

УДК 621.316

## ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ПРИВОД VARIOUS FREQUENCY DRIVE

Е.Д. Баланюк, А.А. Сташевский

Научный руководитель - Т.Е. Жуковская, старший преподаватель

Белорусский национальный технический университет,

г. Минск, Республика Беларусь

zukovskaya@bntu.by

E. Balanyuk, A. Stashevsky

Supervisor – T. Zhukouskaya, Senior Lecturer

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

**Аннотация:** Статья рассматривает структуру и применение частотно-регулируемого привода, методы управления синхронного и асинхронного двигателей, принцип работы частотного преобразователя, трехфазного выпрямителя, инвертора, алгоритм работы широтно-импульсной модуляции.

**Abstract:** The article examines the structure and application of a variable frequency drive, control methods for synchronous and asynchronous motors, the operating principle of a frequency converter, three-phase rectifier, inverter, and the operating algorithm of pulse width modulation.

**Ключевые слова:** частотно-регулируемый привод, преобразователь частоты, выпрямитель, инвертор, широтно-импульсная модуляция.

**Key words:** variable frequency drive, frequency converter, rectifier, inverter, pulse width modulation.

### Введение

Частотно-регулируемый привод — система управления частотой вращения ротора асинхронного или синхронного электродвигателя. Состоит из собственно электродвигателя и частотного преобразователя. Частотный асинхронный преобразователь частоты служит для преобразования сетевого трёхфазного или однофазного переменного тока частотой 50 (60) Гц в трёхфазный или однофазный ток, частотой от 1 Гц до 800 Гц. Частотные преобразователи электронного типа часто применяют для плавного регулирования скорости асинхронного электродвигателя или синхронного двигателя за счёт создания на выходе преобразователя электрического напряжения заданной частоты. В простейших случаях регулирование частоты и напряжения происходит в соответствии с заданной характеристикой  $V/f$ , в наиболее совершенных преобразователях реализовано так называемое векторное управление. При скалярном управлении формируются гармонические токи фаз двигателя. Векторное управление — метод управления синхронными и асинхронными двигателями, не только формирующий гармонические токи (напряжения) фаз, но и обеспечивающий управление магнитным потоком ротора (моментом на валу двигателя).

### Основная часть

#### Принцип работы частотного преобразователя

Частотный преобразователь электронного типа — это устройство, состоящее из выпрямителя, преобразующего переменный ток промышленной частоты

в постоянный, и инвертора, преобразующего постоянный ток в переменный требуемой частоты и амплитуды. Выходные тиристоры GTO или транзисторы IGBT обеспечивают необходимый ток для питания электродвигателя.

