

## Разработка структуры преобразователя с возможностью питания тяговых асинхронных двигателей рудничных электровозов от разных уровней напряжения

А. П. Лазуренко, Д. А. Шокарев, В. О. Черная, О. Е. Мельник,  
Г. И. Черкашина, В. И. Волынец, О. А. Анцыферова

*Предложена перестраиваемая структура преобразователя энергии электрического привода электротехнического комплекса рудничного электровоза от источников питания с разными уровнями напряжений – от контактной сети и батареи тяговых аккумуляторов. Характерная особенность преобразователя заключается в наличии инверторных блоков, которые могут быть подключены либо последовательно, либо параллельно. При питании от источника низкого напряжения инверторные блоки включены параллельно во всем диапазоне изменения выходного напряжения. В случае питания от источника высокого напряжения инверторные блоки соединяются последовательно в диапазоне низких выходных напряжений и параллельно в диапазоне высоких выходных напряжений. Такой подход позволяет выравнивать уровни напряжений питания тяговых асинхронных двигателей рудничного электровоза на более низком уровне. Ожидаемое выравнивание уровней напряжений осуществляется на более низком уровне по сравнению со стандартной схемой трехфазного мостового автономного инвертора и достигается управлением спаренными мостами контура питания тяговых асинхронных двигателей. Благодаря этому частота напряжений широтно-импульсной модуляции не изменяется, что важно для процесса снижения динамических потерь энергии в элементах привода.*

*Подтверждено, что снижение коэффициента искажения выходного напряжения в IGB-транзисторах инвертора с минимальным уровнем потерь энергии в элементах электропривода достигается путем модуляции напряжения при постоянной частоте коммутации на разных уровнях напряжения. Доказан факт, что наилучшие показатели коэффициента гармоник получены на частотах около 30 Гц, которые являются рабочими, таким образом режим работы преобразователя на этих частотах наиболее эффективен. В результате анализа классической схемы инвертора установлено, что при увеличении частоты широтно-импульсной модуляции в три раза значительно увеличиваются электрические потери в обмотках тягового электрического двигателя. В предложенной схеме преобразователя напряжения питания двигателя при выравнивании напряжения на низком уровне нет необходимости повышать частоту широтно-импульсной модуляции, что не вызывает рост электрических потерь в тяговом двигателе*

*Ключевые слова: асинхронный двигатель, автономный инвертор напряжения, широтно-импульсная модуляция, электрические потери, коэффициент гармоник, рудничный электровоз*

## **1. Введение**

Электрооборудование, в том числе комплектующие тяговых электроприводов, для рудничных электровозов, как и сами электровозы, выпускаются более чем в 15 странах мира 30 ведущими в этом направлении фирмами [1]. Вместе с тем, следует отметить, что только небольшая часть (около 10 %) выпускаемых в мире контактных и аккумуляторных рудничных электровозов комплектуются асинхронными тяговыми электроприводами.

Остальные виды электроподвижного состава оснащены неэффективными тяговыми электротехническими комплексами (ТЭТК) с контактно-резисторными системами управления и двигателями постоянного тока с последовательным возбуждением. Помимо низкой энергоэффективности им присущ существенный недостаток, связанный с обеспечением безопасности горнорабочих. Особенно ощутима опасность касания контактного провода рабочими в местах погрузки-разгрузки полезных ископаемых, где наличие открытой контактной сети может стать причиной аварий и поражения рабочих электрическим током. Достичь уровня достаточной эффективности подвижного состава и электробезопасности в железорудных шахтах возможно путем создания современного тягового электропривода и упразднения контактного провода в местах погрузки-разгрузки полезных ископаемых.

В последние годы в мировой практике машиностроения начали появляться новые образцы энергоэффективных тяговых электроприводов с IGBT-преобразователями напряжения питания асинхронных двигателей (АД). Усилиями учёных и машиностроителей Украины возник новый вид тягового электропривода – контактно-аккумуляторный [2], получающий питание как от контактной сети (КС), так и от тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ), что позволяет существенно расширить его область применения.

В результате анализа электромагнитных процессов в тяговом асинхронном электроприводе (ТАП) классической структуры рудничного тягового электротехнического комплекса установлено, что при питании от разных уровней источников напряжения реальные значения потерь энергии существенные [3]. При этом коэффициенты, характеризующие несинусоидальность кривой напряжения питания асинхронного двигателя, имеют достаточно высокие не согласованные с соответствующим ГОСТом значения [4]. Таким образом, существует необходимость улучшения показателей качества формы кривой напряжения до номинальных значений, что может быть достигнуто выбором рациональной структуры системы привода и способа управления разными уровнями напряжения питания тяговых асинхронных двигателей (ТАД) рудничных электровозов.

Для этого необходимо на основании анализа известных структур [5] выполнить обоснование и установить рекомендации к применению закона регулирования напряжения питания ТАД – тяговых систем электроприводов.

## 2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

В работе [6] для аккумуляторных приводов предложена двухуровневая структура тягового асинхронного электропривода (ТАП). Целью разработки такой структуры было достижение, прежде всего, уменьшения потерь электрической энергии в силовых транзисторах источника напряжения и облегчение удельно-пусковых нагрузок на ТАБ. Предложенная структура обладает повышенным числом транзисторно-тиристорных элементов и весьма сложным алгоритмом управления.

В [7] рассмотрены основные подходы по определению потерь в тяговом асинхронном двигателе при питании от полупроводникового преобразователя в режимах однократной и пространственно-векторной широтно-импульсной модуляции (ШИМ), позволяющие оптимизировать режимы работы тягового асинхронного привода по критерию минимальных потерь с учетом теплового состояния двигателя. В работе не рассматривается анализ потерь в ТАП при разном уровне напряжения питания, что позволило бы минимизировать потери в ТАД.

В работе [8] исследована классическая структура ТАП и предлагается традиционное векторное управление с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) напряжения питания тяговых асинхронных двигателей. Применение такой схемы, относительно структуры привода с двухуровневым питанием, ведет к несогласованию в вопросе выбора векторного управления в качестве системы управления.

В [9] предложена новая структура преобразователя энергии на базе трехфазного инвертора для питания шестифазного АД. В результате использования такого решения общая мощность всего привода переменного тока распределена поровну между четырьмя изолированными источниками постоянного тока. Такая структура преобразователя позволяет осуществлять питание от источников разного уровня, но требует использования двигателя специального исполнения (шестифазного).

В статье [10] разработан многоуровневый инвертор и представлен алгоритм векторного управления питанием шестифазного двигателя для условий питания от разных уровней напряжения. Цепь привода состоит из четырех двухуровневых трехфазных преобразователей напряжения. Данная структура инвертора работает с источниками разного уровня напряжения, но, как и в работе [9], для нее требуется специальный двигатель.

В работе [11] предложен вариант гибридизации электровоза ВВ460000 путем установки тягового асинхронного электропривода. Это позволяет значительно снизить номинальную мощность дизель-генератора. Далее предложен вариант использования Ni-Cd батарей в качестве автономного источника электрической энергии и питания ТАП. В работе предложена схема модернизации магистральных электровозов. В качестве преобразователя используется классическая схема инвертора, в которой требуется изменение частоты ШИМ при переходе на питание от источника другого уровня. Но это приводит к росту динамических потерь в элементах преобразователя.

В [12] рассмотрена целесообразность использования привода переменного тока применительно к тяговому электроприводу. Изучен и предложен новый

метод векторного управления, ориентированный на разработку системы управления структурой инвертор – ТАД. Работа направлена на анализ метода векторного управления ТАД классической структуры преобразователя. Это, в свою очередь, приводит к сложностям в построение системы управления при питании от разных уровней напряжения.

Таким образом, анализ литературных источников показал, все современные работы, связанные с разработкой ТАП, построены на базе классических схем инверторов с применением векторной системы управления. Несмотря на то, что данные системы обладают требуемым уровнем простоты и надежности, для практической реализации в условиях двухуровневого питания они непригодны, ввиду сложности построения системы управления. Это связано с тем, что при переходе на питание от источника более высокого уровня необходимо повышать частоту ШИМ, а это приводит к увеличению динамических потерь мощности в IGB-транзисторах и росту электрических потерь в двигателе. Эти вопросы до сих пор недостаточно изучены и требуют более детального исследования. Поэтому возникает необходимость разработки новой структуры преобразователя структуры инвертор-ТАД для условий питания от источников разного уровня.

