

УДК 621.314.6

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМА БАЛАНСИРОВКИ ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА ДЛЯ ТРЕХУРОВНЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Марейченко Иван Вячеславович,

Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования», директор
Электронная почта: niive@list.ru
Россия, г. Донецк

Поважнюк Андрей Николаевич,

Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования», заведующий отделом электропривода
Электронная почта: niive@list.ru
Россия, г. Донецк

Роговской Алексей Денисович,

Государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования», стажер-исследователь
Электронная почта: niive@list.ru
Россия, г. Донецк

Аннотация

В работе предложен алгоритм балансировки напряжений на конденсаторах звена постоянного тока (ЗПТ) трёхуровневого преобразователя частоты, применяемого в электроприводах горнодобывающих механизмов. Алгоритм основан на обратной связи по напряжению конденсаторов и обеспечивает компенсацию дисбаланса при переменной нагрузке и асимметрии питающего напряжения. Моделирование в MATLAB/Simulink подтвердило снижение коэффициента гармонических искажений (THD), повышение устойчивости преобразователя в переходных режимах и равномерное распределение напряжений между конденсаторами. Научная новизна заключается в создании алгоритма для отечественных высоковольтных ПЧ, а практическая значимость — в возможности его применения при проектировании и эксплуатации электроприводов горнодобывающей промышленности.

Ключевые слова: трёхуровневый преобразователь частоты, звено постоянного тока (ЗПТ), балансировка напряжений, NPC-топология, алгоритм обратной связи, моделирование, высоковольтные ПЧ, коэффициент гармонических искажений (THD), векторная ШИМ, скалярная ШИМ.

INVESTIGATION OF THE DC LINK BALANCING ALGORITHM FOR A THREE-LEVEL FREQUENCY CONVERTER

Mareychenko Ivan Vyacheslavovich,

State budgetary institution scientific-research, project-designing and technological institute of explosion proof and mine electrical equipment, director

E-mail: niive@list.ru

Russia, Donetsk

Povazhnyuk Andrey Nikolaevich,

State budgetary institution scientific-research, project-designing and technological institute of explosion proof and mine electrical equipment, head of the electric drive department

E-mail: niive@list.ru

Russia, Donetsk

Rogovsky Alexey Denisovich,

State budgetary institution scientific-research, project-designing and technological institute of explosion proof and mine electrical equipment, intern researcher

E-mail: niive@list.ru

Russia, Donetsk

ABSTRACT

The paper proposes an algorithm for balancing voltages on DC capacitors of a three-level frequency converter used in electric drives of mining machinery. The algorithm is based on capacitor voltage feedback and provides compensation for imbalance under variable load and supply voltage asymmetry. MATLAB/Simulink simulations confirmed a reduction in harmonic distortion (THD), increased stability of the converter in transient conditions, and uniform voltage distribution between the capacitors. The scientific novelty lies in the creation of an algorithm for domestic high – voltage drives, and its practical significance lies in the possibility of its application in the design and operation of electric drives in the mining industry.

Keywords: three-level frequency converter, DC link, voltage balancing, NPC- topology, feedback algorithm, modeling, high voltage frequency converter, harmonic distortion coefficient (THD), vector PWM, scalar PWM.

Введение. Развитие горнодобывающей промышленности сопровождается активным внедрением регулируемых электроприводов для очистных комбайнов, транспортных систем, насосных и вентиляторных установок. Применение напряжения 1140 В стало важным направлением повышения энергоэффективности и надёжности оборудования. Однако использование высоковольтных силовых ключей в преобразователях частоты связано с высокими коммутационными потерями, ограниченной скоростью переключения и повышенными требованиями к теплоотводу, изоляции и надёжности [1].

Рациональным решением данных проблем является применение многоуровневых преобразователей частоты, которые позволяют снизить уровень гармоник, уменьшить потери на переключение и повысить качество выходного напряжения [2]. Дополнительным

преимуществом является снижение напряжения на отдельных ключах, уменьшение тепловых потерь и повышение эффективности охлаждения. Современные тенденции проектирования отдают предпочтение жидкостному или комбинированному охлаждению, а также увеличенному количеству силовых ключей для равномерного распределения тепловых нагрузок.

