

5. Цихалевский, И. Асинхронные приводные двигатели с различным числом фаз / И. Цихалевский, К. Вахрушев // АИР 2442: материалы конф., 13 дек. 2021 г. – 2021. – С. 070006. – <https://doi.org/10.1063/5.0075619>.

6. K. Kolesnikov, A. P. Akhmedov, S. N. Nakimov. Electric drive efficiency criterion for specific energy consumption. Инновационные технологии в водном, коммунальном хозяйстве и водном транспорте: материалы III республиканской научно-технической конференции, 27–28 апреля 2023 г. / редкол.: С. В. Харитончик [и др.]. – Минск: БНТУ, 2023. – С. 408–411.

7. Нос, О. В. Оптимальное векторное управление асинхронным двигателем по критерию минимума токов статора / О. В. Нос // Электротехника, электромеханика и электротехнология ЭЭЭ–2007: материалы III научн.-тех. конф. – Новосибирск; НГТУ, 2007. – С. 79–85.

УДК 629.423.31

Повышение энергоэффективности источников вторичного питания в схеме управления тяговым приводом электроподвижного состава

Иксар Е. В.

Ташкентский государственный транспортный университет
Ташкент, Республика Узбекистан

Быстрые темпы роста элементной базы силовой электроники способствует стремительному развитию систем управления движением скоростного подвижного состава. Для формирования питания силовых преобразовательных устройств тягового привода электроподвижного состава используются инверторы на IGBT модулях. Эффективность использования электрической энергии, потребляемой схемой управления, можно повысить, используя в этих схемах ключей с распределенным электростатическим управлением (КРЭУ), в статье приведен сравнительный анализ существующих и предлагаемых систем. Работа преобразовательных устройств основана на принципе высокочастотного преобразования электрической энергии. Повышение частоты коммутации влечёт за собой повышение динамических потерь в элементах преобразования (транзисторы, трансформатор, диоды и т. д.). Использование импульсных преобразователей на (КРЭУ) позволяет снизить динамические потери на полупроводниковых силовых ключах, повысить удельные характеристики импульсных источников вторичного электропитания.

В настоящей статье представлен материал о перспективной системе управления на основе интегрально-амплитудной импульсной модуляции четырехуровневым инвертором напряжения на базе ключей с распре-

ленным электростатическим управлением (КРЭУ), а также выполнено сравнение математических моделей инверторов на КРЭУ и IGBT. Моделирование выполнено в неподвижной (относительно статора) системе координат. Моделирование процессов наиболее приближено к реальным условиям эксплуатации электроподвижного состава.

Такой метод повышения уровня напряжения на выходе высоковольтных преобразователей является наиболее энергоэффективным. Суть метода заключается в применении в схеме инвертора полупроводниковых силовых ключей с распределенным электростатическим управлением (КРЭУ). Такие ключи (рис. 1) потребляют меньше мощности и обеспечивают равномерное распределение напряжений в последовательном соединении вентилях в плече инвертора [1].

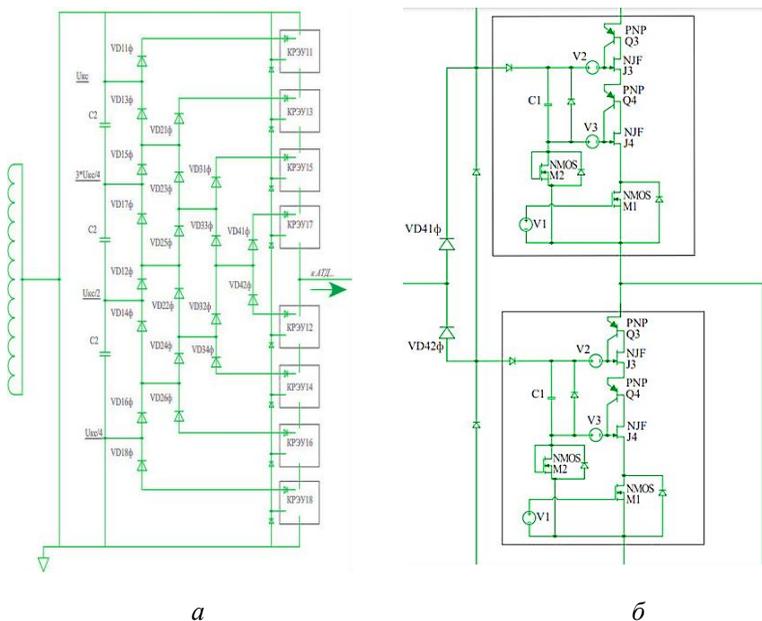


Рис. 1. Схема инвертора полупроводниковых силовых ключей с распределенным электростатическим управлением:
 а – формирование фазы четырехуровневого инвертора; б – схема подключения КРЭУ

