоянного тока в режиме динамического торможения получена алгебраическая зависимость граничных значений скважности импульсного преобразователя S1–EIM1 (11) в области значений постоянной времени якорной цепи.

В управляемом режиме динамического торможения была разработана имитационная модель асинхронного электрического привода в среде MatLab 7.01 для определения его регулировочных характеристик. Модель показана на рисунке 9.

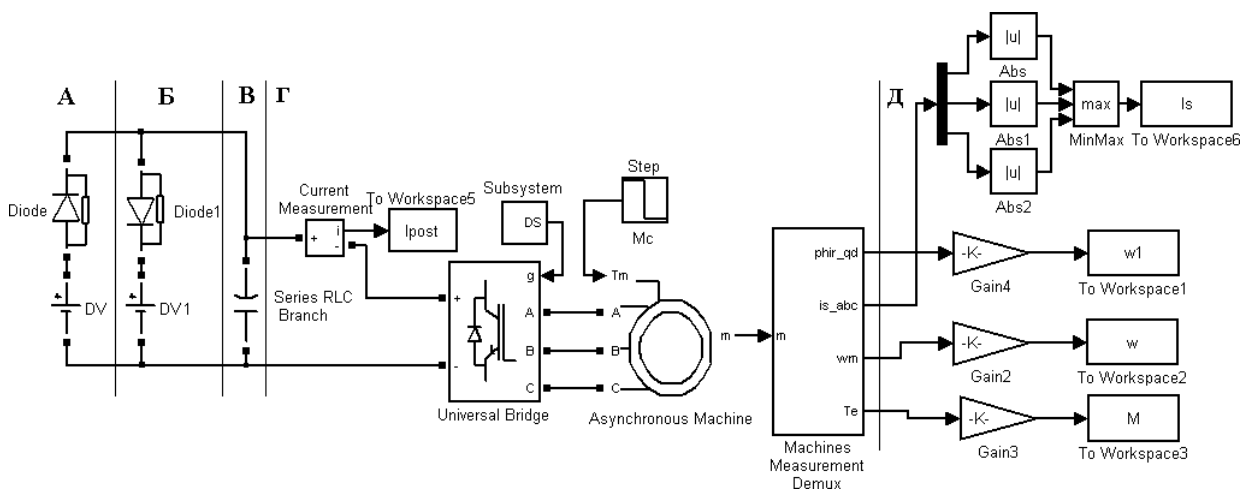


Рис. 9. Модель моделирования асинхронного электрического привода в режиме динамического торможения

В модели моделирования группы элементов объединены в функционально завершённые блоки, выполняющие следующие функции:

Блок "А" моделирует начальные условия напряжения на конденсаторе последовательной RLC-ветви;

Блок "Б" реализует функции ограничения напряжения на этом конденсаторе;

Блок "Г" содержит модель электродвигателя с инвертором и системой управления;

Блок "Д" включает регистрирующее оборудование с элементами масштабирования и преобразования зафиксированных сигналов.

Нелинейная цепь сектора "А" модели задаёт начальные условия напряжения на обкладках конденсатора, а в секторе "Б" реализована модель ограничения напряжения на конденсаторе C1, который находится в секторе "В".

Во время моделирования момент вращения двигателя задаётся через блок Step. Для питания асинхронного двигателя через Subsystem формируется трёхфазное напряжение с управляемыми частотой и амплитудой.

В ходе имитационного эксперимента были зафиксированы зависимости следующих параметров:

Угловая скорость электрического привода,

Модуль тока в обмотках статора двигателя,

Постоянный ток на входе автономного инвертора,

Электромагнитный момент в функции сигнала управления частотой питающего напряжения статора двигателя (Рис. 10).

Регулировочные характеристики асинхронного привода в режиме динамического торможения имеют два участка — "А" и "Б", которые различаются направлением тока в цепи постоянного напряжения (Рис. 10).

В области "Б" направление тока соответствует режиму, при котором энергия, вырабатываемая электродвигателем, расходуется на нагрев динамического тормозного резистора r_{tr_trt} (Рис. 10).

