

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ СХЕМНЫХ РЕШЕНИЙ ТЯГОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭЛЕКТРОВОЗА С ПРОМЕЖУТОЧНЫМ ЗВЕНОМ ПОВЫШЕННОЙ ЧАСТОТЫ

Введение. В настоящее время, наиболее перспективным в качестве привода тягового электрического подвижного состава железных дорог Украины считается асинхронный тяговый двигатель с короткозамкнутым ротором. На железных дорогах мира такой привод широко используется порядка 30 лет. Основным преобразователем для получения трехфазного напряжения на зажимах двигателей, в большинстве случаев, применяется автономный инвертор напряжения на основе тиристорных или биполярных транзисторов с изолированным затвором. Из возможных вариантов силовых схем статических преобразователей частоты и числа фаз для магистральных электропоездов переменного тока практически всегда применяют схему с входным 4q-S преобразователем (неуправляемый выпрямитель с широтно-импульсным регулированием) и автономным инвертором напряжения (АИН), а для электропоездов постоянного тока – схемы с входным импульсным регулятором и автономным инвертором напряжения или прямым подключением последнего к напряжению контактной сети [1]. Для электропоездов двойного питания эти два входных преобразователя совмещают в одном, максимально используя элементную базу для преобразования постоянного и переменного тока.

Как альтернатива, в научных разработках предлагаются достаточно интересные функциональные решения, позволяющие исключить ряд недостатков 4q-S преобразователей. Одним из таких решений, в ряде работ [2, 3], рассматривается применение промежуточного преобразователя повышенной частоты. Основной аргументацией такого решения является снижение массы тягового трансформатора и повышение коэффициента полезного действия.

Результаты исследований. Общая функциональная схема электропоезда двойного питания с промежуточным контуром повышенной частоты может быть сведена к схеме, представленной на рис. 1 [2, 3].



Рис. 1 Общая функциональная схема тягового преобразователя с промежуточным звеном повышенной частоты

На вход выпрямителя поступает напряжение контактной сети. Стабилизация напряжения высоковольтной шины постоянного тока может быть выполнена либо элементами накопительного фильтра [2], либо применением в качестве выпрямителя 4q-S преобразователя [3]. Второй вариант предпочтительнее для обеспечения режима рекуперации. После накопительного фильтра включен инвертор, высокочастотный трансформатор и далее выпрямитель. Напряжение сети постоянного тока поступает на входной выпрямитель, элементы которого могут использоваться для импульсного регулирования напряжения [4]. В случае применения промежуточного звена повышенной частоты с двойным преобразованием вида напряжения, кроме снижения массы тягового трансформатора необходимо рассматривать и возможные варианты применения базовых схем преобразователей.

В работе [2] отдается предпочтение трехфазной системе передачи энергии высокочастотным промежуточным контуром. Показано, что трехфазный трансформатор будет иметь объем на 19 % меньше однофазного, что для электропоезда существенно. Однако, при рассмотрении возможных вариантов схемной реализации, учитывать только влияние частоты на параметры трансформатора недостаточно. В указанной работе приоритет за трехфазной передачей энергии выбран, исходя из того, что коэффициент мощности трехфазного мостового выпрямителя 0,955, коэффициент пульсации – 5,7 % и это дает очевидное преимущество перед однофазной передачей энергии. Однако указанные параметры действительны для питания выпрямителей от сети переменного синусоидального тока [5]. По функциональной схеме (см. рис. 1), источником энергии для инвертора напряжения является стабильная сеть постоянного тока. В результате преобразования автономным инвертором напряжения на входе трансформатора появляется переменное фазное и линейное напряжение одно- и двухуровневое

прямоугольной формы. В зависимости от принятого типа модуляции на выходе второго выпрямителя может быть большое число вариантов мгновенных значений напряжения. Рассмотрим влияние типа модуляции автономного трехфазного инвертора на ряд базовых показателей выпрямителя.

