

# Принцип «импульсного деления тока»

## и его применение в трехфазных мостовых инверторах с синусоидальными выходными токами в индуктивно-активной нагрузке без емкостного фильтра

**В статье рассматривается новый принцип «импульсного деления тока», позволяющий регулировать распределение заданного суммарного тока по  $n$  каналам, а также наоборот — «размножить» и «умножить» заданный ток. На его базе построены схемы трехфазных (в частности, высоковольтных) мостовых инверторов тока с синусоидальными выходными токами при активно-индуктивных нагрузках, в частности, электродвигателях, причем без емкостного фильтра переменного тока. Помимо снижения массы и габаритов системы питания схемы позволяют исключить автоколебания, расширить диапазон регулирования с повышенным  $\cos \varphi_1$  в цепи нагрузки, а главное — существенно снизить тепловые потери в электродвигателе и питающем кабеле (повысить КПД и рабочий ресурс изоляции).**

**Станислав Резников,  
д. т. н.  
Александр Соколов**

rezn@formatek.ru

В силовой электронике под инверторами тока обычно подразумеваются преобразователи постоянного тока силового реактора в прямоугольный двуполярный ток (или в несколько таких токов). При трехфазном исполнении ток силового реактора («звена постоянного тока») обычно циклически (поочередно) коммутируется по фазам с помощью мостового транзисторного или тиристорного коммутатора. Если при этом в нагрузке образуются общие для всех фаз паузы, то в них ток силового реактора закорачивается через любую пару плеч коммутатора. Стабилизация и плавное регулирование тока силового реактора обычно обеспечивается предвключенным управляемым выпрямителем (в случае преобразователя частоты), либо импульсным конвектором (ШИМ, ЧИМ или порогово-релейным преобразователем напряжения).

В первом случае проявляется сильное преимущество инвертора тока перед инвертором напряжения в отношении регулируемого электропривода: возможность рекуперации энергии в сеть путем перевода выпрямителя и инвертора на взаимно-обратные функции.

При работе на чисто активную (резистивную) нагрузку с прямоугольными токами линейные выходные напряжения также будут двуполярно-прямоугольными. При подключении в качестве нагрузки сети переменного напряжения «бесконечной» мощности или сильнооточного (энергоемкого) параллельного индуктивно-емкостного колебательного контура выходное напряжение инвертора тока будет синусоидальным. При этом  $\cos \varphi_1$  для основных гармоник тока и напряжения будет зависеть от временных фаз коммутации и может принимать значения от 0 до 1. Однако коэффициент мощности

$$\chi = \frac{P}{S} \left( \frac{\text{кВт}}{\text{кВА}} \right),$$

учитывающий помимо реактивной мощности ( $Q$ ) мощность искажений ( $T$ ) в составе полной мощности

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + T^2},$$

при прямоугольных фазных токах не может быть близким к 1. Этим обстоятельством определяются повышенные тепловые потери в питаемых электродвигателях и соединительных проводах. Во многих случаях указанные потери приводят к перегреву двигателей и существенному снижению рабочего ресурса для изоляции (особенно при высоковольтном исполнении и неблагоприятных климатических условиях).

К основному недостатку инвертора тока относится неприемлемость выключения цепи для тока реактора или переключения этой цепи на цепь с последовательной индуктивностью (например, индуктивностью рассеяния трансформатора). Такие коммутации вызывают недопустимые перенапряжения на полупроводниковых ключах. Поэтому необходимо предусматривать наличие защитных цепочек — либо накоротко шунтирующих, либо емкостных — для коммутируемого тока реактора и токов индуктивных нагрузок. Наиболее простым вариантом обеспечения таких цепочек является трехфазный выходной емкостный фильтр, выполняющий также функцию фильтра напряжения низкой частоты, функцию компенсаторов реактивной мощности нагрузки (для повышения  $\cos \varphi_1$ ), а иногда и функцию запирающих силовых тиристорных ключей. Однако наличие такого фильтра определяет следующие недостатки преобразователя:

- существенные масса и габариты;
  - возникновение автоколебаний;
  - узкий диапазон регулирования частоты;
  - сильная зависимость величины  $\cos \varphi_1$  от частоты.
- Все вышеперечисленные недостатки существенно тормозят развитие силовой электроники и электро-