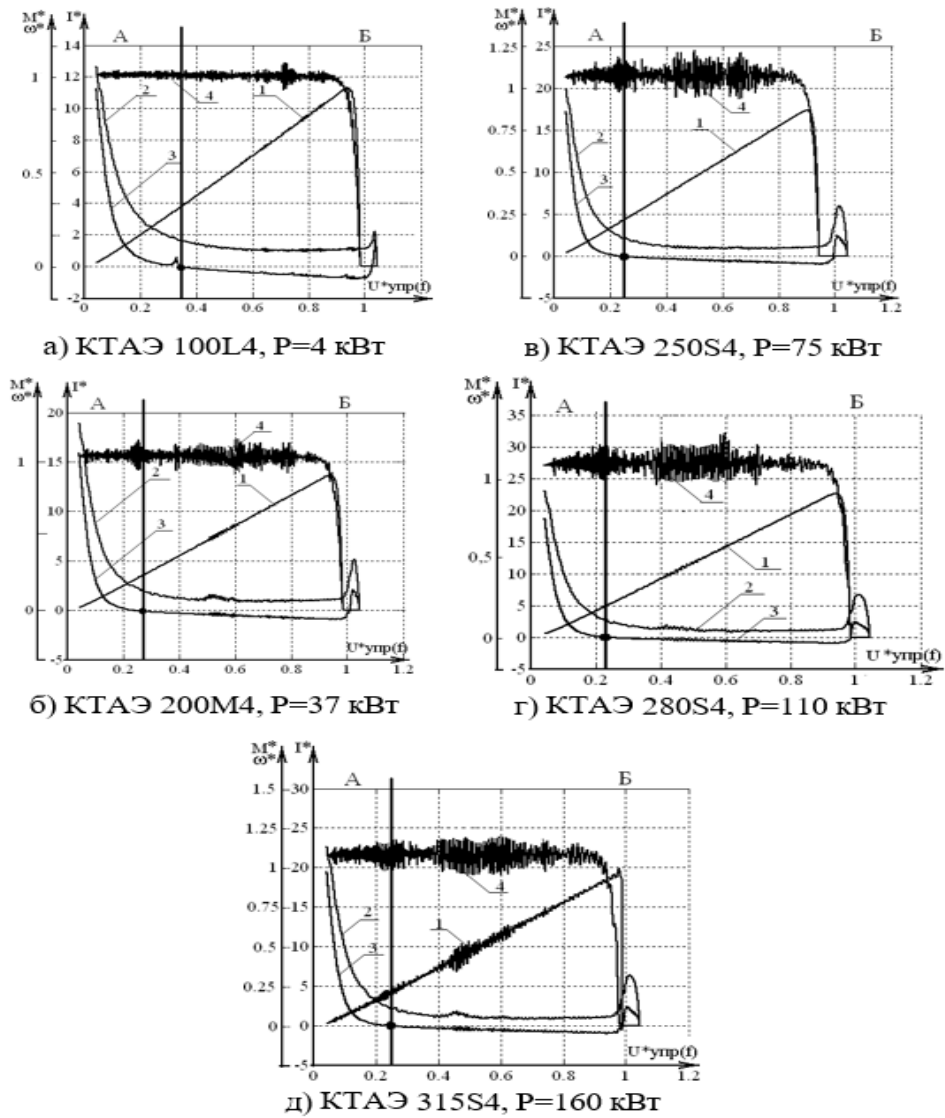


Рис. 10. Регулировочные характеристики асинхронного электрического привода в режиме динамического торможения

Здесь: m^* , ω^* , I^* — электромагнитный момент, угловая скорость и ток в статорной цепи соответственно в относительных единицах.

В этом случае управление режимом торможения через управляющий канал может быть реализовано в диапазоне 1:4 для электрических приводов мощностью более 37 кВт. Для приводов мощностью менее 37 кВт наблюдается незначительное сокращение диапазона регулирования. Так, для электрического привода мощностью 4 кВт диапазон регулирования в области "Б" составляет 1:3.

Технологический режим торможения может быть реализован в диапазоне не менее 1:20 в областях "А" и "Б". В области "А" режим торможения осуществляется исключительно за счёт потребления электроэнергии от внешнего источника.

Для получения механических характеристик электрического привода в исследуемом режиме была разработана имитационная модель электрического привода, приведённая на рисунке 11.