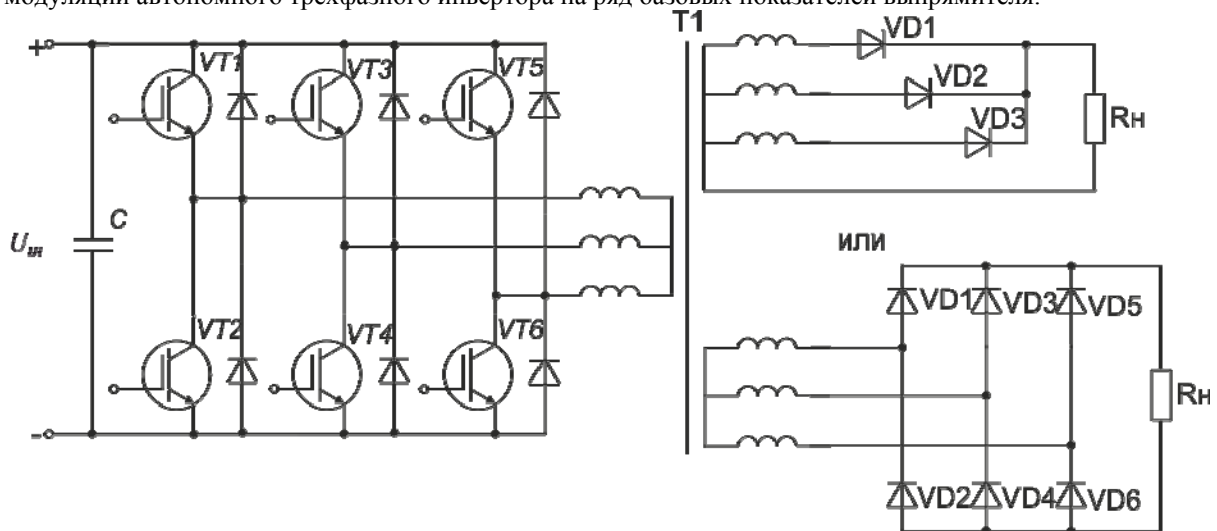


Рис. 2 Принципиальная схема тягового преобразователя с промежуточным звеном повышенной частоты

В качестве базовой рассматриваем схему, представленную на рис. 2. В схеме предполагаем применение типового автономного инвертора напряжения, в качестве ключей биполярные транзисторы с изолированным затвором, к выходу которого подключен трансформатор, первичная и вторичная обмотка – звезда. Выпрямители – схема Мацкевича (нулевая трехпульсовая) или схема Ларионова (мостовая шестипульсовая). Допущения принимаем типовые, применяемые при анализе схем выпрямления [5].

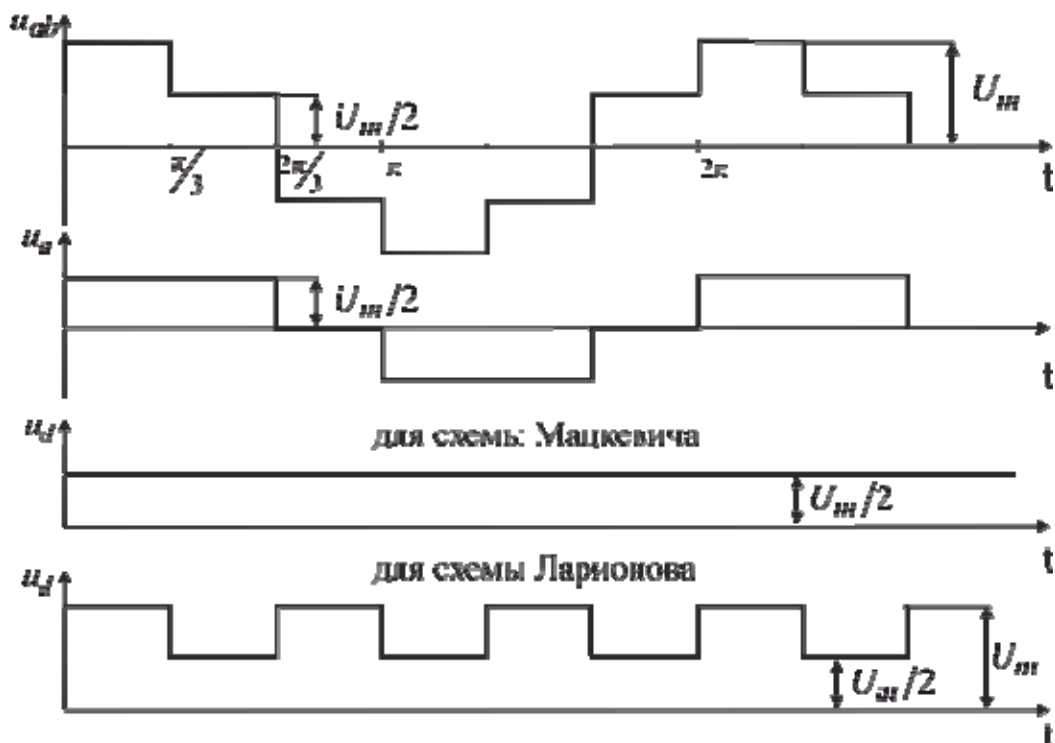


Рис. 3 Временные диаграммы напряжений на выходе инвертора с АИМ 120 град. эл. и на выходе выпрямителей

Для автономных инверторов напряжения существует несколько алгоритмов работы транзисторных ключей, но базовыми являются алгоритмы работы ключей при амплитудно-импульсной модуляции со 120, 150 и 180 градусов электрического открытого состояния в течение периода проводимости.

