



УДК 621.311:621.318

*В.Г. Кучинский, Е.Н. Попков, В.М. Чайка*

## **УПРАВЛЯЕМЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ ДЛЯ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПРИВОДОВ**

*V.G. Kuchinsky, E.N. Popkov, V.M. Chayka*

### **CONTROL CURRENT INVERTER FOR VARIABLE SPEED DRIVE MOTORS**

Рассмотрены некоторые схемы преобразователей частоты для систем питания вентильных двигателей с постоянными магнитами. Наибольшее внимание уделено схемам на основе автономных инверторов тока, обеспечивающих возможность искусственной коммутации инвертора. Рассмотрены особенности процесса коммутации фазного тока статорной обмотки двигателя в зависимости от топологий применяемых схем. Даны рекомендации по выбору той или иной схемы.

**ВЕНТИЛЬНЫЙ ДВИГАТЕЛЬ. ПОСТОЯННЫЙ МАГНИТ. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ. АВТОНОМНЫЙ ИНВЕРТОР ТОКА. ИСКУССТВЕННАЯ КОММУТАЦИЯ ФАЗНОГО ТОКА.**

The frequency converter schemes for power supply systems of the variable speed motors with permanent magnets are overviewed in the paper. Mostly the schemes of the autonomic current inverters with the artificial phase current switching are analyzed. The different aspects of the current switching process depending of the scheme topology are studied. The recommendations to choose the real scheme of the frequency converter were elaborated.

**VARIABLE DRIVE MOTOR. PERMANENT MAGNET. FREQUENCY CONVERTER. AUTONOMIC CURRENT INVERTER. ARTIFICIAL PHASE CURRENT SWITCHING.**

В силовых регулируемых электроприводах на основе вентильных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов используются преобразователи частоты как на основе инверторов напряжения (АИН), так и на основе инверторов тока (АИТ). В том случае, когда необходимо получить предельные удельные характеристики машины (например, максимальную мощность на единицу массы), преобразователи частоты должны не только обеспечивать частоту фазного тока, равную частоте ЭДС машины, но и задавать оптимальный фазовый угол между током и ЭДС.

Схемы преобразователей частоты на основе АИТ являются более сложными, чем на основе АИН, и требуют применения дросселя в цепи постоянного тока с индуктивностью, превосходящей индуктивность фазных обмоток. Вместе с тем преобразователи на основе АИТ имеют ряд преимуществ, основными из которых являются:

исключение высокочастотных пульса-

ций как в напряжении, так и в токе обмотки, что позволяет снизить потери в машине и улучшить виброакустические характеристики;

упрощение регулирования режимами работы машины, в частности, не требуется математических моделей машины;

обеспечение более устойчивой работы машины при возникновении каких-либо возмущений со стороны нагрузки.

Снижение пульсаций фазного тока при использовании АИН возможно за счет использования топологии многоуровневых АИН, что требует применения сложных многообмоточных входных трансформаторов и усложняет алгоритмы управления. При этом максимальная рабочая частота ШИМ АИН ограничена уровнем 1–3 кГц из-за значительного уровня динамических потерь в мощных высоковольтных IGBT-транзисторах (потери на включение и отключение).

Использование схем АИТ с естествен-

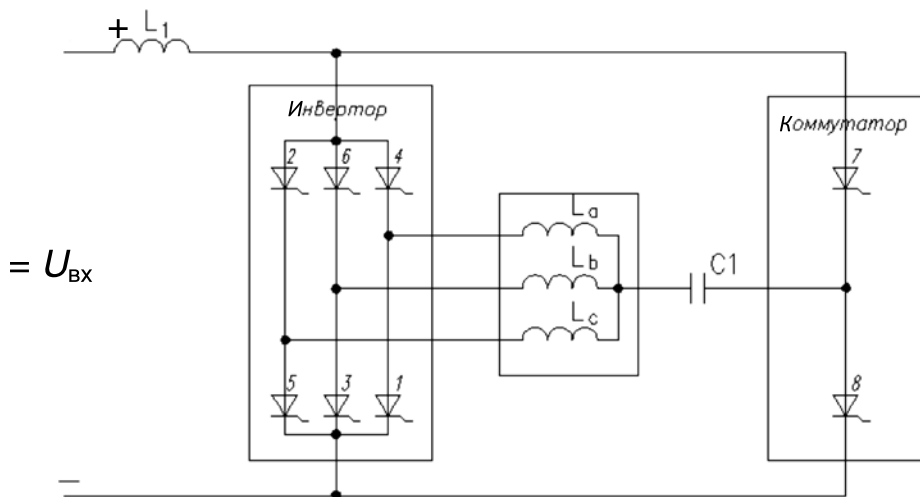


Рис. 1. Схема преобразователя частоты на основе АИТ со звеном искусственной коммутации на тиристорах и с одним конденсатором

ной коммутацией вентилях инвертора не позволяет получать предельные удельные характеристики двигателя, поскольку фаза расположения тока статорной обмотки по отношению к эдс возбуждения определяется параметрами машины и не является оптимальной. В связи с этим данные схемы в настоящей статье рассматриваться не будут.