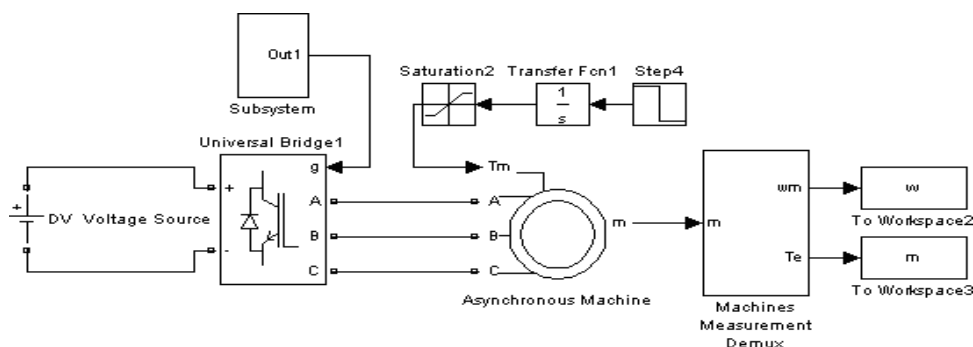


Рис. 11. Модель моделирования электрического привода для исключения механических характеристик в режиме генератора

Элементы модели моделирования выполняют следующие функции:

DV – источник постоянного напряжения;

Subsystem – система управления инвертором;

Universal Bridge 1 – управляемый инвертор;

Asynchronous Machine – модель асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором;

Machines Measurement Demux – формирователь выходных координат электродвигателя;

Saturation – блок ограничения максимального значения крутящего момента;

Transfer FCN1 – интегратор;

Step4 – блок, определяющий темп увеличения крутящего момента.

Инвертор Universal Bridge 1 смоделирован с использованием блока источника постоянного напряжения DC Voltage Source. Механические характеристики были получены для различных значений частоты напряжения обмоток статора, заданных в таблице 2, при условии, что амплитуда напряжения обмоток статора во всех имитационных экспериментах оставалась неизменной и соответствовала номинальной величине. В ходе имитационного эксперимента крутящий момент изменялся в соответствии с линейным законом, который формировался с помощью блоков Saturation 2, Transfer FCN1 и Step4. С целью уменьшения влияния интегрального закона изменения крутящего момента на искажение механической производительности, время интегратора transfer FCN1 было выбрано в два раза больше максимальной временной постоянной электродвигателя.

Таблица 5 – Соответствие номеров механических характеристик статора и частот напряжения.

№ характеристики	1	2	3	4	5
Частота напряжения обмоток статора, Гц	50	40	30	20	10

Для рассматриваемых типов электрических двигателей в результате имитационного моделирования получено семейство механических характеристик управляемого динамического торможения, представленных в секторе «А». Сравнительный анализ жесткости полученных механических характеристик был выполнен для асинхронных электроприводов с частотным управлением мощностью в диапазоне от 4 кВт до 160 кВт. Определение жесткости осуществлялось с помощью выражения и графоаналитического метода на линейных участках в секторе «А».

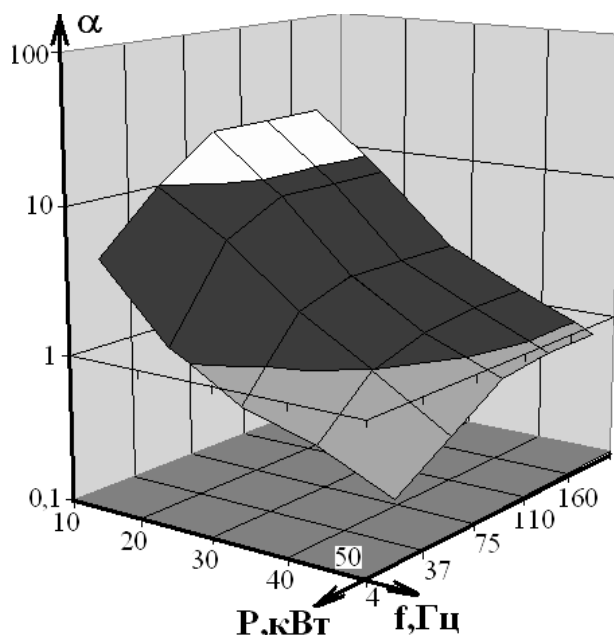


Рис. 12. Зависимость жесткости механической характеристики асинхронного электропривода от частоты напряжения на обмотках статора при различных значениях мощности.