### **3. Цель и задачи исследований**

Целью работы является разработка новой структуры преобразователя с возможностью питания ТАП рудничных электровозов от разных уровней напряжения: КС и ТАБ.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- разработать структуру преобразователя напряжения питания с возможностью питания ТАП от разных уровней напряжения;
- исследовать и проанализировать гармонический состав напряжения питания ТАД;
- проанализировать качество преобразуемой энергии и оценить потери энергии в элементах ТАП посредством исследования ШИМ напряжения питания.

### **4. Анализ и разработка структуры преобразователя энергии для питания ТАД от разных уровней напряжения.**

Реализация частотной характеристики при питании инвертора от источников напряжения разного уровня ведет к проблемам в реализации ШИМ напряжения, т. е. требуются исследования проблемы [13].

Часть проблем, связанных с применением векторной синусоидальной ШИМ напряжения, решается применением схемы тягового электропривода, упрощенно представленной на рис. 1 [14, 15].

В этой схеме трехфазный преобразователь состоит из трех однофазных инверторных мостов U<sub>IA</sub>, U<sub>IB</sub>, U<sub>IC</sub>, питающих каждый свою обмотку двигателя М, соответственно А, В, С. Фазные обмотки А, В, С электрически не контактируют друг с другом и образуют «разомкнутый треугольник».

В альтернативной схеме токовые нагрузки на IGB-транзисторы в каждом плече однофазных мостов вдвое меньше, чем в стандартной схеме. Казалось

бы, это должно привести к снижению статических потерь мощности в IGB-транзисторах, однако этого не происходит, поскольку в контуре тока задействовано вдвое больше IGB-транзисторов, чем в стандартной схеме. При равенстве падений напряжений  $\Delta U$ :

– в стандартной схеме  $P=3UI$ ;

– в альтернативной схеме  $P=6UI/2$ , то есть практически имеем равенство статических потерь мощности в IGB-транзисторах.

Экономия электроэнергии достигается за счет снижения динамических потерь мощности в IGB-транзисторах альтернативной схемы благодаря методу непосредственного формирования ШИМ напряжения по заданному закону. Действительно, для формирования положительной полуволны выходного напряжения задействованы транзисторные модули DP и MP. При этом модуль MP включен постоянно в течении полуволны, а DP модулирует.

В результате мост имеет два состояния:

– включены DP и MP, ток протекает по цепи D(+)-DP-0-MP-M(-), к обмотке А приложено напряжение  $U_d$ ;

– отключен DP, включен MP, ток протекает в контуре: А-MP-MN-А, напряжение на обмотке А равно нулю.

Двухрежимный по питанию ТЭТК с точки зрения частотной характеристики реализует следующие режимы работы [13, 16]:

– при загрузке или разгрузке электротранспорт движется с минимальной скоростью. Электропривод может быть запитан как от тяговой аккумуляторной батареи (ТАБ) напряжением  $U_B$ , так и от КС напряжением  $U_n$ . При законе управления  $U_s/f_s=\text{const}$  ТЭТК разгоняется до скорости, пропорциональной частоте  $f_{SB}$ ;

– на более высоких скоростях (частотах  $f_s$ ) на перегонах требуется более высокое напряжение двигателя, которое обеспечивает КС.

Регулирование величины напряжения  $U_s$  двигателя осуществляется посредством ШИМ. По окончании разгона до частоты  $f_{sn}$  двигатель переводится на режим ослабления поля:  $U_{sn}=\text{const}$ ,  $f_s=\text{var}$  до максимальной частоты.

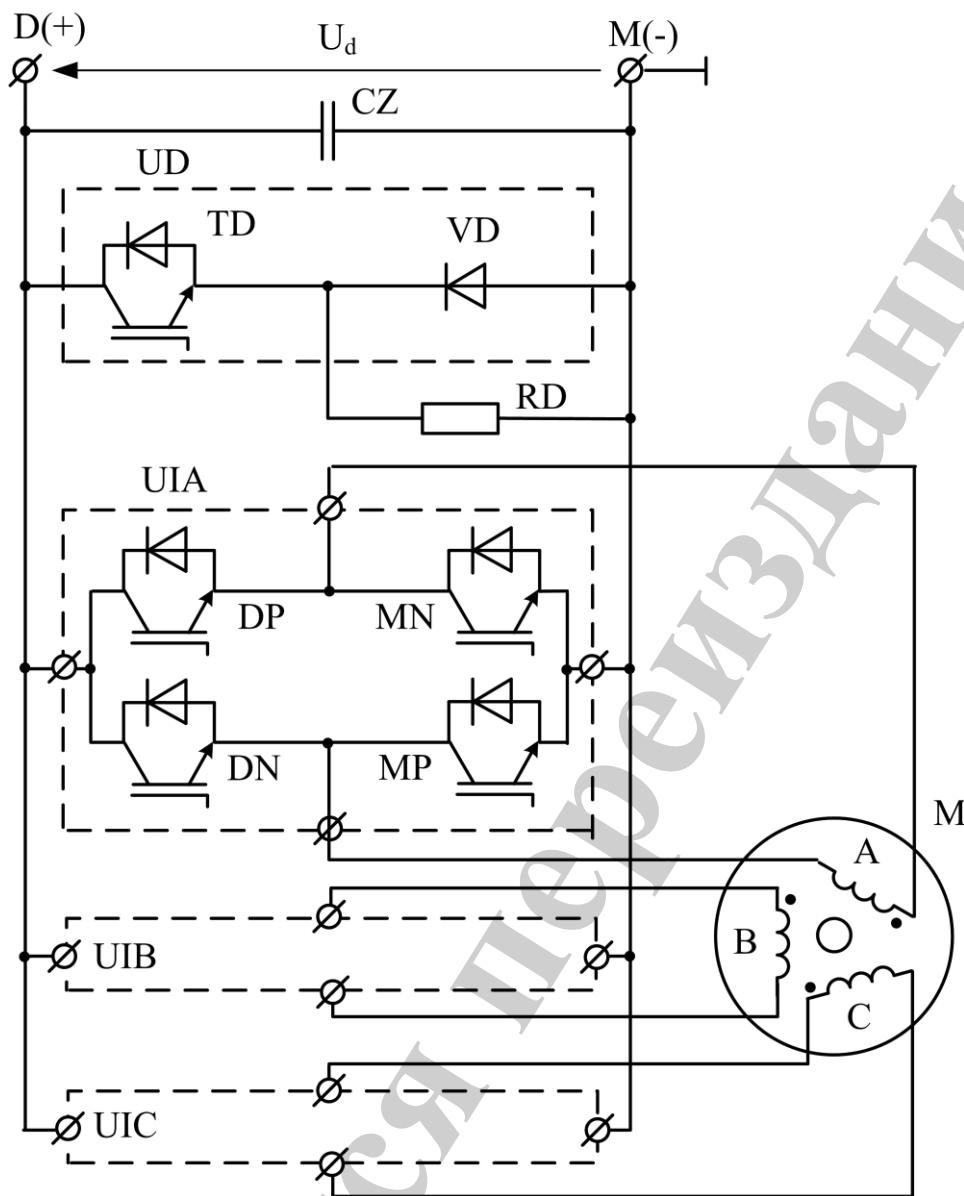


Рис. 1. Упрощенная схема альтернативного ТАП

При питании от контактной сети на частотах  $f_s \leq f_{SB}$  частота модуляции  $f_M$  выходного напряжения преобразователя должна быть ориентировочно в три раза выше, чем при питании от источника низкого уровня напряжения. Это необходимо для того, чтобы обеспечить пульсацию тока двигателя в допустимом диапазоне. Соответственно, динамические потери мощности в IGBT-транзисторах по сравнению с питанием от аккумуляторной батареи на этой же скорости увеличиваются. Рис. 2 иллюстрирует диаграммы напряжений и токов при модуляции на уровне напряжения  $U_B$ .