Рассмотрим четыре вида схем преобразователя частоты на основе АИТ со звеном искусственной коммутации.

На рис. 1 представлена широко известная и простая схема инвертора тока со звеном искусственной коммутации.

Как видно из представленной схемы, она содержит помимо основного инверторного моста (1–6) два дополнительных коммутирующих тиристора (7, 8) и конденсатор (С1). По сигналу датчика положения ротора (ДПР) коммутирующие тиристоры обеспечивают подключение конденсатора к катодной или анодной группе инвертора, и конденсатор проводит гашение нужного

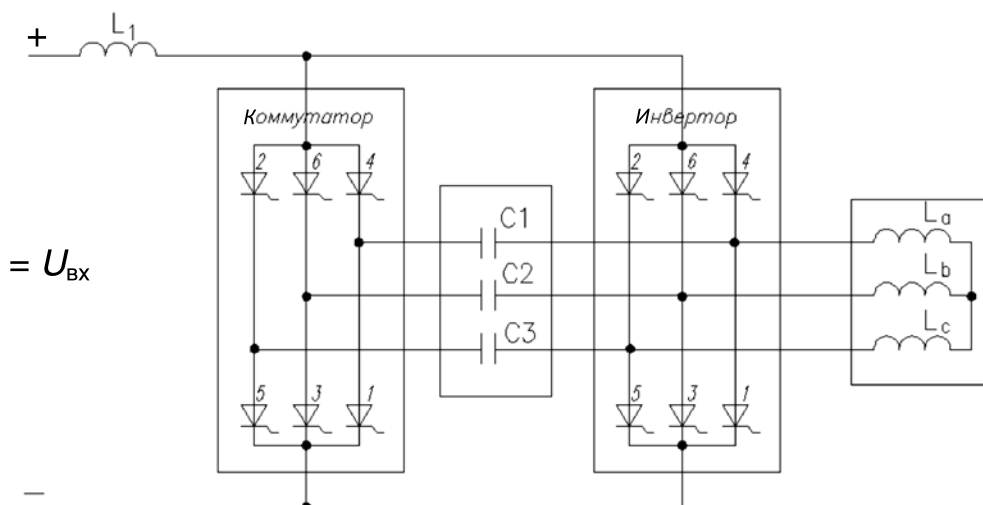


Рис. 2. Схема преобразователя частоты на основе АИТ с трехфазным тиристорным коммутатором и тремя конденсаторами

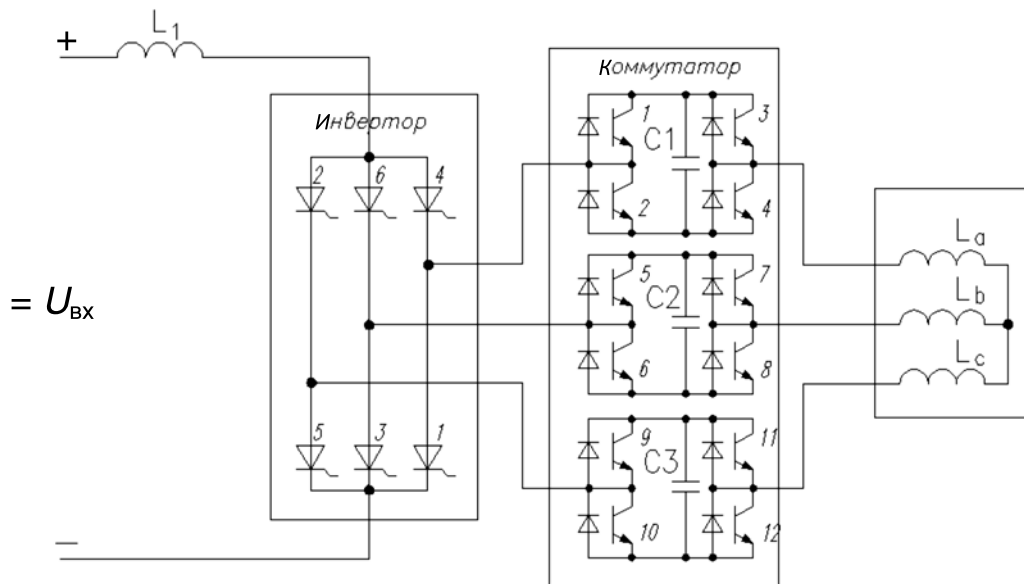


Рис. 3. Схема преобразователя частоты на основе АИТ с тремя однофазными звеньями искусственной коммутации на IGBT-транзисторах