На рис. 3 показаны временные диаграммы линейных и фазных напряжений на выходе автономного инвертора напряжения с амплитудно-импульсной модуляцией (АИМ) при алгоритме 120 град. эл.

открытого состояния транзистора (показано одно фазное и линейное напряжение), мгновенное значение напряжения на выходе нулевой трехпульсовой и мостовой шестипульсовой схем выпрямления.

Определим расчетные соотношения для мостовой схемы выпрямления при АИМ 120 град. эл.

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_d = \frac{3}{2\pi} \left(\int_0^{\frac{\pi}{3}} U_m dt + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \frac{U_m}{2} dt \right) = \frac{3U_m}{4}. \quad (1)$$

где U_m – напряжение источника питания автономного инвертора напряжения.

Среднее значение тока плеча

$$I_V = I_d / 3. \quad (2)$$

где I_d – среднее значение тока нагрузки.

Обратное напряжение плеча

$$U_{bmax} = U_m = \frac{4U_d}{3}. \quad (3)$$

Эффективные значения токов вторичной и первичной обмоток

$$I_1 = I_2 = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\int_0^{\frac{\pi}{3}} I_m^2 dt + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \left(\frac{I_m}{2} \right)^2 dt \right)} = 0,86I_d, \quad (4)$$

поскольку $I_m = 4I_d/3$ – ток источника питания.

Эффективное напряжение для АИМ при алгоритме 120 град. эл. [5]

$$U_1 = U_2 = U_{\pi} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \left(\int_0^{\frac{\pi}{3}} \left(\frac{U_m}{2} \right)^2 dt + \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} U_m^2 dt + \int_{\frac{2\pi}{3}}^{\pi} \left(\frac{U_m}{2} \right)^2 dt \right)} = 0,7U_m = 0,93U_d. \quad (5)$$

Расчетная (типовая) мощность трансформатора

$$S_T = 0,5(S_1 + S_2) = 0,5(\sqrt{3}U_{\pi}I_1 + \sqrt{3}U_{\pi}I_2) = 1,385U_dI_d = 1,385P_d. \quad (6)$$

где P_d – среднее значение мощности на выходе выпрямителя.

Коэффициент использования трансформатора

$$k_p = \frac{P_d}{S_T} = \frac{1}{1,385} = 0,72. \quad (7)$$

Разложение кривой напряжения на выходе выпрямителя u_d в ряд Фурье, позволяет её представить в виде

$$u_d(\omega t) = \frac{3U_m}{4} + \frac{U_m}{15\pi} (15 \sin 3\omega t + 5 \sin 9\omega t + 3 \sin 15\omega t + \dots). \quad (8)$$

Коэффициент пульсации выпрямленного напряжения

$$k_q \approx \frac{U_{dm(3)}}{U_d} = \frac{4}{3\pi} = 0,42. \quad (9)$$

В таблице 1 представлены результаты расчетов перечисленных параметров типовых схем выпрямления для прочих случаев. Для сравнения в таблицу 1 включены параметры при условии питания выпрямителей от источника синусоидального напряжения и для мостовой двухпульсовой схемы выпрямления в случае синусоидального напряжения и прямоугольной модуляции 180° электрических.