На рис. 2 дан фрагмент ШИМ напряжения для случая, когда модуляция при напряжении меньше  $U_B$  осуществляется с одной и той же частотой  $f_{MB}$ , как при питании от аккумуляторной батареи, так и при питании от контактной сети. Из равенства площадей импульсов  $S_n = S_B$  следует:

$$U_n \tau_n = U_B \tau_B, \quad \tau_n = \frac{U_B}{U_n} \tau_B = \frac{80}{250} \tau_B \approx \frac{1}{3} \tau_B.$$

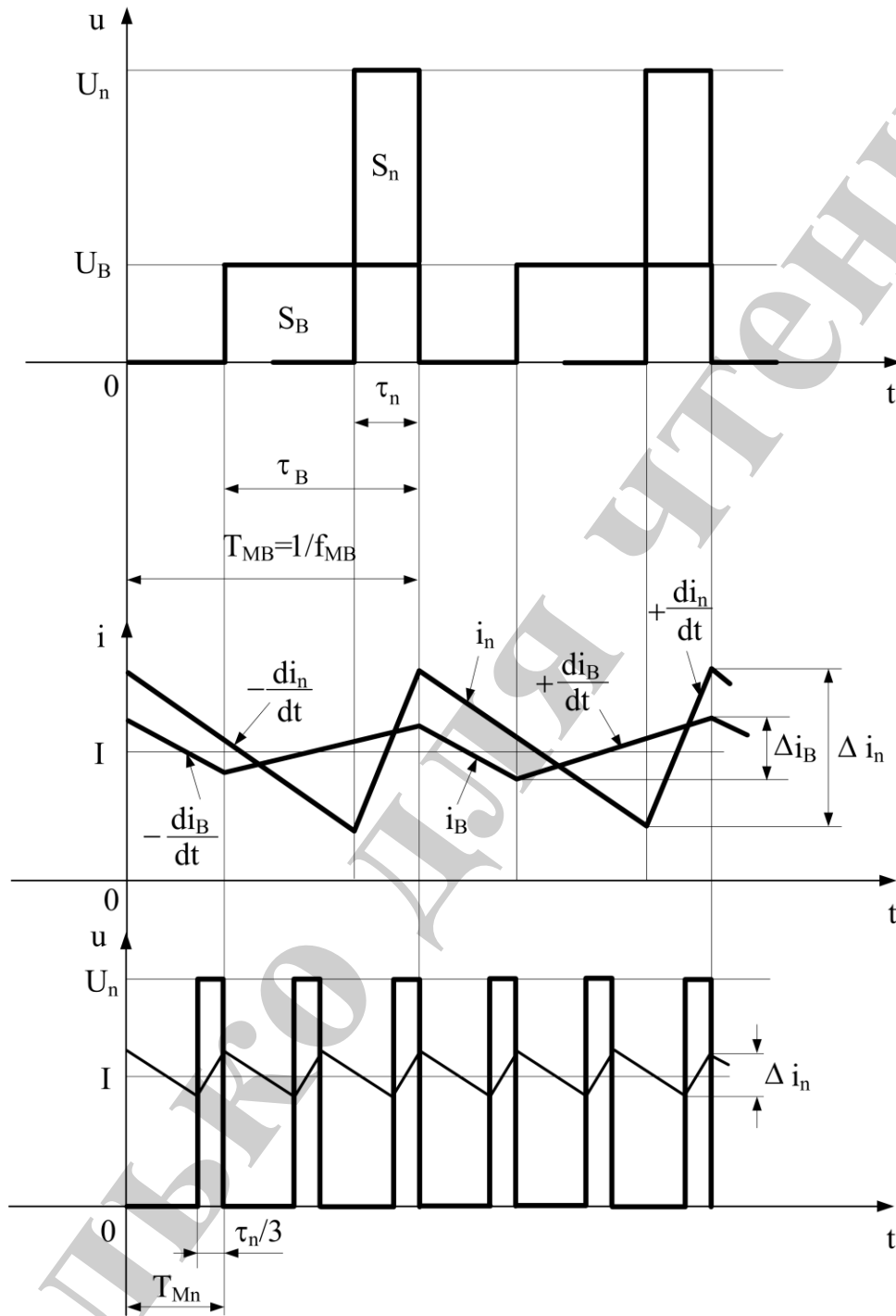


Рис. 2. Диаграммы напряжений и токов при модуляции на уровне напряжения  $U_B$

При этом токи двигателя будут изменяться, как показано на рис. 2, где фронты падения токов  $i_n$  и  $i_B$ , соответственно при питании от контактной сети и при питании от аккумуляторной батареи:

$$-\frac{di_n}{dt} = -\frac{di_B}{dt}.$$

Фронты нарастания токов:

$$\frac{di_n}{dt} \approx 3 \frac{di_B}{dt},$$

исходя из

$$\frac{di_n}{dt} = \frac{U}{L}.$$

В результате размах колебаний тока двигателя при питании от контактной сети будет недопустимо высок. Отсюда следует необходимость повышения частоты модуляции  $f_{Mn}=1/T_{Mn}$ , по крайней мере в три раза, как показано на рис. 2, а это, как отмечено выше, приводит к увеличению динамических потерь мощности в IGB-транзисторах.

Избежать повышения частоты модуляции напряжения питания ТАП можно путем выравнивания уровней преобразуемых напряжений. Это достигается путем разработки алгоритма управления спаренными мостами контура питания ТАД. При питании от ТАБ и от КС с высоким уровнем выходного напряжения действуют параллельно и синхронно. При питании от контактной сети с низким уровнем выходного напряжения в мостах отключены смежные IGB-транзисторы, а моделируют крайние.

В результате образуется единый мост, питающий последовательно соединенные одноименные обмотки двигателей, к каждой из них приложена половина преобразуемого напряжения, сравнимая по величине с напряжением, преобразуемым при питании от аккумуляторной батареи. Таким образом, происходит выравнивание напряжений на низком уровне выходного напряжения, в результате не требуется повышать частоту ШИМ. Кроме того, при последовательном соединении обмоток в едином спаренном мосте статические потери мощности в IGB-транзисторах вдвое, а динамические потери – в четыре раза меньше, чем в стандартном инверторе [15].

Одним из приемов выравнивания напряжений является применение преобразователей с перестраиваемой структурой. Такие преобразователи содержат инверторные блоки, которые могут быть включены параллельно или последовательно. При питании от источника низкого напряжения инверторные блоки включены параллельно во всем диапазоне изменения выходного напряжения. В случае питания от источника высокого напряжения инверторные блоки соединяются последовательно в диапазоне низких выходных напряжений и параллельно в диапазоне высоких выходных напряжений.

Вариант схемы преобразователя с перестраиваемой структурой приведен на рис. 3, схема приспособлена к альтернативной системе электропривода [14].



Взамен векторной ШИМ принята непосредственная ШИМ напряжения. Диаграммы управления и фрагменты кривых выходного напряжения преобразователя приведены на рис. 4, 5 для случая одновременного синхронного формирования положительной полуволны в инверторе 1UI и отрицательной полуволны в инверторе 2UI.