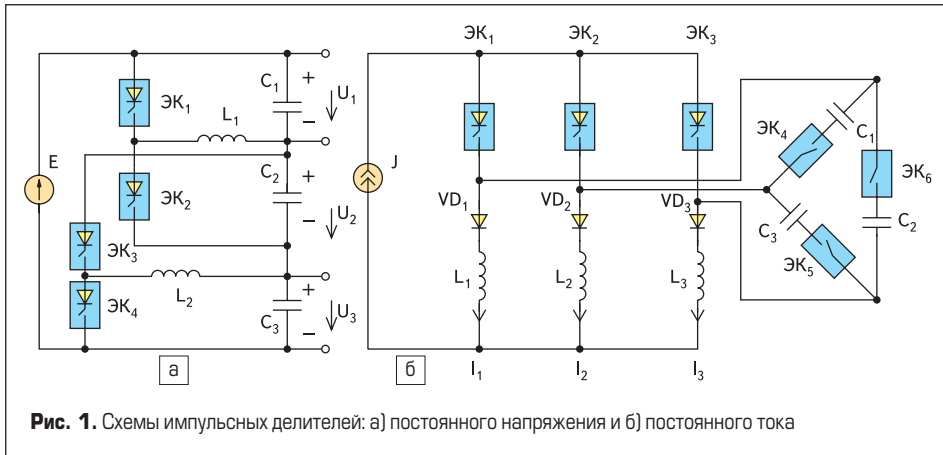


Рис. 1. Схемы импульсных делителей: а) постоянного напряжения и б) постоянного тока

техники, особенно в области регулируемых электроприводов, параллельной работы источников и сетей переменного тока и многих других. Для их устранения предлагается применить новый, достаточно простой принцип «импульсного деления тока».

В статьях [1–4] достаточно подробно описан принцип активного (импульсного) деления постоянного напряжения на базе обратимых ШИМ-регуляторов (инвертирующего типа). Если применить принцип дуальности основных электротехнических пассивных и активных элементов, то аналогичный принцип можно использовать для импульсного деления постоянного тока. На рис. 1 упрощенно показаны схемы импульсных делителей постоянного напряжения (рис. 1а) и постоянного тока (рис. 1б). Первая из них содержит идеальный источник напряжения ( $E$ ), батарею конденсаторов ( $C_1$ – $C_3$ ), два дозирующих дросселя ( $L_1$ ,  $L_2$ ) и четыре управляемых однонаправленных электронных ключа ( $\text{ЭК}_1$ – $\text{ЭК}_4$ ). Благодаря образованным из этих элементов четырем инвертирующим ШИМ-регуляторам легко реализуется так называемый принцип «транспортирования заряда» и его произвольного перераспределения по обкладкам конденсаторов батареи. При любых токах нагрузок, подключаемых к выходным клеммам делителя, можно распределить напряжение питания ( $E$ ) с любым заданным соотношением между выходными напряжениями  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$  в соответствии с равенством:

$$U_1 + U_2 + U_3 = E.$$

Этот принцип является обратимым, то есть позволяет «размножить» и «умножить» заданное напряжение. Если к зажимам  $C_3$  подсоединить источник напряжения ( $E$ ), то на зажимах  $C_1$  и  $C_2$  получим заданные напряжения  $U_1$  и  $U_2$ , а на общих зажимах батареи — суммарное напряжение:

$$\Sigma U = U_1 + U_2 + E.$$

Схема на рис. 1б содержит идеальный источник тока ( $J$ ), нагрузочные дроссели ( $L_{1-3}$ ), два (или три) дозирующих конденсатора ( $C_1$ ,  $C_2$  или  $C_1$ – $C_3$ ), три управляемых однонаправленных электронных ключа ( $\text{ЭК}_1$ – $\text{ЭК}_3$ ), два (или три) управляемых двунаправленных электронных ключа ( $\text{ЭК}_4$ ,  $\text{ЭК}_5$  или  $\text{ЭК}_4$ – $\text{ЭК}_6$ ), а также три развязывающих диода ( $VD_1$ – $VD_3$ ).

