

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ОБРАТИМОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ТРАНСПОРТНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Сидоров К.М.¹

¹ *ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», Москва, Россия (125319, Москва, Ленинградский проспект, 64), e-mail: k.sidorov@bk.ru*

Развитие существующих и внедрение новых технических решений в области перспективных автотранспортных средств, повышение тягово-динамических характеристик и улучшение массогабаритных показателей систем тягового электрооборудования определяют необходимость использования преобразователей напряжения в силовой цепи постоянного тока. Отличительной особенностью, характеризующей специфику бортовой энергетической системы транспортного средства, является возможность обратимого (двунаправленного) преобразования постоянного напряжения и наличие гальванической развязки входной и выходной цепей. В настоящей статье представлены основные схемотехнические решения в области преобразования постоянного силового напряжения в энергетических установках транспортного назначения, рассмотрены некоторые вопросы, связанные с проектированием трансформаторных обратимых преобразователей постоянного напряжения, представлен вариант применения существующих методик расчета высокочастотных тороидальных трансформаторов для систем тягового электрооборудования.

Ключевые слова: преобразователь напряжения, конвертор, тяговый электропривод, электрооборудование, высокочастотный трансформатор, электромобиль, аккумуляторная батарея.

DEFINING THE PARAMETERS OF THE HIGH-FREQUENCY TRANSFORMER OF BI-DIRECTIONAL DC-DC CONVERTER FOR ELECTRIC AND HYBRID VEHICLES

Sidorov K.M.¹

¹ *Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI), Moscow, Russia (125319, Moscow, Leningradsky prospect, 64), e-mail:k.sidorov@bk.ru*

Development of existing and introduction of new technical solutions in the field of advanced vehicles, increasing traction and dynamic performance and improved weight and size of electrical traction systems determine the need for voltage converters in the DC main circuit. A distinctive feature characterizing the specificity of the onboard power system of the vehicle is the possibility of a bi-directional convert the DC voltage and the presence of galvanic isolation of the input and output circuits. This article presents the main circuit solutions in the field of converting DC power voltage in traction systems, consider some issues related to the design of transformer reversible DC converters, an embodiment of the existing methods for calculating the high-frequency toroidal transformers for electrical traction systems.

Keywords: dc-dc converter, electric drive, electric equipment, high frequency transformer, electric vehicle, battery.

Ситуация с ростом цен на углеводородное топливо, ужесточение норм по выбросам токсичных веществ и другие сопутствующие проблемы являются стимулирующими факторами для увеличения спроса и объемов производства экономичных и экологически чистых транспортных средств – автомобилей с комбинированными энергетическими установками и электромобилей.

Неотъемлемой частью электрооборудования транспортного средства традиционной конструкции является электрогенератор, приводимый во вращение двигателем внутреннего сгорания (ДВС). ДВС работает в режиме движения и остановок транспортного средства, что обеспечивает непрерывную выработку электрической энергии генератором для питания

низковольтных бортовых потребителей и заряда стартерной аккумуляторной батареи. Однако для перспективных транспортных средств (в том числе транспортных и транспортно-технологических машин) с электроприводом, в которых первичным источником энергии является высоковольтная аккумуляторная батарея (АБ), актуальной является задача преобразования постоянного напряжения последней в бортовое низковольтное постоянное напряжение. Кроме того, для тягового электропривода, наоборот, целесообразно повышение напряжения тяговой АБ с целью снижения токовых нагрузок в обмотках электрических машин и уменьшения массогабаритных показателей системы тягового электрооборудования. Поскольку в таких транспортных системах электрические машины, которые могли бы приводить во вращение генератор для выработки энергии, не всегда работают в продолжительном режиме (например, на участках остановок привод генератора будет прекращен) такая схема генераторного электроснабжения неприемлема. Указанная проблема может быть решена посредством установки преобразователей (конверторов) постоянного напряжения, один из которых является понижающим и служит для заряда низковольтной аккумуляторной батареи и питания бортовых устройств и аппаратов, второй – повышающим, для энергообеспечения тягового электрооборудования.