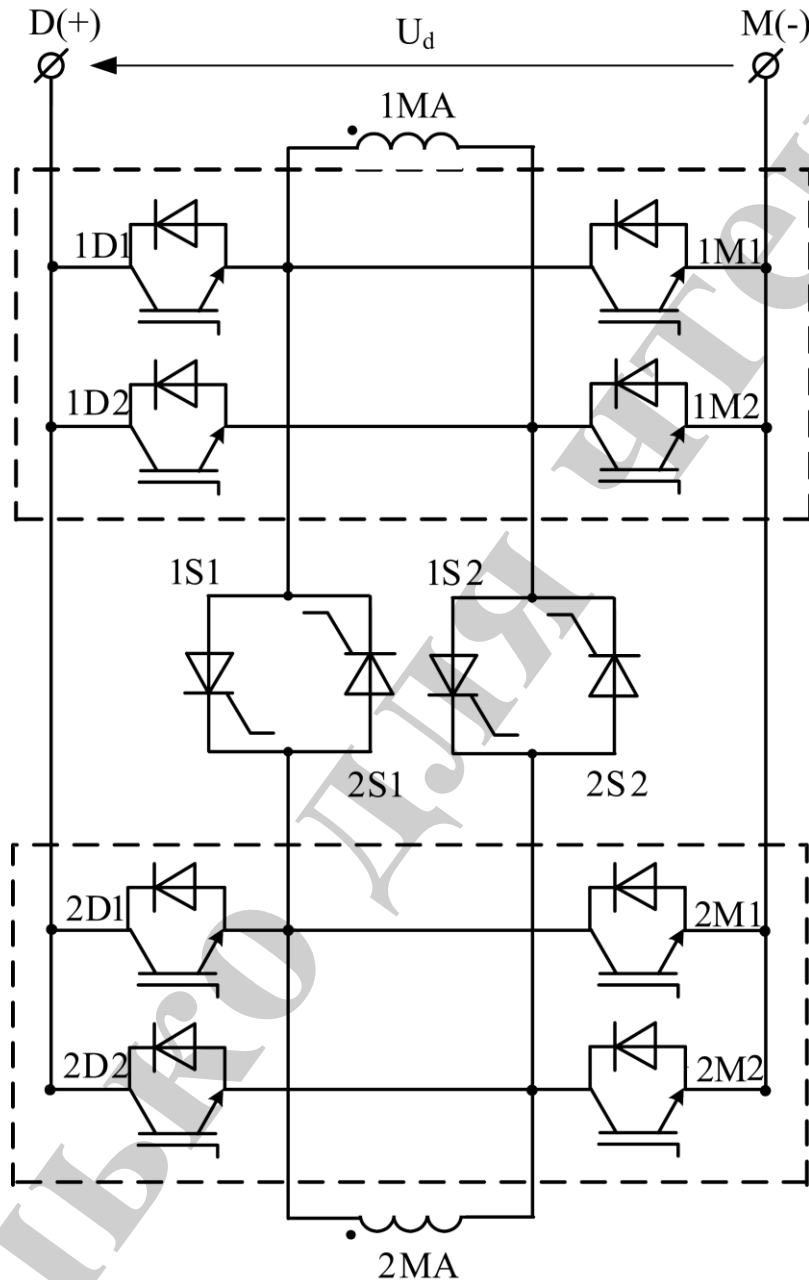


Рис. 3. Принципиальная схема перестраиваемого инвертора с промежуточными тиристорами

На интервале  $\tau_{0S}$  включены IGB-транзисторы  $1D1$ ,  $2M1$  и тиристор  $1S2$  (рис. 3). Таким образом, образуется последовательное соединение обмоток двигателей  $1MA$  и  $2MA$  и, следовательно, ток протекает по цепи  $D(+)$ – $1D1$ – $1MA$ – $1S2$ – $2MA$ – $2M1$ – $M(-)$ . При этом напряжение на каждой обмотке двигателя соответствует величине  $U_d/2$ .

На интервале  $\tau_0$  включены IGB-транзисторы 2M1 и тиристор 1S2, IGB-транзистор 1D1 отключен, ток протекает по цепи 1MA–1S2–2MA–2M1–1M1–1MA, напряжение на обмотках равно нулю.

Изменением соотношения длительностей интервалов  $\tau_0$  и  $\tau_{0S}$  на периоде модуляции  $T_M$  (процесс ШИМ) регулируется величина напряжения на каждой обмотке двигателя в диапазоне от 0 до  $U_d/2$  (рис. 4).

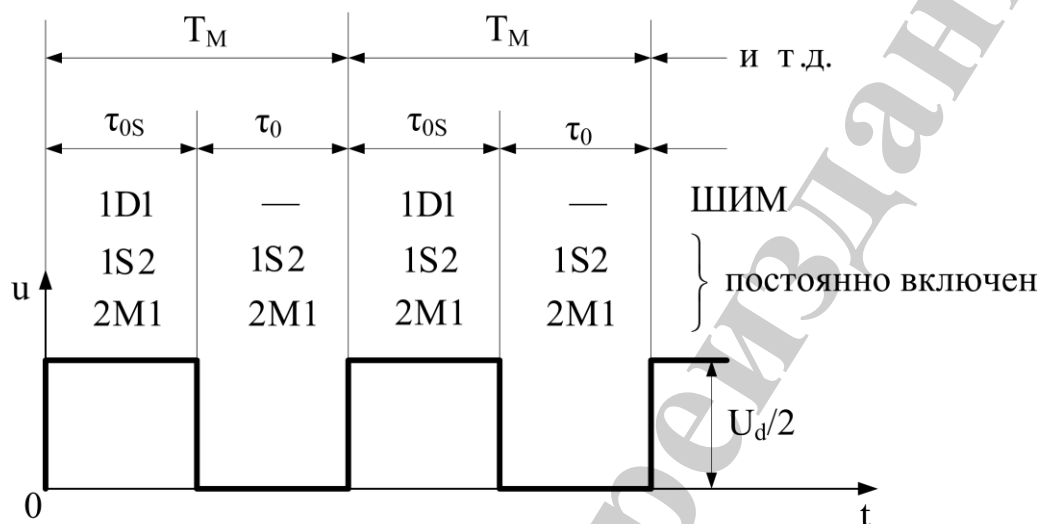


Рис. 4. Диаграммы выходного напряжения преобразователя в диапазоне от 0 до  $U_d/2$

Далее для повышения преобразуемого напряжения более  $U_d/2$  схема переходит на алгоритм управления по рис. 5. На интервале  $\tau_1$  включены IGB транзисторы 1D1, 1M2, 2D2, 2M1 токи протекают по параллельным цепям D(+)-1D1-1MA-1M2-M(-) и D(+)-2D2-2MA-2M1-M(-), к каждой обмотке двигателя прикладывается напряжение  $U_d$ .

На интервале  $\tau_{0S}$  включены IGB-транзисторы 1D1, 2M1 и тиристор 1S2, IGB-транзисторы 1M1, 2D2 отключены, на обмотках по  $U_d/2$ . Соотношением  $\tau_1$  и  $\tau_{0S}$  определяется диапазон изменения напряжения на обмотках  $\left[ \frac{U_d}{2} \dots U_d \right]$ .

Интегральная синусоида выходного напряжения  $U_{m1} \sin \omega_s t$  при  $U_{m1} > \frac{U_d}{2}$  формируется сочетанием алгоритмов по рис. 4, 5, а именно: от нуля до  $U_d/2$  – по алгоритму  $\tau_0 + \tau_{0S}$ , от  $U_d/2$  и выше – по алгоритму  $\tau_{0S} + \tau_1$ .

Достоинством представленной перестраиваемой схемы инвертора и способа управления ею является сокращение количества коммутаций полупроводниковых приборов. Для отключения тиристоров, например, 1S2, не требуется специальных устройств принудительной коммутации. Тиристор 1S2 отключается в момент включения IGB-транзисторов 2D2–1M2 (начало  $\tau_1$ ) под действием напряжения источника  $U_d$ , приложенного к нему в обратном направлении.