тиристора в инверторе и соответствующего тока фазы. Затем после изменения полярности напряжения на конденсаторе обеспечивается включение следующего тиристора основного инверторного моста и заведение тока в следующую фазу.

Основным недостатком схемы является наличие значительных пульсаций электромагнитного момента двигателя из-за отключения тока в одной из фаз на время коммутации.

Постоянство тока двигателя в моменты коммутации и, соответственно, снижение пульсаций электромагнитного момента на валу машины может быть обеспечено при использовании схемы АИТ, показанной на рис. 2.

В этой схеме в состав преобразователя частоты помимо основного трехфазного тиристорного инвертора введен второй трехфазный мост на тиристорах (коммутатор) и три конденсатора — по одному на каждую фазу. Процесс коммутации можно разделить на три этапа. На первом этапе проводится отключение какого-либо тиристора основного инвертора, а ток фазы не обнуляется, как в предыдущей схеме, а переключается на один из тириستоров коммутатора. На втором этапе за счет на-

пряжения на конденсаторах снижается ток в отключаемой фазе и поднимается в подключаемой фазе. На завершающем этапе происходит гашение тиристоров коммутатора и включение соответствующих тиристоров основного инвертора.

Недостатками рассмотренной схемы являются переменное по знаку напряжение на конденсаторах, а также необходимость использования максимального напряжения на конденсаторах в 1,4 раза больше, чем это требуется при постоянном уровне напряжения.

Исключить изменение знака напряжения на конденсаторах позволяет схема АИТ, представленная на рис. 3. В рассматриваемой схеме коммутирующие конденсаторы включены в диагонали однофазных мостов, выполненных на основе транзисторов. Однофазные мосты расположены в каждой из фазных линий, связывающих основной инвертор с фазными обмотками машины [1].

Однофазный мост, плечи которого состоят из встречно-параллельно включенных IGBT-транзисторов и диодов, а в диагональ которого включен конденсатор, позволяет поддерживать постоянное по знаку напряжение на коммутирующем конденсаторе.

Величина пульсаций этого напряжения зависит от конкретных параметров схемы и может быть обеспечена на уровне 10–15 %.

Суммарный ток в машине в процессе коммутации так же, как и в схеме, приведенной на рис. 2, практически не изменяется, что обеспечивает низкий уровень пульсаций электромагнитного момента.

Существенным недостатком рассмотренной схемы является то, что однофазные мосты оказываются постоянно включенными в цепь питания статорных обмоток. Это приводит к значительному снижению КПД АИТ.

Исключить этот недостаток можно, используя схему АИТ, приведенную на рис. 4 [2].

Как видно из представленной схемы, она содержит два коммутирующих конденсатора, что позволяет изменять полярность коммутационного напряжения не за счет изменения полярности напряжения на конденсаторе, а за счет подключения то одного, то другого конденсатора. Напряжение на каждом из коммутирующих конденсаторов остается практически постоянным.

Схема АИТ содержит трехфазный мост на IGBT-транзисторах с обратными диодами, подключаемый при коммутации с помощью тиристоров 7 или 8 к основному мосту инвертора, выполненному на основе тиристоров.

Недостатком рассмотренной схемы является необходимость включения шести дополнительных коммутирующих тиристорных мостов, которые соединяют соответствующие фазы основного и дополнительного трехфазных мостов. Эти тиристоры препятствуют самопроизвольному замыканию фазных токов по цепям диодов, шунтирующих транзисторы дополнительного трехфазного моста.

Осциллограммы, характеризующие поведение фазных токов и напряжений на конденсаторах в процессе коммутации, показаны на рис. 5.