В настоящей статье представлены два основных схемотехнических решения в области преобразования постоянного силового напряжения в энергетических установках транспортного назначения, рассмотрены некоторые вопросы, связанные с проектированием трансформаторных обратимых преобразователей постоянного напряжения (ПН), рассмотрен вариант применения существующих методик расчета высокочастотных тороидальных трансформаторов для силового тягового электрооборудования.

Существующие схемные решения

С ростом числа транспортных средств с электроприводом (электромобилей и автомобилей с комбинированными энергетическими установками), повышением требований к их тягово-динамическим свойствам потребность в таких дополнительных устройствах преобразования напряжения возрастает. Данное утверждение относится к транспортным и транспортно-технологическим машинам, эксплуатируемым в закрытых помещениях, где преимущество отдается электрической тяге без использования двигателей внутреннего сгорания с целью повышения экологичности производства и обеспечения экологической безопасности.

Существуют различные схемные решения по преобразованию постоянного напряжения первичного источника применительно к использованию на транспортных средствах. В общем случае их можно свести к двум основным схемам:

- бестрансформаторные (англ. «buck-», «boostconverter»);

- трансформаторные.

Каждый из указанных способов преобразования напряжения отличается своими преимуществами и недостатками, при этом выбор в пользу использования того или иного варианта исходит из особенностей применения и эксплуатации ПН.

Необходимость обеспечения двунаправленной (обратимой) работы ПН в составе системы тягового электропривода продиктована тем, что на транспортном средстве тяговая электрическая машина работает, помимо двигательного режима, в режиме генераторного торможения с рекуперацией электрической энергии в аккумуляторную батарею (АБ). Таким образом, ПН для обеспечения двигательного режима электрической машины должен преобразовывать (повышать) напряжение аккумуляторной батареи в постоянное входное напряжение тягового инвертора – прямое преобразование. В режиме рекуперативного торможения – понижать напряжение, выпрямленное силовыми диодами IGBT-модулей тягового инвертора, в напряжение для заряда АБ – обратное преобразование.

Ярким примером использования бестрансформаторной схемы преобразования постоянного напряжения является ПН в составе системы тягового электрооборудования автомобиля с гибридной силовой установкой Toyota Prius. В модели Prius 2004 г. входное напряжение силового инвертора достигает 500 В, тогда как номинальное напряжение высоковольтной аккумуляторной батареи составляет 201,6 В. Двунаправленное преобразование постоянного напряжения в такой системе обеспечивает конвертор, основными компонентами которого является дроссель и интеллектуальный силовой транзисторный модуль. Схема силовой части данного преобразователя напряжения представлена на рис.1.

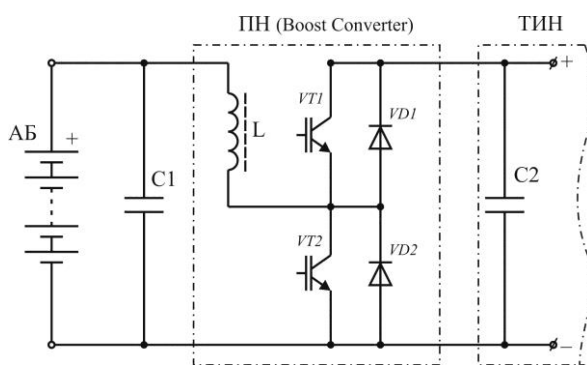


Рис.1. Электрическая схема силовой части преобразователя постоянного напряжения автомобиля Toyota Prius (2004 г.): АБ – высоковольтная аккумуляторная батарея; ПН – преобразователь постоянного напряжения; ТИН – тяговый инвертор напряжения; L – дроссель; VT, VD – соответственно транзисторы и полупроводниковые диоды IGBT-модуля

Принцип действия данного ПН основан на циклическом процессе, в ходе которого происходит коммутация транзисторов IGBT-модулей и чередуются фазы заряда и разряда

дросселя на емкостной накопитель и нагрузку. Следует отметить, что возможность двунаправленного преобразования постоянного напряжения обеспечивается применением в схеме двух силовых транзисторов.