Благодаря образованным из этих элементов ( $\text{ЭК}_1$ – $\text{ЭК}_6$ ,  $C_1$ – $C_3$ ) трем импульсно-емкостным дозаторам можно при любых напряжениях на нагрузочных дросселях распределить ток питания ( $J$ ) с любыми соотношениями между токами  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ , в соответствии с равенством:  $I_1 + I_2 + I_3 = J$ .

Рассмотрим следующий пример.

Пусть  $\text{ЭК}_1$ – $\text{ЭК}_3$  замкнуты, все три тока нагрузок равны между собой ( $I_1 = I_2 = I_3 = 1/3 \times J$ ), и требуется произвести обнуление второго тока с обеспечением равенства:

$$I_1 = I_3 = (1/2) J (I_2 = 0).$$

Для этого включим и будем держать постоянно включенными  $\text{ЭК}_4$  и  $\text{ЭК}_5$ . На короткое время паузы  $\Delta t$  выключаем  $\text{ЭК}_2$ . В первый момент после выключения  $\text{ЭК}_2$  все три нагрузочных тока остаются прежними ( $I_1(0) = I_2(0) = I_3(0) = 1/3 \times J$ ), но части токов  $\text{ЭК}_1$  и  $\text{ЭК}_3$ , равные  $1/6 \times J$ , вынуждены начать протекать по цепям соответствующих конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$ , заряжая их за время паузы  $\Delta t$  дозами энергии  $\Delta W$  до напряжений  $\Delta U$ . К моменту окончания паузы ток  $I_2$  уменьшается на величину  $\Delta I$ , а токи  $I_1$  и  $I_3$  увеличиваются в цепи на величину  $1/2 \Delta I$ . После включения  $\text{ЭК}_2$  энергия каждого из конденсаторов  $C_1$  и  $C_2$  полностью или частично передается в цепи нагрузочных дросселей  $L_1$  и  $L_3$ , еще более увеличивая токи  $I_1$  и  $I_3$ . Далее описанный процесс периодически повторяется до полного обнуления тока  $I_2$ , после чего  $\text{ЭК}_2$  может окончательно выключиться, а  $\text{ЭК}_1$  и  $\text{ЭК}_3$  — включиться. Скорость и время заданного перераспределения нагрузочных токов определяются допустимым перенапряжением на дозирующих конденсаторах, которое может регулироваться относительными величинами пауз при ШИМ-регулировании.

Нетрадиционность этой схемы определяется не только «импульсным делением тока», но и тем, что в ней источник тока (возможно, плавно регулируемый) включен последовательно с индуктивными нагрузками (возможно, произвольно изменяющимися), тогда как обычно регулируемый источник тока способен работать с переменной нагрузкой только если она имеет активно-емкостной характер или представляет собой плавно регулируемую противо-ЭДС.

Таким образом, суть рассматриваемого принципа «импульсного деления тока» сво-

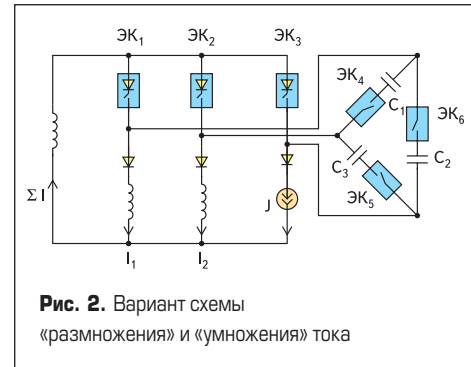


Рис. 2. Вариант схемы «размножения» и «умножения» тока

дится к возможности регулируемого распределения заданного суммарного тока по  $n$  каналам. Кроме того, этот принцип является обратимым, то есть позволяет «размножить» и «умножить» заданный ток. Если в одном из каналов разветвления (рис. 2) включен источник тока ( $J$ ), то в  $n-1$  других каналах получим заданные токи ( $I_1$  и  $I_2$ ), а в общем канале получим суммарный ток:

$$\Sigma I = I_1 + I_2 + J.$$

Все описанные свойства рассматриваемого принципа позволяют создать многофазный инвертор тока с синусоидальными выходными токами при активно-индуктивной нагрузке (в частности, электродвигателей), причем без емкостного фильтра переменного тока.