Как видно из представленных на рис. 5 осциллограмм, процесс коммутации состоит из трех характерных участков. На интервале  $t_1-t_2$  осуществляется выключение тиристора инвертора в отключаемой фазе и перевод тока в цепь коммутатора за счет энергии одного из его конденсаторов. На интервале  $t_2-t_3$  осуществляется перевод тока из отключаемой фазы в подключаемую под действием напряжения последовательно включенных конденсаторов коммутатора, подключенных к линейным выводам фаз соответствующими тиристорами и IGBT-транзисторами коммутатора. На интервале  $t_3-t_4$  производится дозаряд одного из коммутирующих конденсаторов, а по завершении этого процесса после подачи сигнала на соответствующий тиристор инвертора –

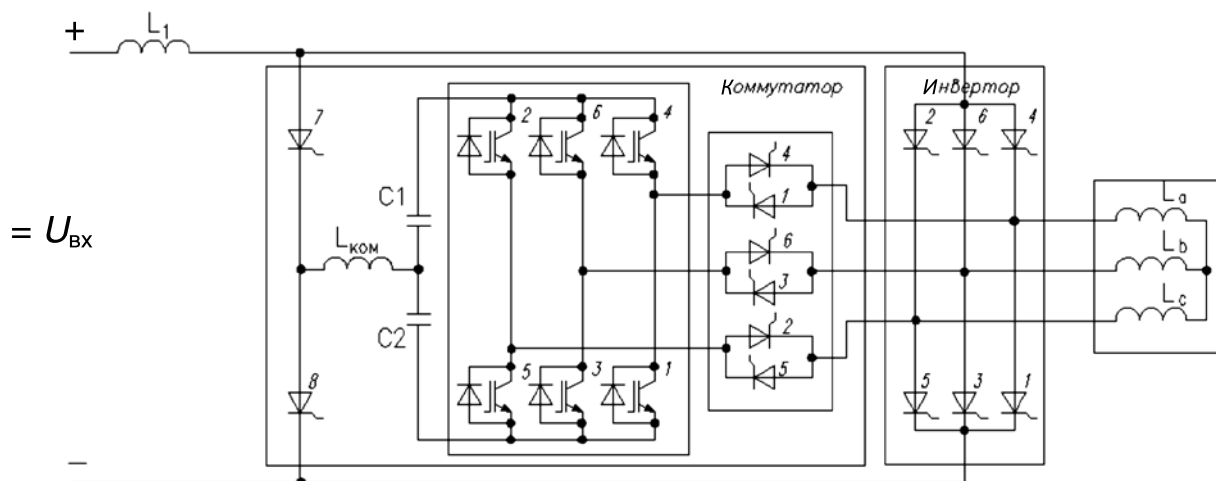


Рис. 4. Схема преобразователя частоты на основе АИТ с трехфазным звеном искусственной коммутации на IGBT-транзисторах

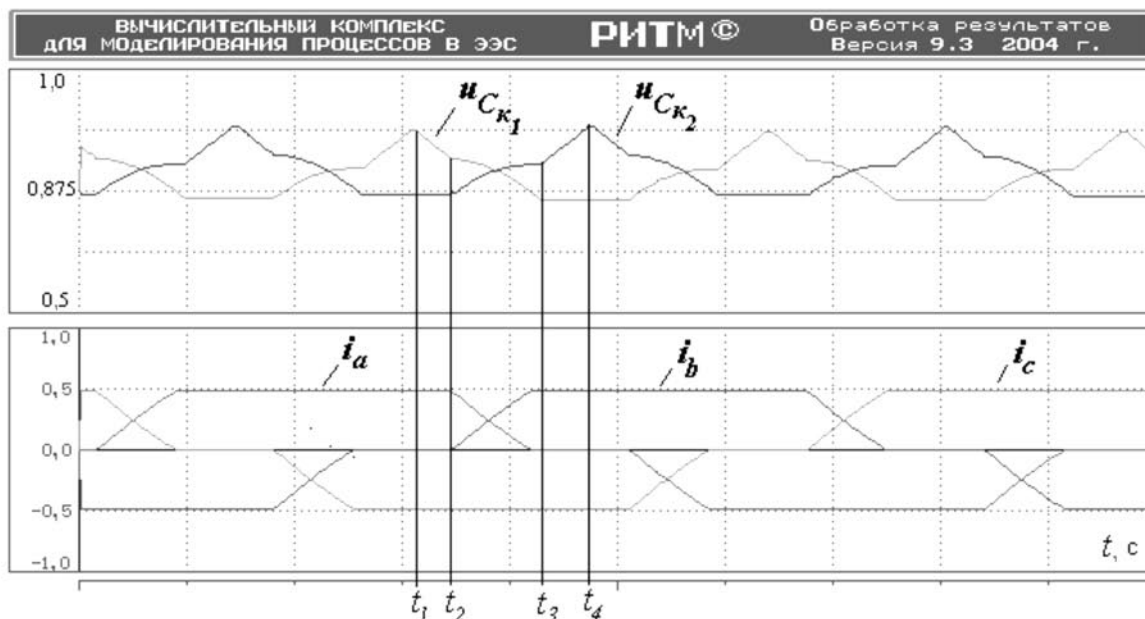


Рис. 5. Характерные кривые, описывающие поведение фазных токов и напряжений на конденсаторах в процессе коммутации