Для электродвигателей с мощностью от 4 до 160 кВт при снижении частоты питающего напряжения обмоток статора наблюдается более чем десятикратное увеличение жесткости механической характеристики. В диапазоне мощности электродвигателя от 75 до 160 кВт жесткость практически не изменяется при одной и той же частоте напряжения, тогда как при уменьшении мощности привода от 75 кВт до 4 кВт жесткость напряжения снижается в 10 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной работе выполнено комплексное исследование регулируемых электрических приводов постоянного и переменного тока в режиме управляемого динамического торможения с использованием импульсных преобразователей. Основной целью исследования являлось обоснование параметров силовой части электропривода, определение границ устойчивого рабочего диапазона импульсных преобразователей и анализ влияния управляющих воздействий на статические, регулирующие и механические характеристики электрических машин различной мощности. Поставленная цель была реализована посредством сочетания аналитических методов и имитационного моделирования, что позволило получить достоверные и воспроизводимые результаты.

Для достижения поставленных задач была разработана совокупность имитационных моделей электроприводов постоянного тока с независимым возбуждением и асинхронных электроприводов с частотным управлением. В моделях учитывались реальные параметры якорных и статорных цепей, нелинейные характеристики силовых полупроводниковых элементов, режимы широтно-импульсной модуляции и влияние индуктивных компонентов цепи. Применение численных методов интегрирования с переменным шагом, адаптированных к особенностям импульсных режимов, обеспечило корректное воспроизведение динамических процессов и позволило получить статические характеристики с допустимой погрешностью моделирования.

В ходе исследования установлено, что параметры индуктивных и активных элементов якорной цепи оказывают существенное влияние на формирование статических и регулирующих характеристик электропривода в режиме динамического торможения. Показано, что при увеличении мощности электрического двигателя область работы в режиме прерывистого тока существенно сужается, тогда как область непрерывного тока

расширяется. Это обусловлено ростом суммарной индуктивности якорной цепи и снижением её активного сопротивления, что приводит к уменьшению амплитуды пульсаций тока и повышению устойчивости тормозного режима.

Получены семейства регулирующих характеристик по току якоря для электроприводов различной мощности при варьировании скважности импульсного преобразователя и значений разности напряжений между максимальным напряжением конденсатора и ЭДС якоря. Установлено, что при увеличении указанной разности напряжений переход от режима прерывистого тока к режиму непрерывного происходит при более высоких значениях скважности, что фактически сужает рабочий диапазон импульсного преобразователя. На основании этого сделан вывод о целесообразности уменьшения разности напряжений для расширения диапазона устойчивой работы силовой части электропривода в режиме динамического торможения.

Важным результатом исследования является определение граничных значений скважности импульсного преобразователя, соответствующих переходу электропривода от режима прерывистого тока к режиму непрерывного. С использованием имитационного моделирования и численных методов показано, что в широком диапазоне мощностей электрических машин и значений постоянной времени якорной цепи данные граничные значения демонстрируют слабую зависимость от инерционных параметров якоря и в основном определяются величиной ЭДС. Полученные зависимости подтверждают выдвинутую в работе гипотезу и позволяют упростить инженерные расчёты при проектировании регулируемых электроприводов.

Исследование механических характеристик электроприводов постоянного тока в режиме управляемого динамического торможения показало наличие двух отчётливо выраженных областей, соответствующих режимам непрерывного и прерывистого тока. Установлено, что в режиме непрерывного тока механические характеристики обладают значительно большей жёсткостью по сравнению с режимом прерывистого тока, причём разница в жёсткости возрастает с увеличением мощности электропривода. Данные особенности необходимо учитывать при синтезе систем автоматического регулирования, так как изменение режима тока приводит к скачкообразному изменению коэффициента передачи и динамических свойств системы.