Использование ПН в системе тягового электрооборудования Prius позволило увеличить рабочее переменное напряжение электрических машин, снизив при этом токовые нагрузки в обмотках и массогабаритные показатели системы.

Основным недостатком представленной выше схемы является электрическая связь входной и выходной цепей ПН. Указанного недостатка лишена полномостовая топология, представленная на рис.2, которая является основным схемным решением для преобразователей высокой мощности с возможностью обратимого преобразования напряжения, отличительной особенностью которых является гальваническая развязка источников тока. Основные составляющие ПН, реализованного согласно данной схеме – высокочастотный трансформатор (ВТ) и два мостовых инвертора, низкого напряжения (ИНН) и высокого напряжения (ИВН). Схемное исполнение преобразователя напряжения для двунаправленной работы часто называют двойным активным мостом.

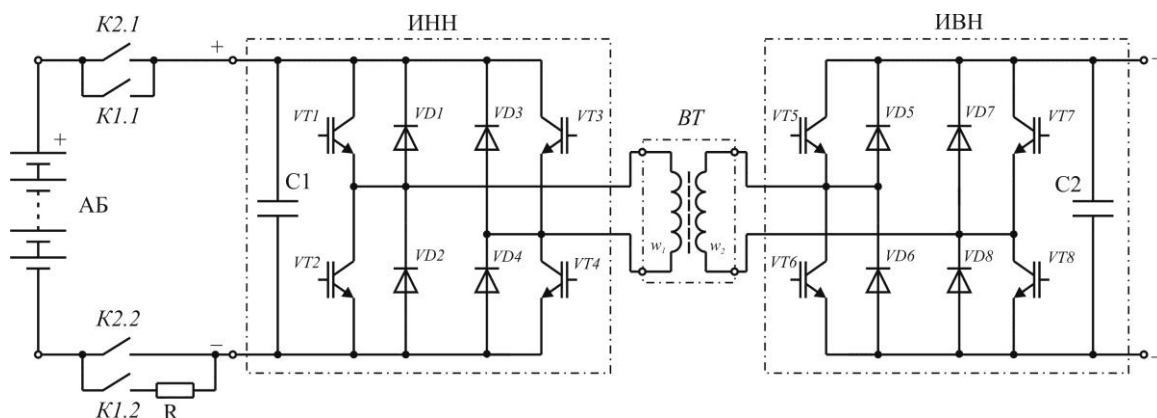


Рис.2. Принципиальная электрическая схема силовой части двунаправленного (обратимого)

ПН: ИНН, ИВН – инверторы; ВТ – высокочастотный трансформатор

Основными преимуществами данных схем является:

- гальваническая развязка цепей низкого и высокого напряжения;
- возможность симметричного двунаправленного преобразования напряжения в зависимости от режимов работы и использования основного источника;
- эффективное использование магнитопровода трансформатора, обусловленное отсутствием постоянной составляющей магнитного потока, не участвующей в формировании ЭДС и бесполезно загружающей сердечник;
- возможность получения более высоких значений коэффициента повышения напряжения в сравнении с бестрансформаторными схемами;

- относительная простота схемной реализации и алгоритмов управления силовыми транзисторными ключами;
- наличие отдельных функционально завершенных блоков, упрощающих унификацию оборудования;
- возможность модификации ПН для различной мощности и типоразмерного ряда без существенных изменений конструкции.

В качестве основного недостатка следует отметить использование значительно большего числа силовых транзисторных модулей и более низкие массогабаритные показатели в сравнении с бестрансформаторными схемами.

Для воспроизведения функции автомобильного генератора, являющегося основным компонентом системы электроснабжения традиционного транспортного средства на основе двигателя внутреннего сгорания, в системе тягового электрооборудования необходимо использовать ПН, понижающий высоковольтное напряжение тяговой аккумуляторной батареи в постоянное напряжение для заряда низковольтной аккумуляторной батареи и питание бортовых потребителей постоянного тока. В этом случае необходимость в обратимом преобразовании электрической энергии отсутствует, однако необходима гальваническая развязка высоковольтной и низковольтных цепей, для реализации которой наилучшим образом подходит трансформаторная схема.