быстрый перевод тока из цепи коммутатора в цепь инвертора и отключение коммутирующих тиристоров и цепей коммутатора от цепей основного тока. На этом процесс коммутации завершается. Коммутация токов в других фазах осуществляется аналогично. При этом видно, что размах пульсаций напряжения на конденсаторах коммутатора составляет порядка 15 %. Суммарный ток в машине в процессе коммутации так же, как и в схемах, приведенных на рис. 2–4, практически не меняется, что обеспечивает низкий уровень пульсаций электромагнитного момента.

Сравнивая две последние схемы, отметим, что обе схемы обеспечивают практически идентичные характеристики фазных токов и напряжений. При этом вариант схемы на рис. 4 является более предпочтительным, поскольку имеет более высокий КПД за счет исключения из цепи основного тока IGBT-мостов. Следует также отметить, что представленная на рис. 3 схема содержит

меньшее количество IGBT-транзисторов и только две батареи коммутирующих конденсаторов, что снижает ее массу и габариты, несмотря на наличие шести дополнительных маломощных коммутирующих тиристоров.

В статье рассмотрены некоторые схемы АИТ со звеном искусственной коммутации, проанализированы их достоинства и недостатки. Наибольший интерес представляет схема, приведенная на рис. 4, которая имеет большее значение КПД при условии работы коммутирующего конденсатора без изменения полярности напряжения.

Схемы на основе АИТ, по сравнению со схемами на основе АИН, позволяют обеспечить уменьшение пульсаций как в напряжении, так и в токе обмотки, что позволяет снизить потери в машине, улучшить виброакустические характеристики, а также упростить регулирование режимами работы машины.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мустафа, Г.М. Высоковольтный преобразователь частоты для асинхронного электропривода [Текст] / Г.М. Мустафа, Ю.М. Сеннов,

Ю.Ю. Скороход // Травек, VII симп. Электротехника 2010. – 2003. – Т. 4. – Ст. № 5.17. – С. 76–77.

2. **Булгаков, С.А.** Система питания и управления многофазной вентиляльной машиной: Евразийский патент № 015042 [Текст] / С.А. Булгаков, В.Г. Кучинский, В.М. Чайка; заяви-

тель и патентообладатель ОАО НПО «Русский электропривод». — Заявл. 07.04.2010. — Оpubл. 29.04.2011.

#### REFERENCES

1. **Mustafa G.M., Sennov Yu.M., Skorohod Yu.Yu.** Vyisokovoltnyiy preobrazovatel chastoty dlya asinhronnogo elektroprivoda / Travek, VII simp. Elektrotehnika 2010. — Т. 4. — Ст. № 5.17. — S. 76–77. (rus)

2. **Bulgakov S.A, Kuchinskiy V.G, Chayka V.M.** Sistema pitaniya i upravleniya mnogofaznoy ventilnoy mashinoy / Evraziyskiy patent № 015042; zayavitel i patentoobladatel ОАО NPO «Russkiy elektroprivod»; zayavl. 07.04.2010; opubl. 29.04.2011. (rus)

---

**КУЧИНСКИЙ Владимир Георгиевич** — профессор кафедры электротехники и электроэнергетики Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук. 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.  
E-mail: vladkuchinsky@mail.ru

**KUCHINSKY Vladimir G.** St. Petersburg State Polytechnical University. 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.

**ПОПКОВ Евгений Николаевич** — заведующий кафедрой электрических систем и сетей Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, доктор технических наук, доцент. 195251, Россия, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 29.  
E-mail: ENPopkov@gmail.com

**POPKOV Evgeny N.** St. Petersburg State Polytechnical University. 195251, Politechnicheskaya Str. 29, St.-Petersburg, Russia.

**ЧАЙКА Валерий Михайлович** — начальник сектора систем питания отдела по разработке электроприводов, инженер ОАО НПО «Русский электропривод». 196247, Россия, Санкт-Петербург, Ленинский пр., д. 160, оф. 728.  
E-mail: info@ruselprivod.ru

**CHAYKA Valery M.** Russian Electric Drive OJSC. 196247, Leninsky prospect 160, of. 728, St.-Petersburg, Russia.