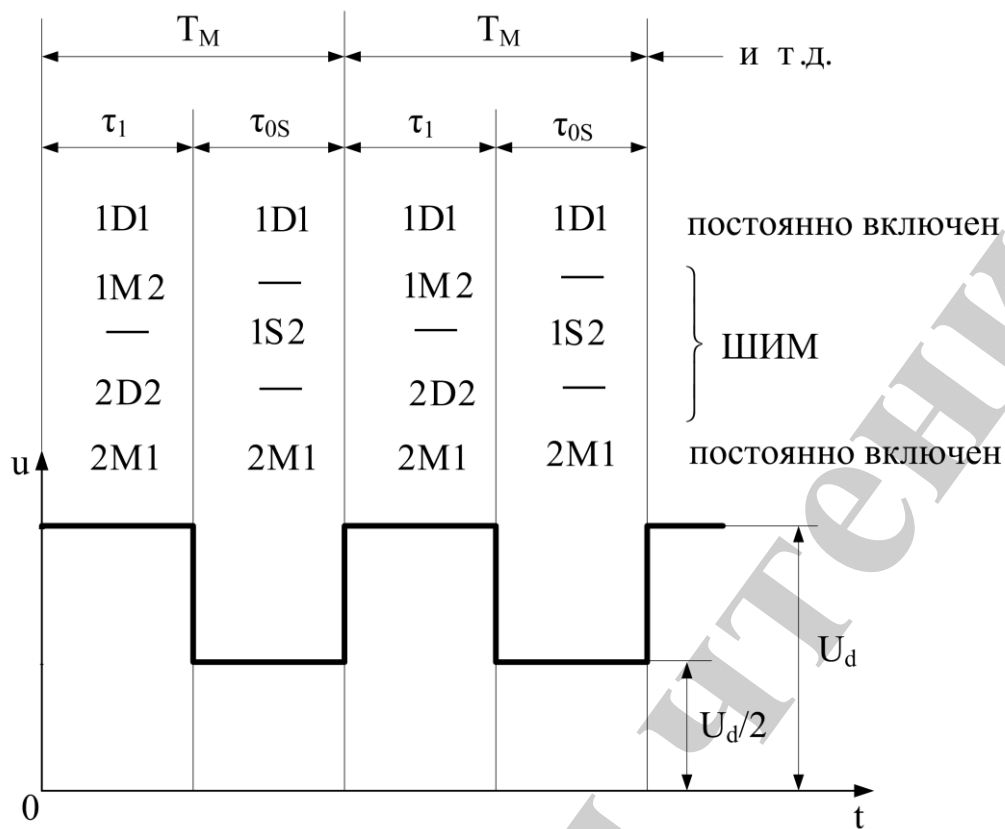


Рис. 5. Диаграммы выходного напряжения преобразователя

в диапазоне  $\left[ \frac{U_d}{2} \dots U_d \right]$

Схема приспособлена к альтернативной системе электропривода по рис. 1 [14]. Взамен векторной ШИМ принята непосредственная ШИМ напряжения.

В отличие от предыдущей схемы, переход с одного алгоритма на другой осуществляется не плавно, а через состояние нуля тока. Поскольку процесс перехода длится миллисекунды, он не оказывает влияния на движение ТЭТК. Недостатком схемы является двойная токовая нагрузка на IGB-транзисторы D1, D2, M1, M2.

## 5. Математическое моделирование инвертора напряжения питания тягового электрического двигателя

С целью исследования и анализа качества преобразования энергии и оценки потерь в элементах ТАП посредством исследования ШИМ напряжения питания была разработана модель структуры перестраиваемого инвертора с промежуточными тиристорами. Модель системы представлена на рис. 6 и содержит следующие блоки:

Блок 1 – Система питания. Данный блок имитирует режим работы инвертора от контактной сети и аккумуляторной батареи.

Блок 2 – IGB-транзисторный преобразователь, состоящий из двух однофазных инверторных мостов с промежуточными тиристорами [14, 15].

Блоки 3 и 4 – Разомкнутые обмотки 1 МА и 2 МА соответственно.

Блок 5 – Система управления IGB-транзисторным преобразователем.

Блок 6 – Система управления тиристорами.

Блок 7 – Блок переключения режимов контактная сеть – аккумулятор.

В модели предусматривается двухсистемный режим питания инвертора: питание как от КС (275 В), так и от ТАБ (80 В). В качестве режима управления рассматривались два режима работы системы:

– система формирования напряжения питания обмоток при параллельном их соединении (питание от ТАБ);

– система формирования напряжения питания обмоток при последовательном их соединении (питание от КС).