Определение параметров высокочастотного трансформатора в составе ПН

Основным компонентом обратимых ПН с гальванической развязкой является силовой высокочастотный трансформатор. Использование импульсного напряжения высокой частоты в данном случае позволяет минимизировать массу и габаритные размеры ПН.

Ниже представлена методика расчета высокочастотного тороидального трансформатора для полномостового преобразователя напряжения, согласно которой последовательно определяются следующие параметры и характеристики ВТ:

- Габаритная мощность ВТ.
- Конструктивные параметры магнитопровода и физические характеристики материала сердечника.
- Максимальная индукция в сердечнике ВТ.
- Расчетный габаритный параметр трансформатора.
- Типоразмер магнитопровода и его геометрические характеристики.
- Количество витков обмоток трансформатора.
- Потери энергии в магнитопроводе.
- Ток холостого хода первичной обмотки ВТ.
- Конструктивные параметры обмоток и масса ВТ.

Исходными данными для расчета, как правило, являются следующие параметры ПН и трансформатора: U_{d1} – номинальное напряжение на входе инвертора ИНН; U_{d2} – номинальное напряжение на выходе инвертора ИВН; $I_{1эф}$, $I_{2эф}$ – токовые нагрузки первичной и вторичной обмоток ВТ (длительные и пиковые); f – частота напряжения на обмотках трансформатора; U_1 , U_2 – амплитудные значения напряжений на первичной и вторичной обмотках ВТ; ΔU_{d1} , ΔU_{d2} – падения напряжений на элементах схемы инверторов ИНН и ИВН; k_f – коэффициент формы входного напряжения ВТ; t_n – длительность импульса входного напряжения ВТ; q – относительная длительность импульса входного напряжения ВТ; γ – коэффициент заполнения.

Габаритная мощность трансформатора. В качестве габаритной (расчетной) мощности ВТ принимается полусумма электромагнитных мощностей первичной и вторичной обмоток трансформатора [1]:

$$P_{\Gamma} = \frac{U_{1эф} \cdot I_{1эф} + U_{2эф} \cdot I_{2эф}}{2 \cdot \eta},$$

где $U_{1эф}$, $I_{1эф}$, $U_{2эф}$, $I_{2эф}$ – эффективные значения напряжения и тока первичной и вторичной обмоток ВТ; η – КПД трансформатора. Габаритная мощность является ключевым параметром для расчета ВТ.

Выбор конструкции и материала магнитопровода ВТ. Для высокочастотного трансформатора обратимого преобразователя напряжения целесообразно использование кольцевого сердечника в защитном контейнере. В качестве обоснования выбора кольцевой конструкции магнитопровода следует указать на следующие преимущества тороидальных ВТ:

- минимальная индуктивность рассеяния, способствующая уменьшению выбросов напряжения на силовых ключах инвертора, снижению уровня помех и выходного сопротивления трансформатора [2];
- относительно низкая стоимость изготовления сердечника;
- широкий диапазон типоразмерного ряда сердечников отечественного производства;
- минимизированные массогабаритные показатели и рациональное использование площади катушки.

Использование магнитопровода, исполненного в защитном контейнере, обусловлено условиями эксплуатации преобразователя напряжения на транспортном средстве.

Материал сердечника трансформатора должен отличаться низкими значениями удельных магнитных потерь, при этом обеспечивая работоспособность при высоких частотах напряжения и тока обмоток ($f \geq 5000$ Гц). Указанным требованиям удовлетворяют нанокристаллические сплавы на основе железа, например, ГМ414, физические свойства которого представлены в табл.1 [3].