На российском рынке представлены низковольтные ПЧ (380–660 В), однако аналоги высоковольтных устройств на 1140 В отсутствуют. Это вынуждает предприятия использовать зарубежные решения, что снижает технологическую независимость и усложняет создание комплексных отечественных систем электропривода. В рамках разработки электропривода подачи очистного комбайна КДК-1000 в ГБУ «НИИВЭ» выбрана трёхуровневая NPC-топология, обеспечивающая использование доступных силовых ключей меньшего номинального напряжения (от 1200 до 1700 В), широко представленных отечественными производителями, и эффективное распределение тепловых потерь. В условиях взрывозащищённой оболочки применяется жидкостное охлаждение [3], что повышает надёжность работы.

Одной из ключевых задач при эксплуатации трёхуровневых ПЧ является балансировка напряжений на конденсаторах звена постоянного тока (ЗПТ). Несбалансированность приводит к перегрузке компонентов, снижению ресурса оборудования и ухудшению электромагнитной совместимости. Особенно остро проблема проявляется при переменной нагрузке, асимметрии питающего напряжения и длительных переходных режимах [4]. Существуют различные алгоритмы балансировки – от методов на основе векторного ШИМ до активного управления нейтральной точкой и симметричного распределения токов. Выбор оптимального решения зависит от схемы преобразователя, условий эксплуатации и требований к надёжности.

Целью работы является анализ существующих решений по балансировке напряжений ЗПТ в трёхуровневых преобразователях частоты, разработка и исследование алгоритма балансировки напряжений на конденсаторах звена постоянного тока трёхуровневого преобразователя частоты для электроприводов горнодобывающей промышленности.

NPC (Neutral Point Clamped) – трёхуровневый преобразователь с фиксирующими диодами [5]. NPC-инвертор, представленный на рис. 1, является классическим решением для реализации трех уровней напряжения: $+V_{dc}/2$, 0 и $-V_{dc}/2$. Он содержит два конденсатора в ЗПТ и четыре ключа на фазу, дополненные двумя фиксирующими диодами. Для обеспечения корректной работы необходимо поддерживать равенство напряжений на обоих конденсаторах.

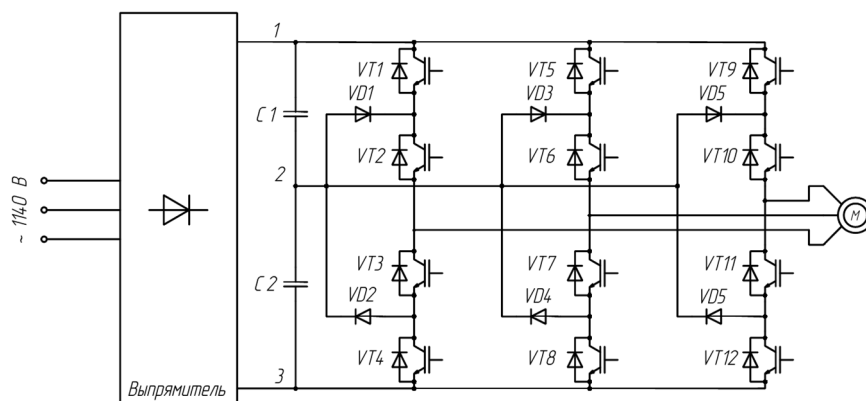


Рис. 1. Схема трёхуровневого инвертора напряжения с фиксирующими диодами

Из достоинств такой схемы можно отметить простоту реализации, надёжность при правильной балансировке конденсаторов.

Из недостатков данной схемы стоит отметить необходимость точного контроля напряжений на конденсаторах, повышенные потери в диодах при высоких токах, ограниченную эффективность при больших нагрузках.

Методы балансировки ЗПТ

Балансировка напряжений на конденсаторах ЗПТ критична для стабильной работы трёхуровневых преобразователей частоты (ТПЧ). Несбалансированность приводит к смещению нейтральной точки, перегрузке компонентов и снижению качества выходного сигнала, включая появление гармоник чётного порядка. Для устранения этого эффекта применяются различные методы балансировки напряжений.

Различают пассивные и активные методы балансировки [6].

Пассивная балансировка основана на применении одинаковых ёмкостей и симметричной топологии, характерной для базовых NPC-схем, однако она не гарантирует устойчивость при переменной нагрузке.