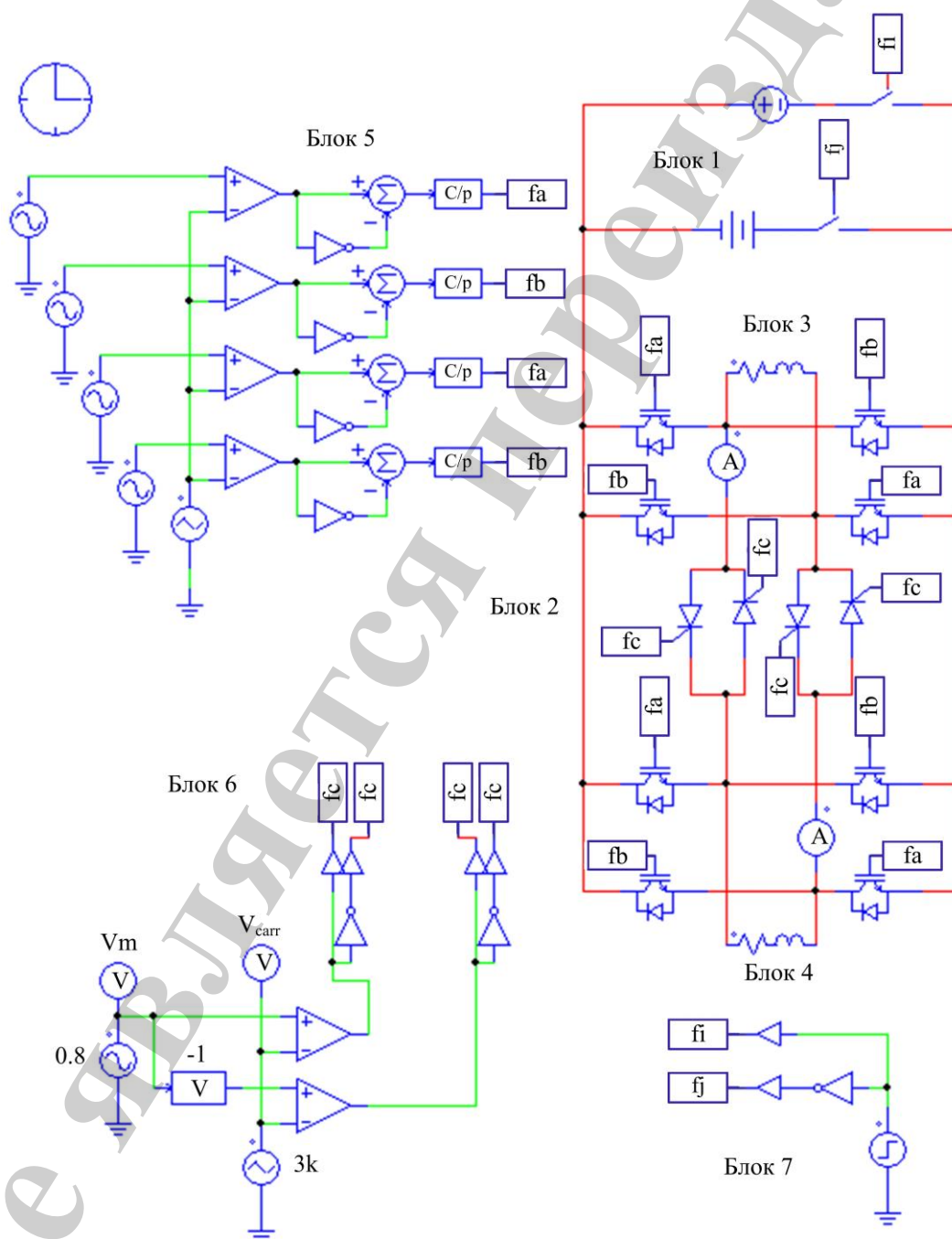
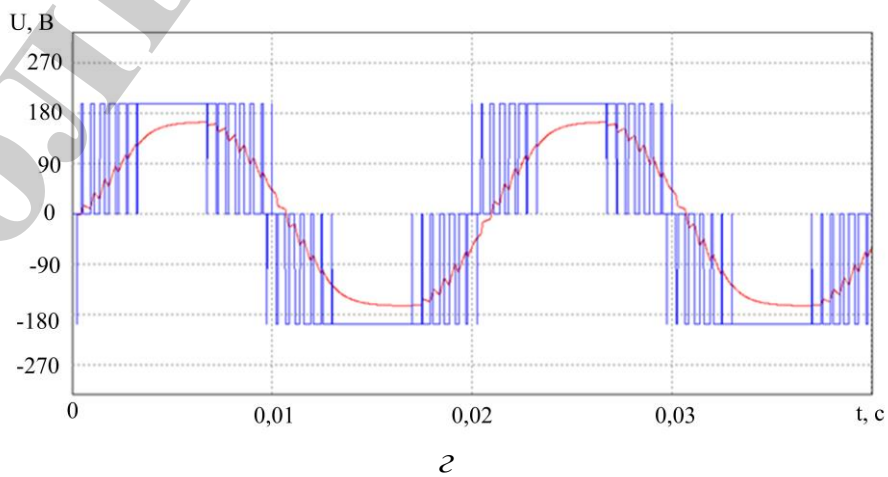
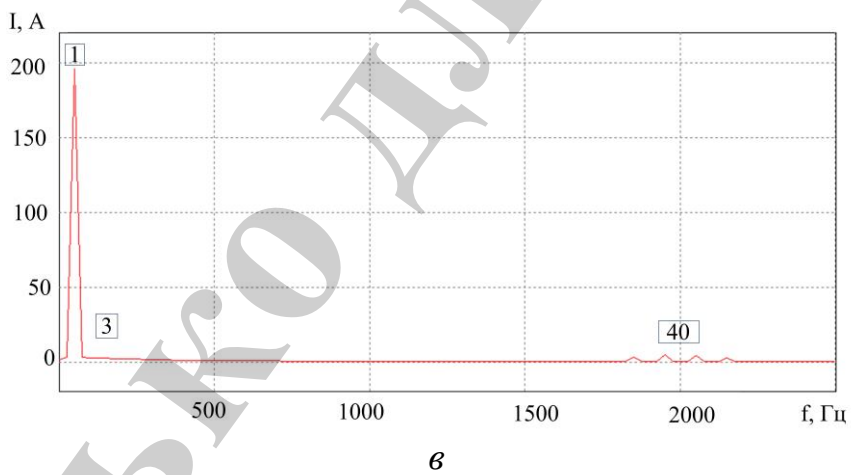
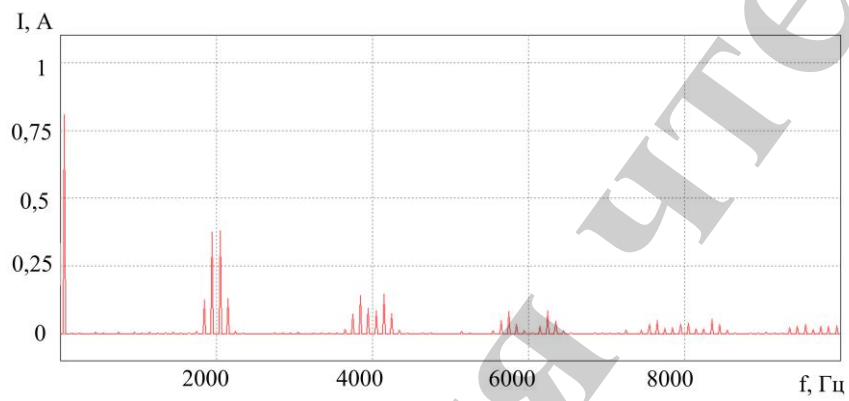
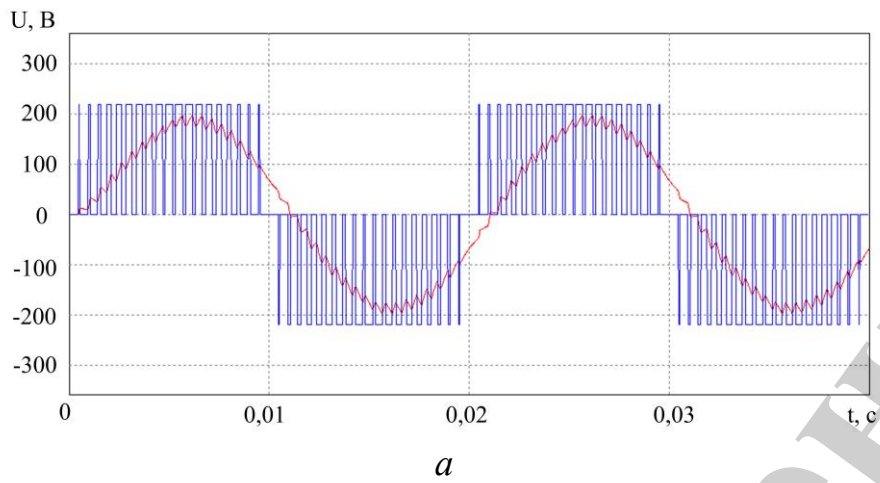
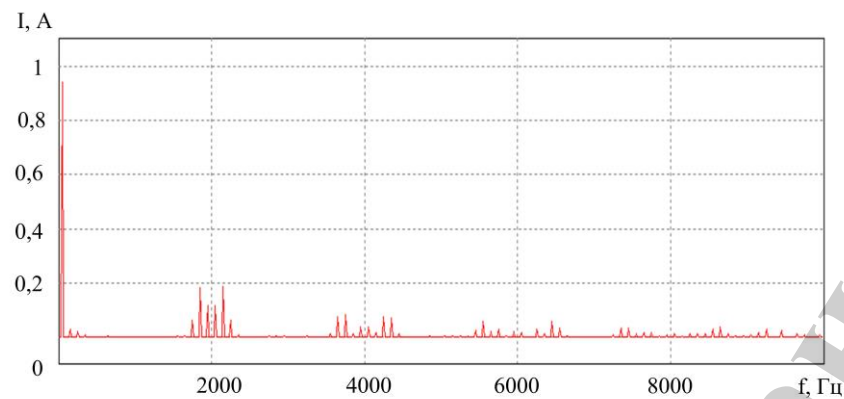
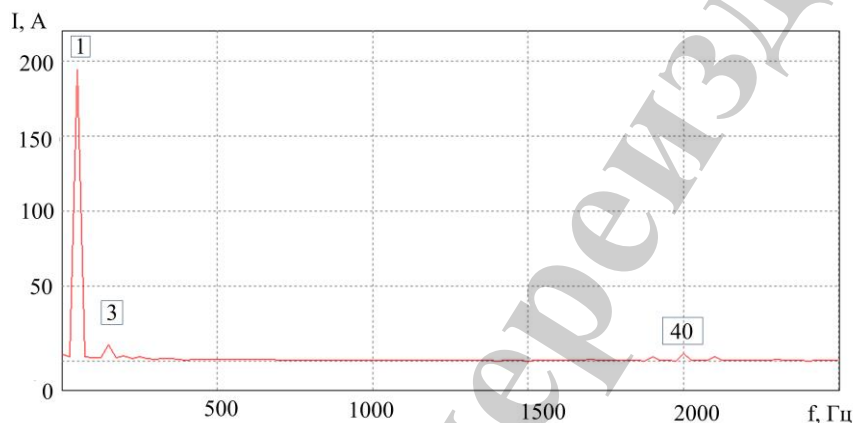


Рис. 6. Модель инвертора напряжения питания тягового электрического двигателя





а



б

Рис. 7. Осциллограммы фазных напряжений и токов на обмотках 1МА-2МА и их гармонический состав: *а* – напряжение при последовательном соединении; *б* – ток при последовательном соединении; *в* – гармонический состав тока при последовательном соединении; *г* – напряжение при параллельном соединении; *д* – ток при параллельном соединении; *е* – состав тока при параллельном соединении

Анализ гармонического состава выходного напряжения и тока автономного инвертора напряжения, полученного в результате ШИМ, производился при частотах коммутации транзисторных ключей в диапазоне от 2 до 6 кГц.

Как видно из результатов моделирования (рис. 7), для ШИМ по синусоидальному закону низкочастотный спектр напряжения содержит только главную гармонику с частотой  $f_{\text{вых}} (k=1)$ . В области высоких частот группы компонентных гармоник, расположенные вблизи частот, которые кратны частоте коммутации  $f_n$ . Амплитуда главной гармоники при двухполярной ШИМ равна  $U_{K.M}/2$ , где  $U$  – напряжение источника питания. Частота  $n$ -й гармоники определяется:

$$f_k = af_n \pm bf_1, \quad (1)$$

где  $f_1$  – основная частота 1-й гармоники;  $f_n$  – частота коммутации транзисторов инвертора;  $a$  – кратность группы высокочастотных гармоник;  $b$  – кратность основной частоты в группе основной гармоники.