Алгоритм управления многоуровневыми высоковольтными преобразователями позволяет увеличить диапазон модуляции, снизить потери в си-

ловых модулях инвертора, уменьшить гармонические составляющие выходного напряжения. Упрощение алгоритма и уменьшение расчётного времени коммутации определяется спецификой требований, предъявляемых к электроприводам электроподвижного состава. Для улучшения характеристик сигнала выходного напряжения применен метод прямого сокращения периода коммутации [1].

Для генерации выходного сигнала инвертора синусоидальной формы на элементной базе КРЭУ применена методика формирования передаточной характеристики в момент коммутации. В условиях эксплуатации тягового подвижного состава используется амплитудно-интегральная развертка выходного сигнала. На рис. 2 указаны импульсы, на основании которых осуществлена интегрально-амплитудная развертка выходного сигнала. Амплитудная модуляция осуществляет изменение выходного сигнала и формирует заданный уровень регулируемой величины в текущий момент времени.

Интегральная модуляция формирует заданную длительность выходного сигнала. Заданное количество модуляций позволяет получить необходимую форму сигнала на выходе инвертора. На рис 2 показан принцип формирования интегрально-амплитудной импульсной модуляции (ИАИМ).

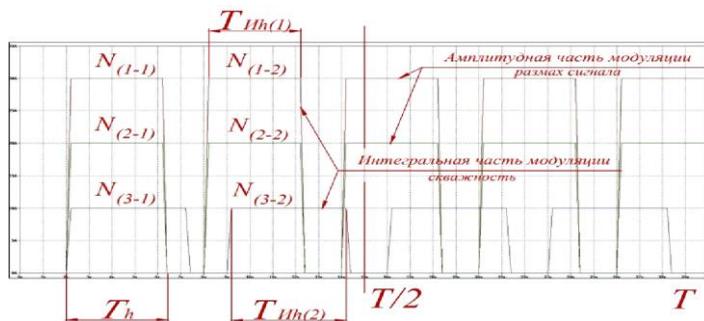


Рис. 2. Принцип формирования интегрально-амплитудной импульсной модуляции (ИАИМ)

Математическая модель четырехуровневого инвертора напряжения (далее 4-У АИН) описывается системой дифференциальных уравнений в частных производных III-го порядка. Выполнение расчета переходного процесса в электрических цепях классическим методом трудоемко за счет

вычисления постоянных интегрирования, характеризующихся быстрым изменением, например, изменение ускорения э.п.с. при трогании с места.

Для расчета времени коммутации ключей инвертора применен операторный метод расчета, базирующийся на понятии изображения функции напряжения от времени. Применимость операторного метода заключается в том, что переход из области действительного переменного t в область комплексного переменного $p=c+j\omega$, в которой дифференцирование и интегрирование проще, а дифференциально-интегральные выражения цепи в переходном режиме заменяются обыкновенными алгебраическими выражениями относительно комплексной переменной.

Рассмотрим составления уравнения состояния силовых элементов КРЭУ и математическое описание выходных переменных 4-У АИН. Для выполнения сравнительного анализа существующих инверторов на IGBT и инверторов на КРЭУ, потери мощности в силовом преобразователе определялись по формуле

$$\Delta P_{COND_IGBT} = \frac{1}{2} \left(V_{CE0} \frac{I_m}{\pi} + r_{CE} \frac{I_m^2}{4} \right) + m \cos \varphi \left(V_{CE0} \frac{I_m}{8} + r_{CE} \frac{I_m^2}{3\pi} \right),$$

$$\Delta P_{COND_VD} = \frac{1}{2} \left(V_{F0} \frac{I_m}{\pi} + r_F \frac{I_m^2}{4} \right) - m \cos \varphi \left(V_{F0} \frac{I_m}{8} + r_F \frac{I_m^2}{3\pi} \right),$$