Таблица 1

Параметры схем выпрямления при различных видах модуляции

| Тип схемы | Трехпульсовая нулевая | | | Шестипульсовая мостовая | | | Двухпульсовая мостовая | |
|------------------|-----------------------|-----------------|-------------|-------------------------|-----------------|-------------|------------------------|-----------------|
| | Модуляция | $\sin \omega t$ | 120° | 180° | $\sin \omega t$ | 120° | 180° | $\sin \omega t$ |
| Параметры | | | | | | | | |
| U_d | $1,17E_{2\phi}$ | $U_m/2$ | $U_m/2$ | $1,35E_{2\pi}$ | $0,75U_m$ | U_m | $0,9E_2$ | U_m |
| U_{bmax} | $2,09U_d$ | $2U_d$ | $2U_d$ | $1,05U_d$ | $1,333U_d$ | U_d | $1,57U_d$ | U_d |
| I_V | $I_d/3$ | | | | | | $I_d/2$ | |
| I_1 | $0,47I_d$ | $0,47I_d$ | $0,47I_d$ | $0,82I_d$ | $0,86I_d$ | $0,82I_d$ | $1,11I_d$ | I_d |
| I_2 | $0,58I_d$ | $1,15I_d$ | $1,15I_d$ | $0,82I_d$ | $0,86I_d$ | $0,82I_d$ | $1,11I_d$ | I_d |
| U_1 | $0,855U_d$ | $0,8U_d$ | $0,94U_d$ | $0,74U_d$ | $0,93U_d$ | $0,93U_d$ | $1,11U_d$ | U_d |
| U_2 | $0,855U_d$ | $0,8U_d$ | $0,94U_d$ | $0,74U_d$ | $0,93U_d$ | $0,93U_d$ | $1,11U_d$ | U_d |
| S_T | $1,35P_d$ | $1,92P_d$ | $2,27P_d$ | $1,05P_d$ | $1,385P_d$ | $1,155P_d$ | $1,23P_d$ | P_d |
| k_p | 0,74 | 0,52 | 0,44 | 0,95 | 0,72 | 0,86 | 0,815 | 1,0 |
| k_q | 0,25 | 0 | 0,42 | 0,057 | 0,42 | 0 | 0,66 | 0 |

Анализ типовых параметров показывает на очевидное преимущество в качестве промежуточного звена повышенной частоты однофазной системы при питании от сети переменного тока прямоугольной формы. Наиболее близка к показателям однофазной система, в которой питание выпрямителя осуществляется от трехфазного автономного инвертора напряжения с алгоритмом АИМ 180° эл. Действительно, при применении трехфазного трансформатора повышенной частоты возможно уменьшение его объема на 19% по сравнению с однофазным [2], что при коэффициенте использования трансформатора 86% дает общее преимущество в 5%. Но трехфазный автономный инвертор и выпрямитель имеют по 6 плеч против 4-х в однофазных системах. Кроме того, если применять систему без возврата энергии в сеть, то для 1-фазной системы можно обойтись и полумостовыми инверторами напряжения. И преимущество в 5% для трехфазной системы, в дальнейшем, снизится рядом показателей надежности.

Наложение на существующие алгоритмы АИМ широтно-импульсного регулирования или широтно-импульсной модуляции по известным законам [5] приведет к ухудшению указанных в таблице 1 показателей, ввиду наличия большого числа импульсов и пауз на выходе выпрямителя.

Вывод. По показателям схем выпрямления для электровоза двойного питания с промежуточным звеном повышенной частоты преимущества сохраняются за однофазными схемами преобразователей.

Список литературы

1. Бахвалов, Ю. А. Динамические процессы в асинхронном тяговом приводе магистральных электровозов: Монография [Текст] / Ю. А. Бахвалов, Г. А. Бузало, А. А. Зарифьян, П. Ю. Петров и др.; под ред. А. А. Зарифьяна. – М.: Маршрут, 2006. – 374 с.
2. Муха, А. М. Розвиток наукових основ створення тягових електропередач багатосистемних електровозів : авт. дис. д-ра т. н.: 05.22.09 [Текст] / А. М. Муха ; Дніпропетр. нац. ун-т залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Д., 2011. – 35 с.
3. Висин, Н. Г. Повышение надежности работы систем автоматического управления электропоездов: Монография [Текст] / Н. Г. Висин, Б. Т. Власенко, Д. А. Забарыло – Дн-вск: Маковецкий, 2012. – 256 с.
4. Система управления и диагностики электровоза ЭП10 [Текст]/ Под ред. С. В. Покровского. – М.: Интекст, 2009. – 356 с.
5. Бурков, А. Т. Электронная техника и преобразователи: учеб. для вузов ж.-д. трансп. [Текст] / А. Т. Бурков – М.: Транспорт, 1999. – 464 с.

УДК 621.314.58

Анализ вариантов схемных решений тягового преобразователя электровоза с промежуточным звеном повышенной частоты / Белухин Д. С. // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2013. – Вип. № 91 – С. 30–33.

Розглянуто показники типових схем випрямлення під час живлення від джерел змінного струму прямокутної форми для різних алгоритмів амплітудноімпульсної модуляції.

Рассмотрены показатели типовых схем выпрямления при питании от источника переменного тока прямоугольной формы для разных алгоритмов амплитудно-импульсной модуляции.

Відомості про авторів

1. Білухін Дмитро Сергійович
2. Доцент кафедри Електрорухомий склад залізниць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна
3. тел. каф. ЕРС (056) 373–15–31; моб. +380952333299; дом. (0562) 46–10–64; e-mail: comandor04@mail.ru.

Ключевые слова: функциональная схема, инвертор, выпрямитель, амплитудно-импульсная модуляция.