Как показал анализ, повышение частоты несущего сигнала приводит не к исключению ряда гармонических составляющих из спектра выходного напряжения преобразователя, а к их перемещению в область более высоких частот. Это, в свою очередь, может привести к росту потерь в ТАД. Поэтому важным вопросом является выбор оптимальной частоты ШИМ с целью минимизировать потери энергии в ТАД.

## 6. Обсуждение результатов моделирования инвертора напряжения питания тягового электрического двигателя

Как известно [4, 7, 17], интенсивность высших гармонических составляющих в спектре ШИМ-последовательности характеризует коэффициент гармоник:

$$k_{г.к.} = \frac{C_{\text{экв}}}{C_1} = \frac{\sqrt{\sum_{k=2}^N C_k^2}}{C_1}, \quad (2)$$

где  $C_1$  – амплитуда основной гармоники выходного напряжения;  $k$  – номер гармоники;  $N$  – количество гармоник.

При известных параметрах нагрузки коэффициент  $k_{г.к.}$  позволяет определить коэффициент гармоник для выходного тока инвертора:

$$k_{г.л} = k_{г.к} \frac{Z(f_{\text{вых}})}{Z(f_k)}, \quad (3)$$

где  $Z(f_{\text{вых}})$  и  $Z(f_k)$  – модуль сопротивления нагрузки на выходной частоте и на частоте коммутации. Точность расчета по выражению (3) возрастает при увеличении частоты коммутации.

При двухсторонней модуляции фронтов в спектре трехфазной ШИМ уменьшаются гармонические составляющие вблизи частоты коммутации, но значительно растут составляющие в области второй гармоники частоты коммутации [7].

Эти гармоники, несмотря на вдвое большую частоту, могут заметно влиять на ток нагрузки, имеющей индуктивную реакцию для высших гармоник.

В ходе исследований на модели была получена зависимость коэффициента гармоник  $K_{г.л}$  от частоты  $f$  выходного напряжения, приведенная на рис. 8.

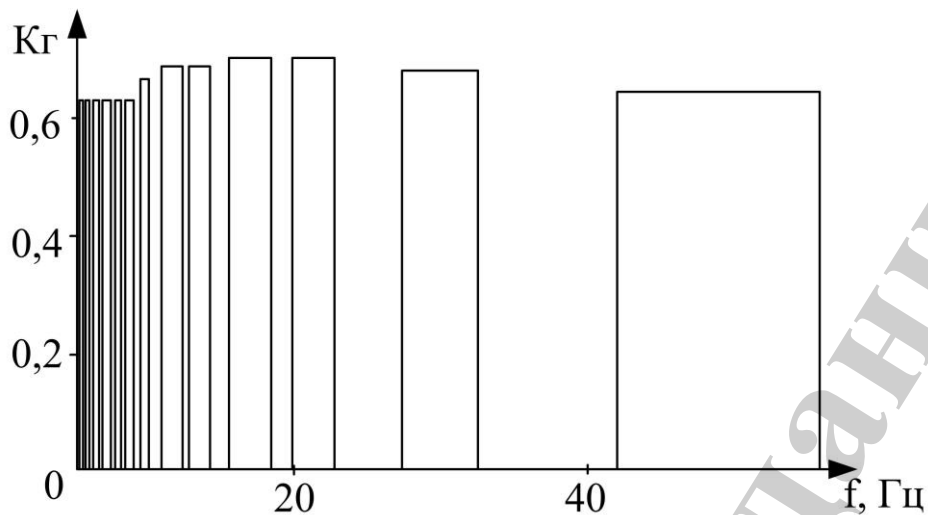


Рис. 8. Зависимость коэффициента гармоник  $K_G$  от частоты  $f$  выходного напряжения АИН

Как известно, потери в обмотках и стали АД зависят от частот и амплитуд гармоник тока и напряжения, а повышение частоты несущего сигнала приводит к увеличению электрических потерь в АД [18]. Электрические потери в обмотках АД от тока высшей гармоники равны:

$$\Delta P_{эл.v} = \frac{K_{п}^2 \Delta P_{эл.ном}}{v} \left( \frac{U_v}{U_1} \right)^2, \quad (4)$$

где  $\Delta P_{эл.ном}$  – электрические потери в обмотках в номинальном режиме для первой гармоники;  $K_{п}$  – кратность пускового тока (для частотно регулируемых ТАД-45кВт принимается равным  $K_{п}=4,2$ );  $U_v$  – амплитуда напряжения  $v$ -гармоники;  $U_1$  – амплитуда напряжения первой гармоники.

Коэффициент увеличения электрических потерь в обмотках АД от токов высших гармоник определяется из выражения:

$$K_{эл} = \frac{\Delta P_{эл.ном} + \sum_{v=5}^N \Delta P_{эл.v}}{\Delta P_{эл.ном}} = 1 + K_{п}^2 \sum_{v=5}^N \left[ \frac{1}{v} \left( \frac{U_v}{U_1} \right)^2 \right], \quad (5)$$

где  $\Delta P_{эл.v}$  – электрические потери в обмотках АД для  $v$ -ой гармоники.

Коэффициент увеличения потерь в стали магнитопровода АД от действия высших гармоник напряжения составляет:

$$K_{ст} = \frac{\Delta P_{ст.1} + \sum_{v=5}^N \Delta P_{ст.v}}{\Delta P_{ст.1}} = 1 + K_{высш.гарм.ст} \sum_{v=5}^N \left[ \frac{1}{v^{0,7}} \left( \frac{U_v}{U_1} \right)^2 \right], \quad (6)$$



где  $\Delta P_{ст.1}$  – потери мощности в стали магнитопровода АД в номинальном режиме для первой гармоники;  $\Delta P_{ст.□}$  – потери мощности в стали магнитопровода АД для  $\square$ -ой гармоники;  $K_{высш.гарм.ст}$  – коэффициент высших гармоник.

Результаты определения коэффициентов увеличения электрических потерь в обмотках и в стали АД приведены на рис. 9.

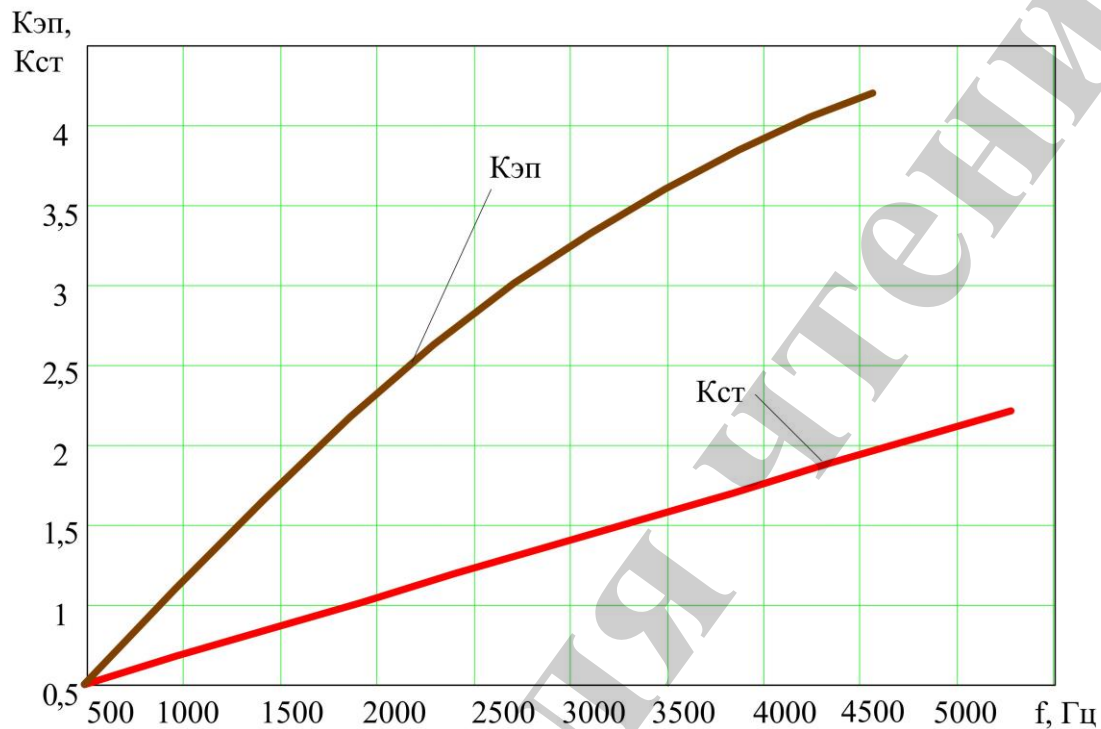


Рис. 9. Зависимость коэффициента увеличения электрических потерь в обмотках АД и коэффициент увеличения потерь в стали магнитопровода АД от частоты  $f$  выходного напряжения инвертора напряжения

Электрические потери в обмотках АД составляют в среднем около 60 %, а потери в стали магнитопровода асинхронного двигателя – 25 % от общих потерь [18]. Поэтому определение коэффициентов возрастания потерь в АД от действия высших гармонических напряжения и тока, при возрастании частоты ШИМ важно при выборе частоты коммутации силовых ключей преобразователя и фильтрокомпенсирующих устройств.