На рис. 3 приведена схема трехфазного мостового инвертора тока (ТМИТ) с синусоидальными выходными токами на базе импульсного делителя тока (корректора коэффициента выходной мощности). На входе инвертора включен понижающий конвертор ( $VT_{\text{вх}}$ – $VD_1$ ), в функции которого входят:

- а) формирование в силовом реакторе ( $L_{\text{ср}}$ ) пульсирующего тока с частотой пульсации, в шесть раз превышающей частоту выходного фазного тока (с амплитудой  $I_m$ ), и с глубиной пульсации  $(1 - (\sqrt{3}/2)) \times I_m$ ;
- б) регулирование амплитуды и частоты пульсации в соответствии с требуемым амплитудно-частотным регулированием выходных фазных токов.

Диод  $VD_2$  служит для защиты транзисторов от перенапряжений в случае помеховых и аварийных сбоях или обрывов. Мостовой инвертор собран на транзисторах ( $VT_1$ – $VT_6$ ) и диодах ( $VD_3$ – $VD_8$ ), а в качестве двуполярных электронных ключей в ветвях дозирующими конденсаторами ( $C_1$ – $C_3$ ) служат встречно-парные тиристоры ( $VS_1$ – $VS_6$ ). Принцип распределения общего тока силового реактора ( $I$ ) по фазным выходным каналам (A, B, C) остается тем же, что и описанный выше, а алгоритм ШИМ-регулирования  $VT_1$ – $VT_6$  и включения пар тиристоров  $VS_1$ – $VS_6$  обеспечивает на выходе трехфазную систему синусоидальных токов.

В некоторых случаях требуется с помощью распространенных IGBT-транзисторов с допустимым напряжением 1700 В реализовать ТМИТ с более высоким выходным напряжением, например, до 2400 В, что связано с относительно большой длиной нагрузочного кабеля. Такая необходимость появляется, например, при питании электродвигателя привода

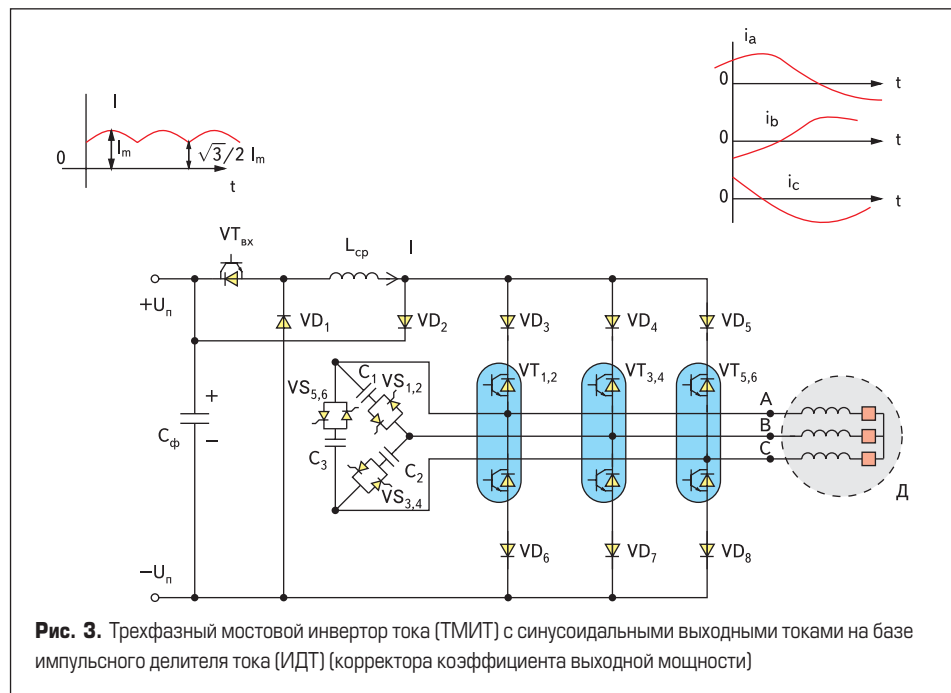


Рис. 3. Трехфазный мостовой инвертор тока (ТМИТ) с синусоидальными выходными токами на базе импульсного делителя тока (ИДТ) (корректора коэффициента выходной мощности)