Физические свойства магнитопровода ГМ414 [3]

Параметр	Значение
Магнитная индукция B_{800} (Тл)	1,17 Тл
Относительная магнитная проницаемость при напряжённости магнитного поля 0,08 А/м $\mu_{0,08}$	60000
Относительная максимальная магнитная проницаемость μ_{max}	300000
Коэрцитивная сила H_c	0,8 А/м
Коэффициент прямоугольности B_T/B_{800}	0,6
Плотность	7400 кг/м ³
Удельные магнитные потери $P_{y\partial}$ для частоты в диапазоне $f = 3...200$ кГц при магнитной индукции B_m	$P_{y\partial} = 5,5 \cdot 10^{-6} \cdot f^{1,7} \cdot B_m^2$ Вт/кг
Коэффициент заполнения сталью сердечника k_c	0,7

Кривые намагничивания магнитопровода представлены на рис.3.

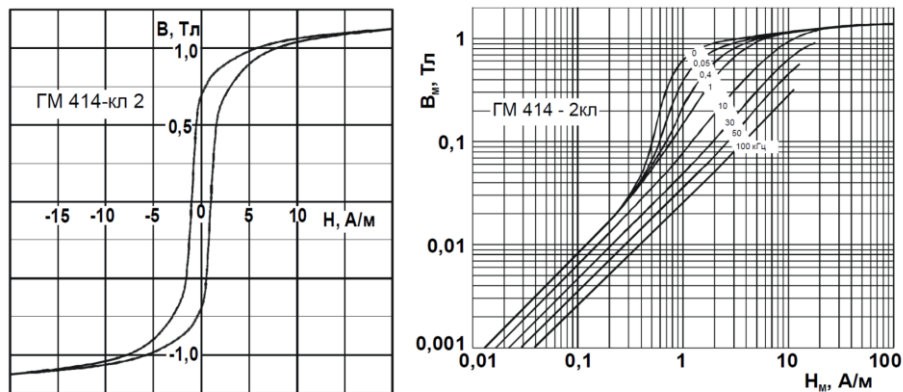


Рис.3. Статическая и динамические кривые намагничивания магнитопровода ГМ414 [3]

Максимальная индукция в сердечнике ВТ (B_m) определяется исходя из:

- значения индукции насыщения B_s ;
- условия ненасыщения магнитопровода.

Для симметричного режима работы трансформатора (перемагничивание сердечника по симметричному циклу – «полная» петля гистерезиса) значение максимальной индукции может быть выбрано согласно выражению: $0,5 B_s \leq B_m \leq 0,75 B_s$

Расчетный габаритный параметр трансформатора можно определить как

$$S_c S_o \geq \frac{50 \cdot P_\Gamma}{f \cdot \Delta B_m \cdot \eta \cdot j \cdot k_c \cdot k_o \cdot k_\phi},$$

где S_c , S_o – сечение соответственно сердечника и окна магнитопровода, см²; P_Γ – расчетная (габаритная) мощность трансформатора, ВА; f – частота напряжения обмоток, Гц; ΔB_m – максимальный диапазон изменения индукции в сердечнике; k_c – коэффициент заполнения сталью сердечника; k_o – коэффициент заполнения окна проводом обмоток ($k_o=0,5$ – для мощных трансформаторов) [1]; k_ϕ – коэффициент формы входного напряжения ВТ ($k_\phi=1$ для прямоугольного напряжения); η – КПД ВТ; j – плотность тока в проводах обмоток.

Типоразмер магнитопровода. В соответствии со значением габаритного параметра трансформатора $S_c S_0$ и принятой конструкцией сердечника из ряда стандартных кольцевых магнитопроводов может быть выбран магнитопровод, максимально удовлетворяющий расчетным параметрам. Параметры магнитопроводов, в том числе геометрические характеристики, указываются производителями в специализированных каталогах.

Количество витков обмоток трансформатора. В соответствии со значениями максимальной магнитной индукции в сердечнике, габаритных параметров трансформатора, а также характеристик входного напряжения, определяется количество витков первичной и вторичной обмоток w_1 и w_2 :

$$w_1 = \frac{q \cdot U_1 \cdot 10^4}{2 \cdot f \cdot S_c \cdot k_c \cdot k_\phi \cdot B_m}, w_2 = w_1 \frac{U_2}{U_1}.$$

Оценка потерь энергии в магнитопроводе. Потери в магнитопроводе определяются согласно величине удельных магнитных потерь, указываемых производителем для значений частоты напряжения на обмотках и максимальной магнитной индукции.