Активная балансировка реализуется с использованием пространственно-векторной или скалярной широтно-импульсной модуляции (ШИМ).

Наиболее эффективным решением является гибридный метод, сочетающий векторную ШИМ с обратной связью по напряжению, что повышает устойчивость к асимметрии и переходным процессам.

Для оценки эффективности различных подходов были проанализированы методы, представленные в литературе. Сравнительные данные сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ методов балансировки напряжений ЗПТ

Название метода	Суть метода	Результат	Область применения
Управление длительностями коммутационных состояний [7]	Коррекция длительностей коммутационных состояний ключей (КСК) в зависимости от разности напряжений конденсаторов. Векторная ШИМ – перераспределение весовых коэффициентов; скалярная ШИМ – смещение модулирующего сигнала или изменение амплитуды опорных сигналов.	Быстрое сведение напряжений конденсаторов к равному уровню; эффективность оценивается по скорости выравнивания за период выходного напряжения.	Высоковольтные ПЧ для промышленности, особенно при переменной нагрузке и асимметрии питающего напряжения.

Продолжение таблицы 1

Активная балансировка с пропорциональным регулятором [8]	Модификация алгоритма ШИМ: фазные потенциалы корректируются пропорционально	Выравнивание напряжений без ухудшения эффективности преобразования;	Активные выпрямители, ветроэнергетика (Венский выпрямитель),
--	---	---	--

	разности напряжений между конденсаторами. Коррекция выполняется встроенным пропорциональным регулятором в блоке ШИМ.	устойчивость при аварийных режимах; подтверждено моделированием в MATLAB/Simulink при дисбалансе до 50–100 В.	а также промышленные ПЧ с высокими требованиями к устойчивости.
Векторная ШИМ с таблицами переключения [9]	Динамическое перераспределение длительностей коммутационных состояний силовых ключей с учётом разности напряжений. Корректировка весовых коэффициентов базовых векторов или модификация фазных потенциалов. Используется пропорциональный регулятор для компенсации напряжения нейтральной точки.	Быстрое восстановление симметрии напряжений на конденсаторах; снижение общего коэффициента гармонических искажений (THD); устойчивость работы в различных режимах, включая аварийные.	Высоковольтные NPC-инверторы для горнодобывающей промышленности, электроприводы с жёсткими требованиями к надёжности и качеству выходного напряжения.

Для анализа алгоритмов управления электроприводом подачи очистного комбайна КДК-1000 и оценки эффективности балансировки напряжений ЗПТ в трехуровневом преобразователе частоты разработана имитационная модель в среде MATLAB/Simulink, представленная на рис. 2. Модель представляет собой комплексную систему, включающую силовую часть, электромеханическую нагрузку, измерительные блоки и контур управления.

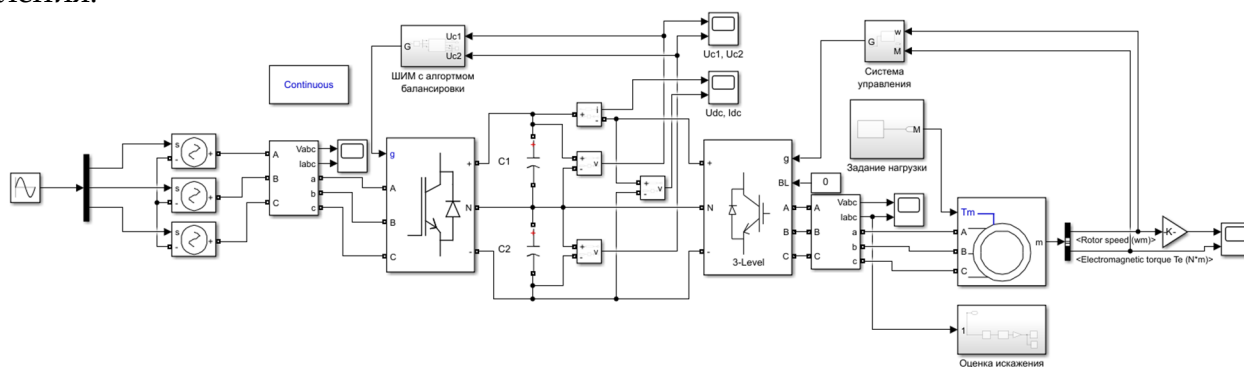


Рис. 2. Структурная схема системы управления асинхронным электродвигателем с встроенным алгоритмом балансировки напряжения на конденсаторах ЗПТ