$$\Delta P_{SW_IGBT} = \frac{1}{\pi} f_{SW}^{IGBT} \left((I_{ON}^{пот} U_{ON}^{пот}) + (I_{OFF}^{пот} U_{OFF}^{пот}) \right) \frac{iU_d}{I^{пот} U^{пот}},$$

$$\Delta P_{SW_иг} = \frac{1}{\pi} f_{SW}^{IGBT} I^{пот} \left(0,45 \frac{I_m}{I^{пот}} + 0,55 \right) \frac{U_d}{U^{пот}},$$

где V_{CE0}, r_{CE} – характеристические параметры выходного сигнала биполярного и полевого транзистора, входящих в состав IGBT; V_{F0}, r_F – характеристические параметры выходного сигнала обратного диода, входящего в состав IGBT; i – мгновенный ток через транзистор или обратный диод в момент коммутации; U_d – выходное напряжения звена постоянного тока АИН; $I^{пот} U^{пот}$ – номинальные значения тока и напряжения в процессе коммутации (*ON* – в течение переходного состояния (отпирания), *OFF* – в течение переходного состояния (запирания), соответственно); $\cos \varphi$ – коэффициент мощности [1].

Для выполнения сравнительного анализа 4-У инверторов на базе КРЭУ (рис. 3) потери мощности в силовом преобразователе определялись по формуле

$$\Delta P_{KDEC} = \frac{1}{T} \left(\sum_1^n (W_{ТЭУVT1} + W_{ТЭУVT2} + W_{МОПVT3} + W_{МОПVT4}) \right) =$$

$$= \frac{4}{T} \left(\prod_1^{f_{SW}^{KDEC}} \left[\frac{(\Delta P_{PNP}^{Q3} \Delta P_{NJF}^{J3}) (\Delta P_{PNP}^{Q4} \Delta P_{NJF}^{J4}) (\Delta P_{NMOS}^{M2} \Delta P_{NMOS}^{M1})}{(\Delta P_{PNP}^{Q3} \Delta P_{NJF}^{J3}) + (\Delta P_{PNP}^{Q4} \Delta P_{NJF}^{J4}) + \Delta P_{NMOS}^{M2} + \Delta P_{NMOS}^{M1}} \right] \right),$$

где n – количество коммутаций за период T ; f_{SW}^{KDEC} – частота коммутации КРЭУ; * $KDEC$ – ключ с распределенным электростатическим управлением.

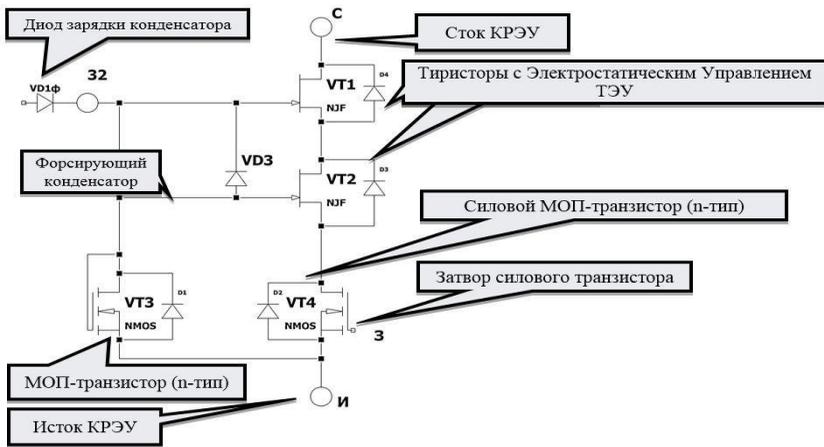


Рис. 3. Основные компоненты формулы потери мощности 4-У АИН на базе КРЭУ

Графики на рис. 4, 5 подтверждают, математические модели инверторов на IGBT при коммутации с частотой на уровне 65–67 Гц имеют меньшие в абсолютном значении величины потерь мощности, по сравнению с потерями мощности на силовом ключе КРЭУ.