Предложена новая структура преобразователя и способ управления инверторными мостами блока питания ТАД. Управление осуществляется непосредственной ШИМ, что позволяет снизить число коммутаций силовых транзисторов в отличие от систем векторного управления.

Перестраиваемая структура преобразователя позволяет осуществлять питание ТАД от источников разного уровня напряжения без изменения частоты ШИМ, что невозможно было реализовать в классической структуре преобразователя. Это позволит уменьшить уровень потерь электрической энергии в контуре преобразования напряжения питания ТАД.

К недостаткам можно отнести необходимость включения-отключения тиристора в процессе ШИМ, что снижает частотные возможности ШИМ, по-

сколькx время включения и отключения тиристора более чем на порядок превышает время переключения IGB-транзистора. Кроме того, наличие промежуточных тиристорov утяжеляет устройство. Поэтому на перспективу стоит рассмотреть варианты перестраиваемой схемы преобразователя с промежуточными IGB-транзисторами.

Теоретические исследования структуры рудничных контактно-аккумуляторных электровозов с двухуровневым режимом питания ТАД недостаточны для полного анализа режимов работы ТЭТК в целом. Поэтому дальнейшим развитием работы является разработка и исследование экспериментального образца инвертора с двухуровневым режимом питания ТАД.

Вышеизложенные способности предложенной схемы ТАП делают ее универсальной, способной эффективно работать как при питании от аккумуляторной батареи, так и при питании от контактной сети. Разработанная новая структура контактно-аккумуляторного ТЭТК открывает путь к созданию новых энергоэффективных и электробезопасных образцов шахтных рудничных электровозов.

Результаты исследований рекомендуются к дальнейшему внедрению на рудничных и промышленных электровозах соответствующих видов.

## **7. Выводы**

1. Предложена схема инвертора для питания ТАП рудничных электровозов от разных источников (контактной сети, батареи тяговых аккумуляторов), позволяющая выравнивать уровни напряжений питания ТАД на более низком уровне. Это достигается соответствующим алгоритмом управления инверторными мостами контура их питания. Благодаря выравниванию напряжений частота ШИМ не изменяется, что в свою очередь приводит к уменьшению динамических потерь к транзисторах по крайней мере в 3 раза по сравнению со стандартной схемой инвертора.

2. В результате исследований установлено, что наилучшие показатели коэффициента гармоник получены на частотах от 10 до 30 Гц, которые являются наиболее используемыми для обеспечения движения электровоза в ортах заездах на скоростях 4–5 км/ч (частота 10 Гц) и скорости при откатке 12 км/ч (частота 30 Гц), т. е. режим работы преобразователя на этих частотах наиболее эффективен.

3. В классической схеме инвертора при переходе на более высокий уровень напряжения, как говорилось ранее, необходимо увеличить частоту ШИМ в 3 раза. Это приведет к увеличению коэффициента электрических потерь в обмотках АД в 3,42 раза, а коэффициент увеличения потерь в стали магнитопровода в 2,02 раза. В случае использования предлагаемой схемы инвертора, при выравнивании напряжений на низком уровне, не требуется повышать частоту ШИМ, что не вызовет роста электрических потерь в АД.

## **Литература**

1. Синчук О. Н., Синчук И. О., Гузов Э. С. Комбинаторика преобразователей напряжения современных тяговых электроприводов рудничных электровозов. Киев, 2006. 252 с.

2. Степаненко В. П., Синчук О. Н., Гузов Э. С. Шахтный контактно-аккумуляторный электровоз // Горный журнал. 1988. № 6. С. 55–57.
3. Полупроводниковые преобразователи электрической энергии в структурах электроприводов. Схемотехника и принципы управления: учеб. пособие / Синчук И. О., Чернышев А. А., Пасько О. В., Киба И. И., Ключка А. С., Мельник О. Е. Кременчуг, 2008. 88 с.
4. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Москва, 1998. 33 с.
5. Карташов Р. П., Кулиш А. К., Чехет Э. М. Тиристорные преобразователи частоты с искусственной коммутацией. Киев, 1979. 152 с.
6. Zhang C., Gao Z. A Cascaded Multilevel Inverter Using Only One Battery with High-Frequency Link and Low-Rating-Voltage MOSFETs for Motor Drives in Electric Vehicles // Energies. 2018. Vol. 11, Issue 7. P. 1778. doi: <https://doi.org/10.3390/en11071778>
7. Рябов Е. С., Петренко А. Н., Оверьянова Л. В. Анализ потерь в тяговом асинхронном двигателе при различных режимах питания // Евразийский союз ученых. 2016. № 12-2. С. 59–65.
8. Space vector PWM strategy for a thirteen-level hybrid inverter / Ramirez-Hernandez J., Araujo-Vargas I., Cano-Pulido K., Forsyth A. J. // 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). 2013. doi: <https://doi.org/10.1109/epe.2013.6634470>
9. Power sharing algorithm for vector controlled six-phase AC motor with four customary three-phase voltage source inverter drive / Padmanaban S., Grandi G., Blaabjerg F., Olorunfemi Ojo J., Wheeler P. W. // Engineering Science and Technology, an International Journal. 2015. Vol. 18, Issue 3. P. 408–415. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2015.02.002>
10. Oleschuk V., Ermuratskii V. Multilevel Converters with Voltage Waveform Symmetries for Power Six-Phase Traction Drive // Problems of the Regional Energetics. 2015. Issue 1 (27). P. 27–34.
11. Sizing of a hybrid locomotive based on accumulators and ultracapacitors / Jaafar A., Sareni B., Roboam X., Thiounn-Guermeur M. // 2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. 2010. doi: <https://doi.org/10.1109/vppc.2010.5729131>
12. A Research for AC Drive System of Electric Locomotive / Zhu J., Liu K., Tu Y., Yuan Y., Zhen R. // 2013 Fifth International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. 2013. doi: <https://doi.org/10.1109/icmtma.2013.31>
13. О реализации закона оптимального управления тяговым электротехническим комплексом / Синчук О. Н., Скапа Е. И., Шокарев Д. А., Гузов Э. С., Синчук И. О. // Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2011. № 3. С. 140–141.
14. Шокарьов Д. А., Скапа Є. І. Тяговий асинхронний електропривід: Пат. № 67134 UA. № u201105247; заявл. 26.04.2011; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 3.
15. The control of the traction asynchronous electric drive of the miner electric locomotive with dual-mode supply / Shokarov D., Zacheпа I., Zacheпа N., Chor-

na V., Susyk D. // 2017 International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES). 2017. doi: <https://doi.org/10.1109/mees.2017.8248950>

16. Ying-hao X., Yu H., Li C. Present situation and prospect of lithium-ion traction batteries for electric vehicles domestic and overseas standards // 2014 IEEE Conference and Expo Transportation Electrification Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific). 2014. doi: <https://doi.org/10.1109/itec-ap.2014.6940614>

17. Шаповал В. Г., Синчук И. О., Черная В. О. К вопросу анализа импульсных способов формирования форм кривых тока и напряжения питания 2-х и 3-х фазных тяговых двигателей // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. 2008. № 1 (48). С. 11–15.

18. Радин В. И., Брускин Д. Э., Зорохович А. Е. Электрические машины. Асинхронные машины: учеб. пособие. Москва, 1988. 328 с.

Не являється перевідом