Для обеспечения симметрии напряжений на конденсаторах ЗПТ в модели реализован алгоритм динамической коррекции модулирующих сигналов, основанный на дискретном ПИ-регулировании. Алгоритм формирует корректирующее смещение U_{zero} , которое равномерно добавляется к фазным опорным сигналам U_{a_ref} , U_{b_ref} , U_{c_ref} , что эквивалентно управлению нейтральной точкой инвертора. Данный подход позволяет эффективно компенсировать дисбаланс напряжений на конденсаторах без нарушения симметрии фазных сигналов, особенно в условиях переходных процессов и асимметрии нагрузки.

Алгоритм работает в дискретном времени с фиксированным шагом интегрирования $\Delta t=10$ мкс. Он отслеживает разность напряжений между двумя конденсаторами ЗПТ:

$$\Delta U(t) = U_{c1}(t) - U_{c2}(t) \quad (1)$$

Управляющее воздействие формируется как сумма пропорциональной и интегральной составляющих.

$$U_{zero}[n] = K_p \cdot \Delta U[n] + Integ[n], \quad (2)$$

где интегральная составляющая вычисляется с ограничением:

$$Integ[n] = sat(Integ[n-1] + K_i \cdot \Delta U[n] \cdot \Delta t, -L, +L) \quad (3)$$

Здесь $L=1$ (в относительных единицах), функция насыщения $sat(x,a,b)=\min(\max(x,a),b)$, а коэффициенты регуляторов задаются вручную.

Скорректированные фазные напряжения определяются выражениями:

$$\begin{aligned} U_a(t) &= sat(U_m \cdot \sin(2\pi f_{base} t) + U_{zero}[n], -1, +1) \\ U_b(t) &= sat(U_m \cdot \sin(2\pi f_{base} t - \frac{2\pi}{3}) + U_{zero}[n], -1, +1) \\ U_c(t) &= sat(U_m \cdot \sin(2\pi f_{base} t + \frac{2\pi}{3}) + U_{zero}[n], -1, +1) \end{aligned} \quad (4)$$

где $U_m=932$ В – амплитудное значение напряжения

Особенностью реализации является дискретная форма интегратора с механизмом антинасыщения, а также ограничение выходного сигнала в пределах допустимого диапазона модуляции $[-1,1][[-1,1]$, что обеспечивает совместимость как с векторной, так и со скалярной ШИМ и предотвращает насыщение регулятора в переходных режимах. Алгоритм специально адаптирован для работы с блоком трехуровневого ШИМ генератора (PWM Generator (3-Level)), что гарантирует корректное функционирование в трёхуровневой NPC-топологии.

При нулевом значении коэффициентов ПИ-регулятора ($K_p=0$, $K_i=0$) сохраняется слабая пассивная балансировка, обусловленная использованием избыточных состояний коммутации в алгоритме ШИМ и особенностями схемы NPC, что проявляется в медленном выравнивании напряжений на конденсаторах даже при отключённой активной коррекции. В активном режиме регулятор обеспечивает быстрое подавление дисбаланса за счёт управления током нейтральной точки инвертора через введение общего смещения во все три фазных модулирующих сигнала.

Результаты работы алгоритма представлены на рис. 3 и рис. 4. На рис. 3 представлено суммарное напряжение на конденсаторах, и напряжения на верхнем и нижнем конденсаторе. Как видно из графика переходного процесса конденсаторы заряжаются и происходит балансировка напряжения. Напряжения на конденсаторах остаются симметричными.