Ток холостого хода первичной обмотки ВТ:

$$I_{xx} = \sqrt{I_{xxa}^2 + I_{xxp}^2},$$

где I_{xxa} , I_{xxp} – активная и реактивная составляющие тока холостого хода трансформатора соответственно, А. При этом

$$I_{xxa} = \frac{P_c}{U_1}, I_{xxp} = \frac{H_m \cdot l_{cp}}{w_1},$$

где l_{cp} – длина средней линии магнитопровода, м; w_1 – число витков первичной обмотки; H_m – значение напряженности в А/м при максимальной индукции B_m . Определяется по кривой намагничивания магнитопровода с учетом расчетного значения B_m и частоты f .

Конструктивные параметры обмоток и оценка массы ВТ. Диаметры проводов (меди) определяются по значениям действующих токов и максимальной плотности тока в соответствующих проводах обмотки. Масса ВТ определяется как сумма значений массы магнитопровода и обмоток трансформатора.

Представленные аналитические зависимости позволяют на этапе проектирования силовых трансформаторных преобразователей постоянного напряжения сделать оценку массогабаритных показателей ПН, определить основные характеристики входящих в состав компонентов, в том числе ключевого устройства – высокочастотного трансформатора.

Заключение

Совершенствование компонентной базы систем тягово-энергетического оборудования, развитие существующих и внедрение новых технических решений в области перспективных автотранспортных средств, повышение тягово-динамических характеристик и улучшение

массогабаритных показателей систем тягового электрооборудования определяют необходимость использования устройств преобразования напряжения в силовой цепи постоянного тока. Причем отличительной особенностью, характеризующей специфику бортовой энергетической системы, является возможность обратимого (двунаправленного) преобразования постоянного напряжения и наличие гальванической развязки источников постоянного тока. Вопрос определения и расчета оптимизированных характеристик высоковольтных преобразователей постоянного напряжения для электромобилей и автомобилей с комбинированными энергетическими установками является актуальным, особенно на фоне того, что в настоящее время отсутствует единая теоретически обоснованная и проработанная с учетом транспортного назначения методика определения и расчета трансформаторных и бестрансформаторных преобразователей постоянного напряжения и входящих в их состав силовых компонентов. Существующая теория применима, в большей части, к маломощным преобразователям для электроники и не адаптирована к силовой электротехнике. В настоящей статье представлены некоторые из основных моментов, касающихся проектирования ПН, приведены основные зависимости, которые могут способствовать решению указанной проблемы и использоваться в качестве расчетной базы для оценки параметров и характеристик обратимых преобразователей напряжения в составе транспортных средств.

Список литературы

1. Гейтенко Е.Н. Источники вторичного электропитания. Схемотехника и расчет. – М.: Солон-Пресс, 2008. - 448 с.
2. Ковалев Н. Выбор сердечников для моточных изделий импульсных источников питания // Компоненты и технологии, № 1. – 2005.
3. Каталог продукции «Гаммамет» 2010. [Электронный ресурс]: Научно-производственное предприятие Гаммамет – Электрон. текстовые дан. – М., [2010]. – URL: <http://www.gammamet.ru/catalog2010.pdf> (дата обращения: 10.11.2014).
4. Матаханов П.Н., Гоголицин Л.З. Расчет импульсных трансформаторов. Л.: Энергия, 1980. – 112 с.
5. Москатов Е.А. Теория расчётов импульсных трансформаторов двухтактных ИИП и её подтверждение практикой.[Электронный ресурс]: Журнал «Радио». – М., [2005].– URL: ftp://ftp.radio.ru/pub/2005/10/C_p_t/Calculation_pulsed_transformer.pdf. (дата обращения: 10.11.2014)

6. Хныков А.В. Теория и расчет трансформаторов источников вторичного электропитания. – М.: Солон-Пресс, 2004. - 128 с.

Рецензенты:

Ютг В.Е., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г. Москва;

Сидоров Б.Н., д.т.н., профессор, ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», г. Москва.