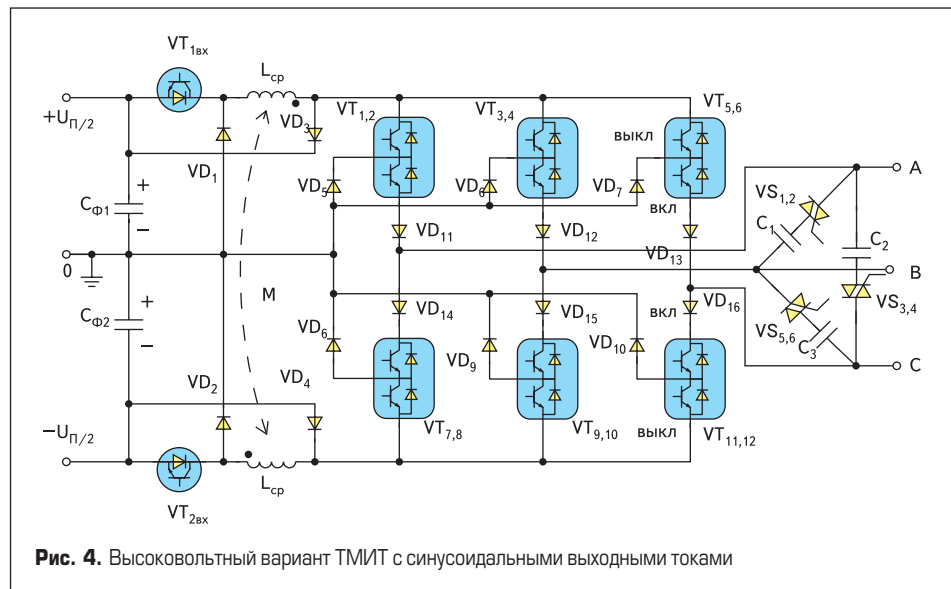


Рис. 4. Высоковольтный вариант ТМИТ с синусоидальными выходными токами

погружного насоса для нефтедобычи. В этих случаях длина кабеля питания может достигать 3 км и более.

На рис. 4 показан высоковольтный вариант ТМИТ с синусоидальными выходными тока-

ми. В этой схеме входной емкостный фильтр ( $C_{\phi 1,2}$ ) выполнен со средней (заземленной) точкой. Силовой реактор ( $L_{cp}$ ) выполнен двухобмоточным, а понижающий входной конвертор — расщепленным ( $VT_{1,2вх}$ ). Каждый

из электронных ключей мостового инвертора выполнен парно-модульным с заземленной через развязывающий диод ( $VD_5-V_{D10}$ ) средней точкой — по типу схемы трехступенчатого инвертора [5]. Включение ключа производится с небольшим временным запаздыванием транзистора, соединенного с  $L_{cp}$ , относительно второго в данной паре, а выключение — наоборот. Благодаря этому напряжение на любом из выключенных транзисторов в приведенной схеме не превышает половины питающего постоянного напряжения  $U_n$ . Аналогичным образом можно построить на базе тех же транзисторов и более высоковольтные схемы [6].

### Литература

1. Резников С. Б. Новая концепция железнодорожных импульсных тяговых электроприводов на базе реверсивных активных делителей постоянного напряжения // Практическая силовая электроника. 2003. № 12.
2. Резников С., Булеков В., Болдырев В., Бочаров В. Новый принцип обратимого выпрямительно-инверторного преобразования с ШИМ-коррекцией мощности // Силовая электроника. 2005. № 1.
3. Резников С., Чуев Д. Эффективные структуры транспортных каналов генерирования постоянного повышенного напряжения с электротрансмиссионной системой запуска силовых установок // Силовая электроника. 2006. № 2.
4. Резников С., Чуев Д., Ильинский Ю., Милославский А. Бестрансформаторные высоковольтные составные ШИМ-конверторы с активным самовыравниванием напряжений — «транспортеры заряда» // Компоненты и технологии. 2006. № 6.
5. Чибиркин В., Боок А., Завгородний В., Аришкин О., Шестоперов Г. Разработка трехфазного мостового инвертора для питания тяговых асинхронных электродвигателей электровазов постоянного тока // Силовая электроника. 2005. № 2.
6. Белов Г. А. Высокочастотные тиристорно-транзисторные преобразователи постоянного напряжения. М.: Энергоатомиздат. 1987.