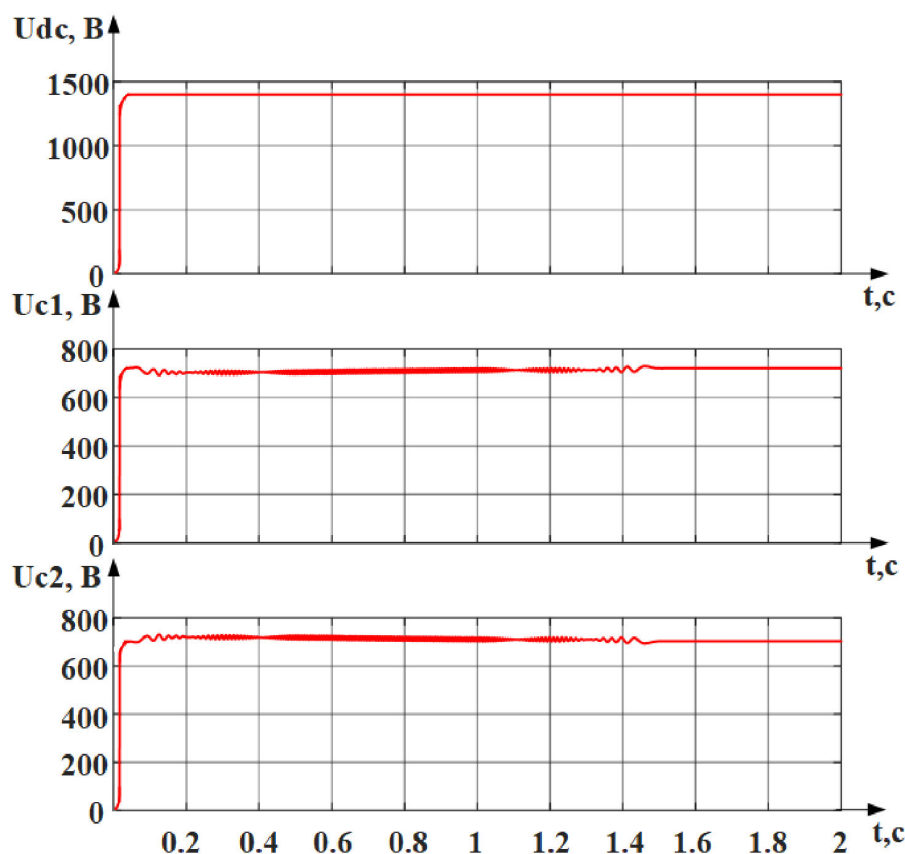


Рис. 3. Переходные процессы напряжений ЗПТ

На рис. 4 промоделирован дисбаланс напряжения на конденсаторах и работа алгоритма балансировки. В момент включения наблюдается существенный дисбаланс: $U_{c1} = 710$ В, $U_{c2} = 600$ В. При идеальном делении $U_{dc}/2 \approx 655$ В, отклонение составляет порядка +55 В для верхнего и -55 В для нижнего конденсатора. Такой дисбаланс может возникать из-за неравномерного предзаряда, различий в ёмкостях, утечках или остаточного заряда от предыдущих режимов работы. После активации алгоритма балансировки U_{c1} постепенно снижается, а U_{c2} — возрастает, демонстрируя симметричную перераспределяющую динамику. Процесс сопровождается слабыми колебаниями, характерными для цифрового управления и ограниченной полосы пропускания регулятора. К концу интервала (2 с) напряжения стабилизируются вблизи 710 В, что соответствует успешному выравниванию. Результаты демонстрируют, что предложенный алгоритм обеспечивает устойчивое и плавное выравнивание напряжений на конденсаторах при начальном дисбалансе.