При коммутации ключей с частотой на уровне 67–72 Гц происходит выравнивание абсолютных величин потерь мощности. Регулирование

напряжения на непосредственных преобразователях частоты на базе КРЭУ регулирования частоты выходного напряжения осуществляется на частотах меньше, чем частота питающего напряжения (для э.п.с. 50 Гц) – потери мощности значительно ниже, чем у силовых преобразователей на IGBT.

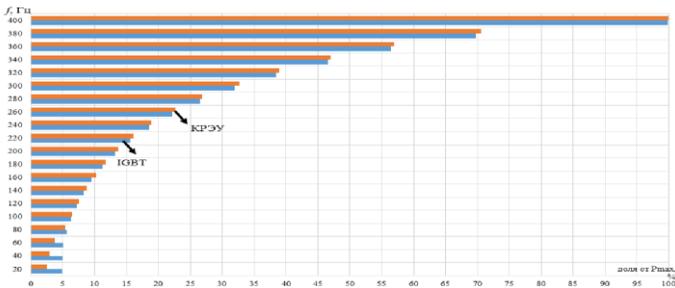


Рис. 4. Зависимость потерь мощности в КРЭУ и IGBT от частоты коммутации ключевых элементов

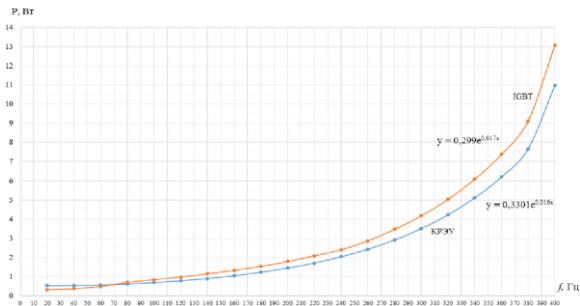


Рис. 5. Зависимость потерь мощности в КРЭУ и IGBT от частоты коммутации ключевых элементов

Однако для скоростного э.п.с. топология 4-У АИН на базе КРЭУ является преимуществом, так как на высоких частотах коммутации силовых ключей (что соответствует высоким скоростям движения электропоезда) общин потери мощности будут меньше, чем у силовых преобразователей, установленных на электропоездах ЭС1 в настоящее время.

Литература

1. Karimov, R. Ch. Program for calculating the minimum electrical power loss in an asynchronous traction engine of mainline lokomotives / R. Ch Kari-

УДК 625.7/8.004

Обзор современного оборудования

Дустмуродов Э. Э., Махмудова Д. Х., Дустмуродова Х. Э.
Ташкентский государственный транспортный университет
Ташкент, Республика Узбекистан

Растущая сложность интеллектуальных транспортных систем (ИТС), которые включают в себя широкий спектр приложений и услуг, вызвала необходимость в высокопроизводительных современных аппаратных устройствах (МНД). Проблема производительности стала более заметной после интеграции методов машинного обучения (ML), развернутых в крупномасштабных условиях. Машинное обучение эффективно поддержало сферу ИТС, предоставив эффективные и оптимизированные решения проблем, которые в противном случае решались с использованием традиционных статистических и аналитических подходов. Потребность в развертывании аппаратного обеспечения ИТС в эпоху машинного обучения – сложная проблема, которая включает в себя временные, пространственные, экологические и экономические факторы. В этом обзоре рассматривается новейшая литература ИТС на основе машинного обучения, в которых использовались МНД, с упором на показатели эффективности.

За последние несколько десятилетий ИТС вызвали растущий исследовательский интерес как многообещающая дисциплина, способная произвести революцию в транспортном секторе и решить общие проблемы, связанные с дорожным движением и транспортными средствами. ИТС включает в себя множество взаимосвязанных инженерных решений, которые функционируют как единое целое для оптимизации путешествий в масштабе сети с технической, социальной, экономической и экологической точек зрения. Такая оптимизация требует развития информационных и коммуникационных технологий, электронных датчиков, систем управления и компьютеров, что подчеркивает управляемую данными природу современных ИТС. Собирая и анализируя соответствующие данные, ИТС может эффективно управлять ресурсами вычислительного оборудования с помощью нескольких алгоритмов управления и координации, что приводит к повышению удобства путешественников, снижению расхода топлива и увеличению транспортных потоков. ИТС – это широкая тема, охватыва-