В ходе работы также выполнено моделирование асинхронных электроприводов с частотным управлением в режиме динамического торможения. Показано, что регулировочные и механические характеристики асинхронного привода имеют два характерных участка, различающихся направлением потока энергии в цепи постоянного тока. Установлено, что для электроприводов мощностью более 37 кВт управление режимом торможения может быть реализовано в достаточно широком диапазоне, тогда как для приводов меньшей мощности наблюдается некоторое сокращение диапазона регулирования. Полученные зависимости жёсткости механических характеристик от частоты питающего напряжения и мощности двигателя подтверждают возможность эффективного управления тормозными режимами путём изменения частоты и амплитуды напряжения статора.

На основании выполненного исследования можно сделать вывод о том, что поставленные цели и задачи работы полностью реализованы, а выдвинутая гипотеза получила теоретическое и экспериментальное подтверждение. Полученные результаты вносят вклад в развитие научных представлений о режимах управляемого динамического торможения электрических приводов и уточняют условия устойчивой работы импульсных преобразователей в силовой части электропривода.

Практическая значимость результатов заключается в возможности их использования при проектировании и модернизации регулируемых электроприводов для промышленных установок, а также при разработке алгоритмов управления систем автоматического регулирования, работающих в режимах торможения. Предложенные зависимости и

рекомендации могут быть использованы для выбора параметров импульсных преобразователей, оценки допустимых диапазонов скажности и повышения надёжности тормозных режимов.

Перспективы дальнейших исследований связаны с расширением разработанных моделей на многодвигательные системы, учётом тепловых процессов в силовых элементах и электрических машинах, а также исследованием влияния цифровых систем управления и адаптивных алгоритмов регулирования на характеристики электроприводов в режиме динамического торможения. Кроме того, представляется целесообразным проведение натурных экспериментальных исследований для верификации полученных результатов и уточнения рекомендаций для конкретных промышленных применений.

ЛИТЕРАТУРА

- Bołtowski, 2020 — Bołtowski P., Król R., Nowak-Szpak A., Ozdoba M. Preliminary studies of the impact of a conveyor belt on the noise emission // Department of Mining, Faculty of Geoengineering, Wrocław University of Science and Technology. — Wrocław. — 2020. — P. 15–421. [Eng.]
- Gabriel, 2021 — Gabriel W., Ruysschaert Z. Making risk-informed decisions to optimize drilling operations using along-string measurements with wired drill pipe — a high-speed, high-quality telemetry alternative to traditional mud pulse telemetry. — Stavanger: University of Stavanger. — June 2021. — P. 37. [Eng.]
- Bauer, 2020 — Bauer S. Technology market leader and pioneer for innovations, at the same time down-to-earth with responsibility towards society and environment — that's our goal. — Schrobhausen: BAUER Maschinen GmbH. — 2020. — P. 24. [Eng.]
- Shimizu, 2018 — Shimizu T., Kunomura K., Kai M., Miyajima H., Matsui T. Study for further introduction of the electronic frequency converters to the Tokaido Shinkansen // IEEE International Power Electronics Conference (IPEC–Niigata 2018 – ECCE Asia). — 2018. — P. 2. [Eng.]
- Zhang, 2020 — Zhang B., Li L., Qiu Y., Dai Q., Li S., Deng Y. Application of electric drive fracturing equipment in shale gas reservoir stimulation // Natural Gas Industry B. — 2020. — Vol. 7. — Issue 6. — P. 648–655. [Eng.]
- Terzić, 2016 — Terzić B., Despalatović M., Majić G., Stergulc M., Kriletić A., Šormaz K. Razvoj pretvarača frekvencije za visokobrzinske generatore s permanentnim magnetima u kogeneracijskim postrojenjima // Tehnički glasnik. — 2016. — Vol. 10. — № 3–4. — P. 117–123. [Croat.]
- Кудрявцев, 2007 — Кудрявцев А. В. Исследование преобразователя частоты регулируемого электропривода на базе четырехуровневого инвертора напряжения // Записки Горного института. — Санкт-Петербург. — 2007. — Т. 173. — С. 86–90. [Russ.]
- Мещеряков, 2015 — Мещеряков В. Н. и др. Разработка и исследование частотного асинхронного электропривода // Системы промышленных электроприводов переменного тока (ЭППТ-2015): материалы конф. — Екатеринбург. — 05–09 октября 2015 г. — С. 175–178. [Russ.]
- Isembergenov, 2018 — Isembergenov N. T. Power frequency converter built on transistors // Ural Radio Engineering Journal. — 2018. — Vol. 2. — № 1. — P. 59–66. [Eng.]
- Демина, 2019 — Демина Г. А. Оборудование «Силовых машин» для горнодобывающей промышленности // Горная промышленность. — 2019. — № 6. — С. 50. [Russ.]