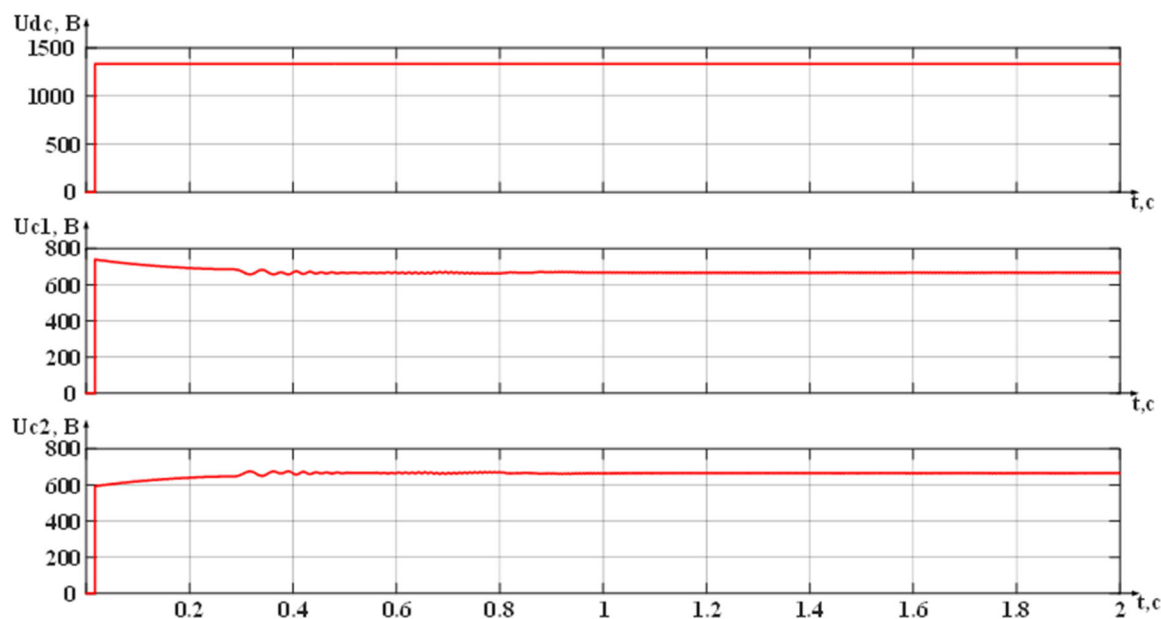


Рис. 4. Работа алгоритма при начальном дисбалансе

Особенности и преимущества алгоритма

Предложенный алгоритм обладает рядом преимуществ, обеспечивающих его практическую применимость в системах управления трёхуровневыми преобразователями частоты:

равномерное смещение фазных сигналов сохраняет симметрию выходного напряжения и не нарушает условий модуляции;

встроенное ограничение интегратора предотвращает накопление ошибки в случаях невозможности полной компенсации дисбаланса;

алгоритм демонстрирует устойчивость к переходным процессам и может быть интегрирован в цифровую систему управления;

простота реализации в среде MATLAB/Simulink обеспечивает возможность его применения в промышленных контроллерах.

На рисунке 5 изображена динамика угловой скорости, момента и коэффициента гармонических искажений THD в относительных единицах при переходе электропривода в установившийся режимы. Графики демонстрируют устойчивую работу системы после переходного процесса. Резкое снижение THD свидетельствует об эффективной работе алгоритма балансировки напряжений на конденсаторах ЗПТ. В установившемся режиме уровень THD стабилизируется в пределах 0–3%, что соответствует нормальной работе преобразователя с активной балансировкой.

