

Д.С. Белухин, канд. техн. наук

(Украина, Днепропетровск, Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна)

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].

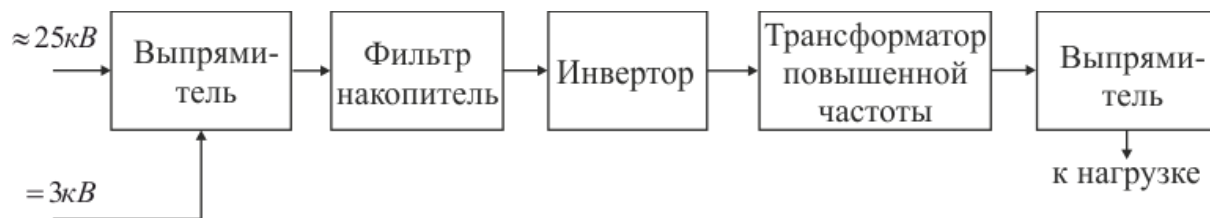


Рис. 1. Общая функциональная схема тягового преобразователя с промежуточным звеном повышенной частоты

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 зависимо-

сти 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.

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].

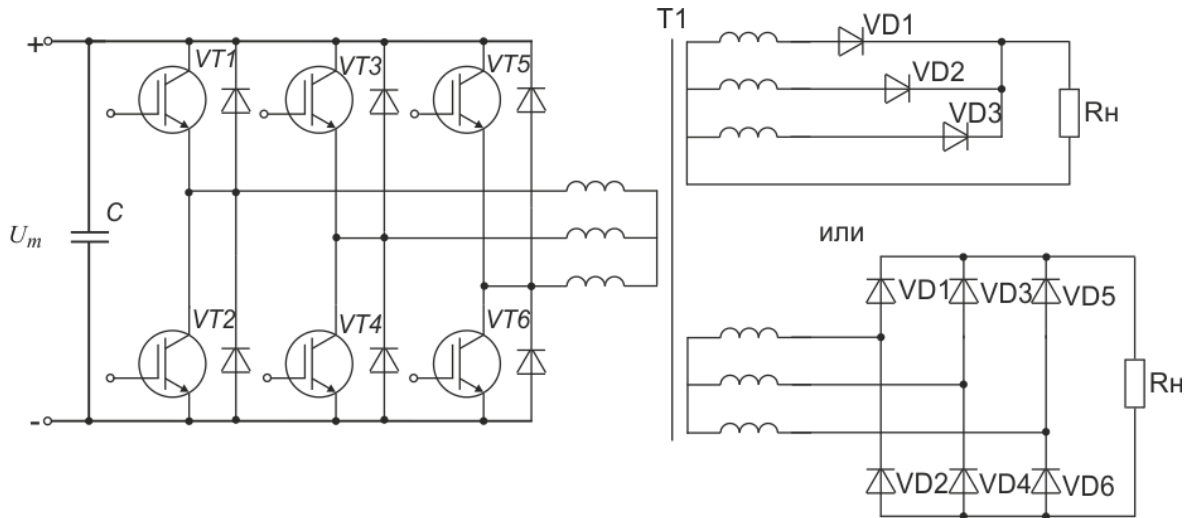


Рис. 2. Принципиальная схема тягового преобразователя с промежуточным звеном повышенной частоты

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 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.

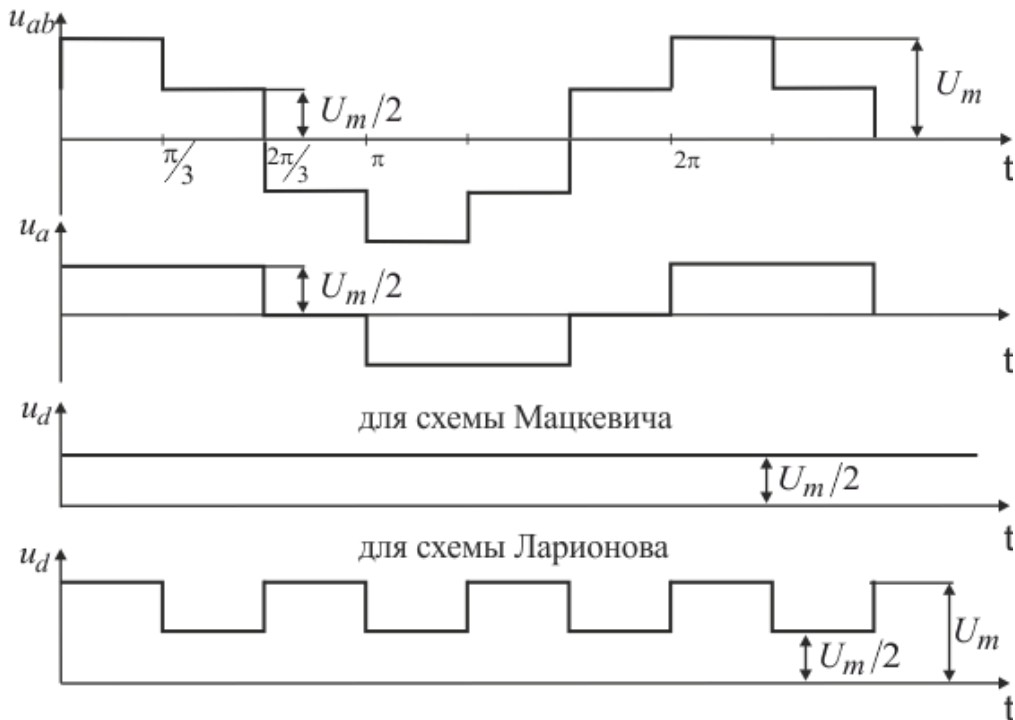


Рис. 3. Временные диаграммы напряжений на выходе инвертора с АИМ 120 град. эл. и на выходе выпрямителей

Електропостачання та електроустаткування

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]

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

Расчетная (типовая) мощность трансформатора

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

где P_d – среднее значение мощности на выходе выпрямителя.

Коэффициент использования трансформатора

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

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	$1,17E_{2\delta}$	$U_m/2$	$U_m/2$	$1,35E_{2\delta}$	$0,75U_m$	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	1,0	0,42	0,057	0,42	1,0	0,66	1,0

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.

Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Костіним М.О.