REFERENCES

- Bołtowski, 2020 — Bołtowski, P., Król, R., Nowak-Szpak, A., Ozdoba, M. (2020). Preliminary studies of the impact of a conveyor belt on the noise emission. — Wrocław: Department of Mining, Faculty of Geoengineering, Wrocław University of Science and Technology. — 2020. — Pp. 15–421. [in Eng.]
- Gabriel, 2021 — Gabriel, W., Ruysschaert, Z. (2021). Making risk-informed decisions to optimize drilling operations using along-string measurements with wired drill pipe — a high-speed, high-quality telemetry alternative to traditional mud pulse telemetry. — Stavanger: University of Stavanger. — June 2021. — Pp. 37. [in Eng.]
- Bauer, 2020 — Bauer, S. (2020). Technology market leader and pioneer for innovations, at the same time down-to-earth with responsibility towards society and environment — that's our goal. — Schrobhausen: BAUER Maschinen GmbH, 2020. — Pp. 24. [in Eng.]
- Shimizu, 2018 — Shimizu, T., Kunomura, K., Kai, M., Miyajima, H., Matsui, T. (2018). Study for further introduction of the electronic frequency converters to the Tokaido Shinkansen // IEEE International Power Electronics Conference (IPEC–Niigata 2018 – ECCE Asia). — 2018. — Pp. 2. [in Eng.]
- Zhang, 2020 — Zhang, B., Li, L., Qiu, Y., Dai, Q., Li, S., Deng, Y. (2020). Application of electric drive fracturing equipment in shale gas reservoir stimulation // Natural Gas Industry B. — 2020. — Vol. 7, No. 6. — Pp. 648–655. [in Eng.]
- Terzić, 2016 — Terzić, B., Despalatovic, M., Majic, G., Stergulc, M., Kriletic, A., Šormaz, K. (2016). Razvoj pretvarača frekvencije za visokobrzinske generatore s permanentnim magnetima u kogeneracijskim postrojenjima [Development of frequency converters for high-speed permanent magnet generators in cogeneration plants] // Tehnicki glasnik. — 2016. — Vol. 10, No. 3–4. — Pp. 117–123. [in Croat.]
- Kudryavtsev, 2007 — Kudryavtsev, A.V. (2007). Issledovanie preobrazovatela chastoty reguliruemogo elektroprivoda na baze chetyrehurovnevoogo invertora napryazheniya [Study of a frequency converter for a controlled electric drive based on a four-level voltage inverter] // Zapiski Gornogo instituta. — Saint Petersburg, 2007. — Vol. 173. — Pp. 86–90. [in Russ.]
- Meshcheryakov, 2015 — Meshcheryakov, V.N. et al. (2015). Razrabotka i issledovanie chastotnogo asinkhronnogo elektroprivoda [Development and research of a variable-frequency asynchronous electric drive] // Sistemy promyshlennykh

elektroprivodov peremennogo toka (EPPT-2015): Proceedings of the conference. — Ekaterinburg, October 5–9, 2015. — Pp. 175–178. [in Russ.]

Isembergenov, 2018 — Isembergenov, N.T. (2018). Power frequency converter built on transistors // Ural Radio Engineering Journal. — 2018. — Vol. 2, No. 1. — Pp. 59–66. [in Eng.]

Demina, 2019 — Demina, G.A. (2019). Oborudovanie «Silovykh mashin» dlya gornodobyvayushchey promyshlennosti [Equipment of “Power Machines” for the mining industry] // Gornaya promyshlennost'. — 2019. — No. 6. — P. 50. [in Russ.]