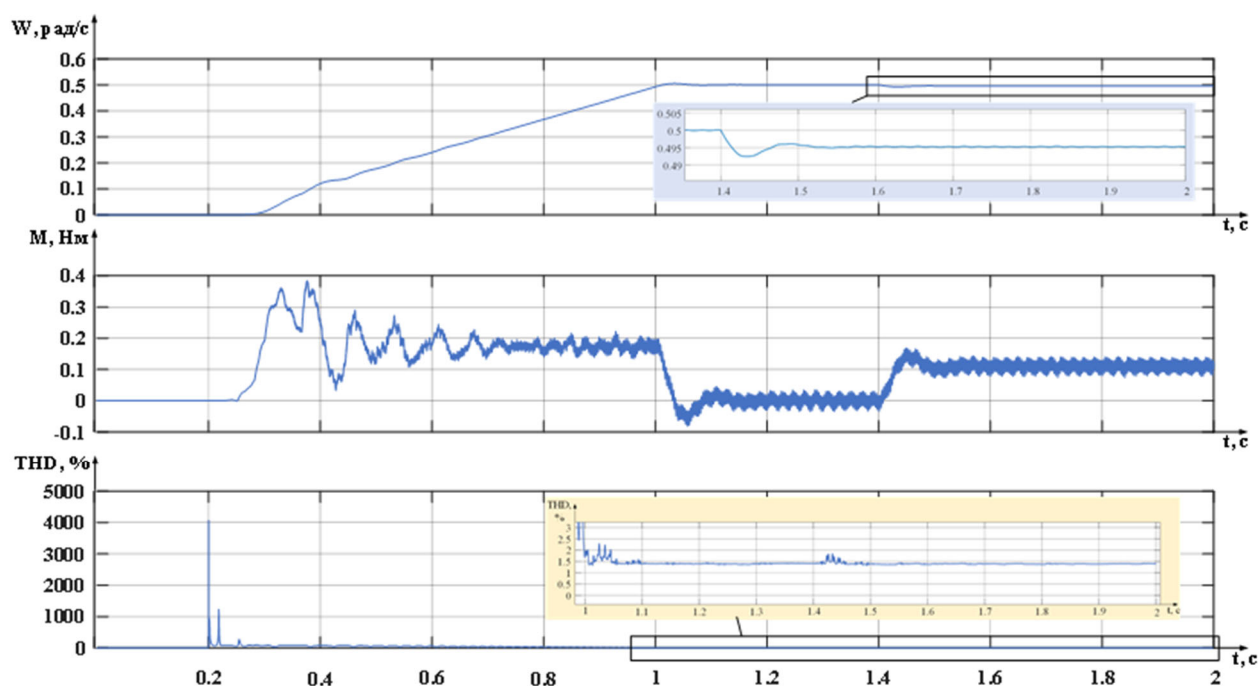


Рис. 5. Динамика работы электропривода

Закключение. Проведённый анализ показал, что балансировка напряжений на конденсаторах ЗПТ является критическим условием надёжной работы трёхуровневых преобразователей частоты, особенно при линейном напряжении питания 1140 В. В условиях переменной нагрузки и асимметрии питающего напряжения пассивные методы балансировки оказываются недостаточными. Наибольшую эффективность демонстрируют активные и гибридные методы, реализующие динамическую коррекцию модулирующих сигналов с использованием ПИ-регулятора и обратной связи по напряжению.

Разработанный алгоритм балансировки, совместимый как с векторной, так и со скалярной ШИМ, обеспечивает устойчивое выравнивание напряжений на конденсаторах, снижение коэффициента гармонических искажений и повышение надёжности работы преобразователя в переходных режимах. Эффективность предложенного решения подтверждена моделированием в MATLAB/Simulink.

Практическая ценность представленных материалов заключается в возможности применения разработанного алгоритма при проектировании и эксплуатации отечественных высоковольтных преобразователей частоты для горнодобывающей промышленности, что позволит повысить ресурс оборудования и снизить эксплуатационные риски.

Список литературы:

1. Иванов В.О. Исследование преобразователей частоты. Основные сведения // Вестник науки и образования. 2015. №5 (7). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-preobrazovateley-chastoty-osnovnye-svedeniya>.
2. Рабл И. 3-L NPC-инвертор: управление, режимы работы, расчет параметров / И. Рабл, У. Николаи, А. Колпаков // Силовая электроника. – 2016. – Т. 3, № 60. – С. 42-48. – EDN XADVTN.
3. Марейченко, И. В. Комплексный подход к моделированию замкнутой жидкостной системы охлаждения для силовых модулей частотного преобразователя / И. В.

- Марейченко, А. Н. Поважнюк, А. И. Дьяченко // Оригинальные исследования. – 2025. – Т. 15, № 8. – С. 160-168. – EDN ZUTBLJ.
4. Шпрехер Д.М., Зеленков А.В., Новаков А.В. ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПРИВОДОМ ПОДАЧИ ОЧИСТНОГО КОМБАЙНА // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. №12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proverka-adekvatnosti-matematicheskoy-modeli-sistemy-upravleniya-privodom-podachi-ochistnogo-kombayna>.
 5. Виноградов А.Б., Коротков А.А. Алгоритмы управления высоковольтным многоуровневым преобразователем частоты / ФГБОУВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Иваново, 2018. – 184 с.
 6. Брованов С.В., Гришанов Е.В. АНАЛИЗ СПОСОБОВ БАЛАНСА НАПРЯЖЕНИЙ НА КОНДЕНСАТОРАХ ЗВЕНА ПОСТОЯННОГО ТОКА В ОДНОФАЗНОМ ТРЕХУРОВНЕВОМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ // Системы анализа и обработки данных. 2015. №1 (58). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sposobov-balansa-napryazheniy-na-kondensatorah-zvena-postoyannogo-toka-v-odnofaznom-trehurovnevom-preobrazovatele>.
 7. Разработка системы управления 3-уровневого преобразователя для ветрогенераторных установок с переменной частотой вращения / А.А. Чепига, Ю. Али, Е.О. Столяров [и др.] // Энергосбережение - теория и практика : Труды Одиннадцатой Всероссийской конференции с Международным участием, Москва, 10-14 октября 2022 года. – Москва: Общество с ограниченной ответственностью "Центр полиграфических услуг " РАДУГА", 2022. – С. 256-261. – EDN JNXPOD.
 8. Маклаков А.С. Исследование векторной ШИМ с различными таблицами переключения силовых ключей трехуровневого преобразователя / А. С. Маклаков, А. А. Радионов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – 2015. – Т. 2, № 1. – С. 30-37. – EDN ТКСFOJ.
 9. Шпенст В.А., Краснов Н.В. АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ПРИМЕНЕНИЯ SIC- И GAN-ТРАНЗИСТОРОВ В СИЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ // Известия ТулГУ. Технические науки. 2022. №5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-variantov-primeneniya-sic-i-gan-tranzistorov-v-silovyh-preobrazovatelyah>.

References:

1. Ivanov, V. O. "Research of Frequency Converters. Basic Information." Journal of Science and Education, no. 5 (7), 2015. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-preobrazovateley-chastoty-osnovnye-svedeniya>.
2. Rabl, I. 3-L NPC Inverter: Control, Operating Modes, Parameter Calculation. I. Rabl, U. Nikolai, A. Kolpakov. Power Electronics: Vol. 3, no. 60, pp. 42-48. EDN XADBTN.
3. Mareychenko, I. V. "An Integrated Approach to Modeling a Closed Liquid Cooling System for Power Modules of a Frequency Converter." Original Research. – 2025. – Vol. 15, No. 8. – Pp. 160-168. – EDN ZUTBLJ.

4. Shprekher D.M., Zelenkov A.V., Novakov A.V. ADEQUACY CHECK OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE CONTROL SYSTEM OF THE FEED DRIVE OF A SHEARER // Bulletin of TulSU. Technical sciences. 2022. No. 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/proverka-adekvatnosti-matematicheskoy-modeli-sistemy-upravleniya-privodom-podachi-ochistnogo-kombayna>.
5. Vinogradov A.B, Korotkov A.A. Algorithms for Control of a High-Voltage Multilevel Frequency Converter / Ivanovo State Power Engineering University named after V.I. Lenin. – Ivanovo, 2018. – 184 p.
6. Brovanov S.V., Grishanov E.V. ANALYSIS OF METHODS FOR BALANCE OF VOLTAGE ON DC LINK CAPACITORS IN A SINGLE-PHASE THREE-LEVEL CONVERTER // Data Analysis and Processing Systems. 2015. No. 1 (58). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-sposobov-balansa-napryazheniy-na-kondensatorah-zvena-postoyannogo-toka-v-odnofaznom-trehurovnevom-preobrazovatele>.
7. Development of a control system for a 3-level converter for wind turbines with variable speed / A.A. Chepiga, Yu. Ali, E.O. Stolyarov [et al.] // Energy Saving - Theory and Practice: Proceedings of the Eleventh All-Russian Conference with International Participation, Moscow, October 10-14, 2022. – Moscow: Limited Liability Company "Printing Services Center" RADUGA ", 2022. – Pp. 256-261. – EDN JNXPOD.
8. Maklakov A.S. Study of vector PWM with different switching tables of power keys of a three-level converter / A.S. Maklakov, A.A. Radionov // Electrical Engineering: online electronic scientific journal. – 2015. – Vol. 2, No. 1. – Pp. 30-37. – EDN TKCFOJ.
9. Shpenst V.A., Krasnov N.V. ANALYSIS OF APPLICATION OPTIONS FOR SIC AND GAN TRANSISTORS IN POWER CONVERTERS // Bulletin of Tula State University. Technical Sciences. 2022. No. 5. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-variantov-primeneniya-sic-i-gan-transistorov-v-silovyh-preobrazovatelyah>.