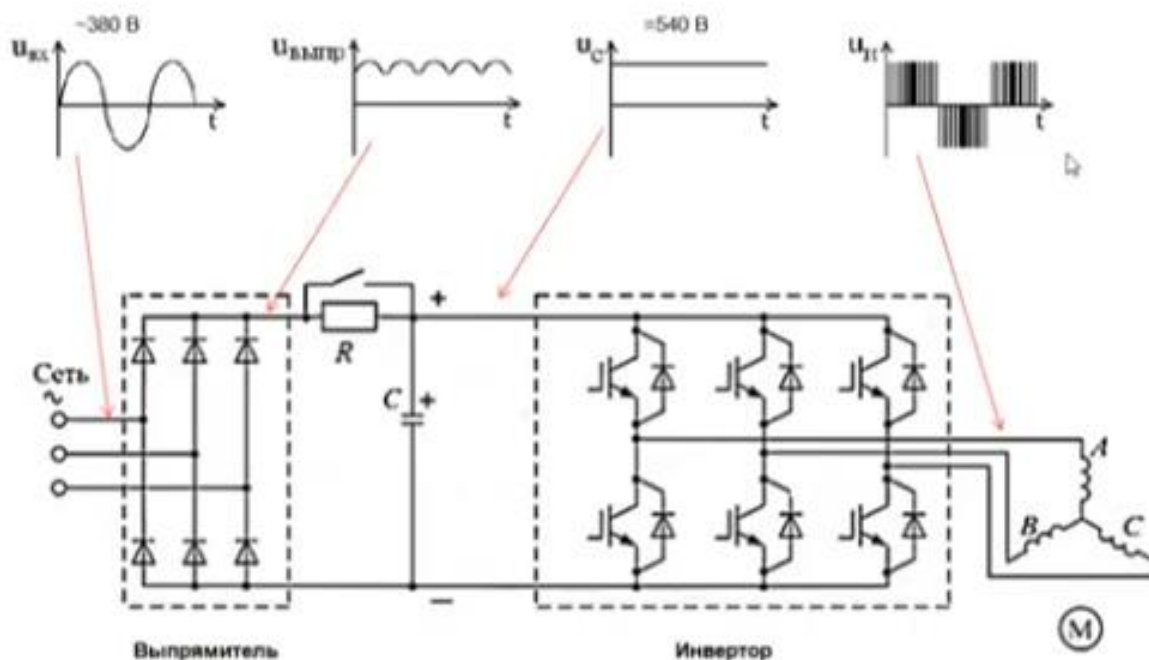


Рисунок 1 - Принципиальная схема частотного преобразователя

Для улучшения формы выходного напряжения между преобразователем и двигателем иногда ставят дроссель, а для уменьшения электромагнитных помех — ЕМС-фильтр.

После выпрямителя напряжение поступает на инвертор. Инвертор является самой сложной и важной частью преобразователя частоты. С выхода инвертора сигнал поступает уже непосредственно на электродвигатель. Форма напряжения на выходе инвертора представляет собой набор прямоугольных импульсов разной ширины и определенной длительности. Так строится силовая часть преобразователя частоты.

Схема прибора включает в себя также слаботочные цепи, которые помогают взаимодействию всех основных частей ПЧ. В частности, есть центральный процессор, который является, по сути, мозгом преобразователя, управляет как работой инвертора, так и других частей устройства. Информацию о выходном токе процессор получает от датчиков тока, расположенных на выходных цепях ПЧ. Сигнал с датчиков тока обрабатывается, и процессор далее формирует управляющий алгоритм, чтобы преобразователь мог функционировать в заданных пользователем условиях. Также еще есть источник питания собственных нужд, он питает как процессорную часть, так и часть, отвечающую за измере-

ния выходного тока и измерение напряжения на звене постоянного тока. Помимо этого, есть блок драйверных микросхем, которые в свою очередь управляют транзисторами инверторной части, и еще ряд вспомогательных элементов.

Рассмотрим принципиальное устройство инверторной части. Основными элементами силовой части инвертора являются IGBT-транзисторы – мощные, специально спроектированные для работы в ключевом режиме. Это гибрид полевого и биполярного транзисторов. Управляющая часть представляет собой изолированный затвор (как у полевого), а силовая часть повторяет устройство биполярного, у которого имеется коллектор–эмиттер. Силовые элементы выпускаются в виде сдвоенного модуля, состоящего из двух силовых транзисторов, включенных последовательно. Каждый из транзисторов шунтируется диодом в обратном направлении. Поскольку на выходе должно быть 3 фазы, в конструкции инвертора имеется 3 плеча (см. рис 2).

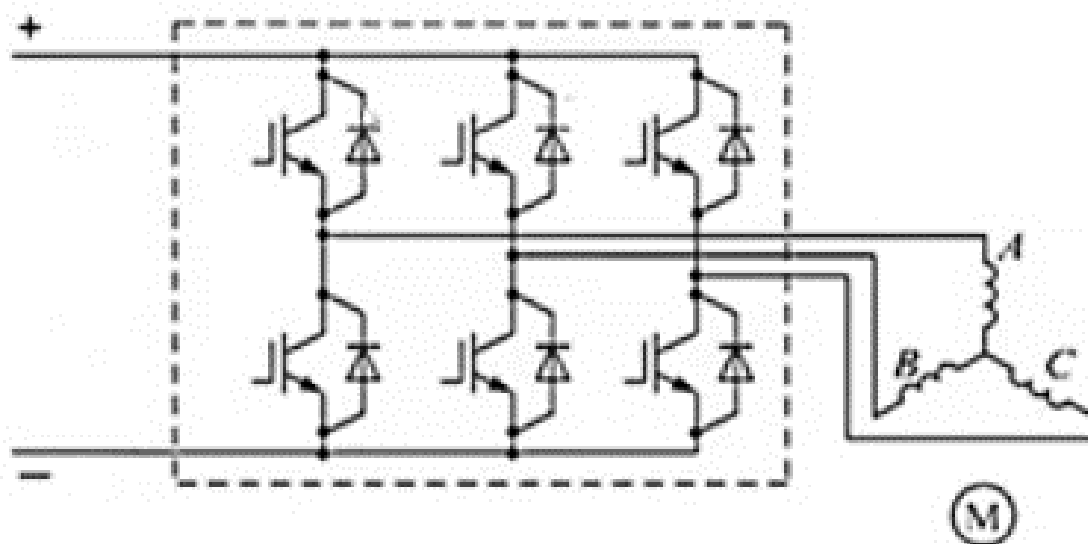


Рисунок 2 - Принципиальная схема инвертора

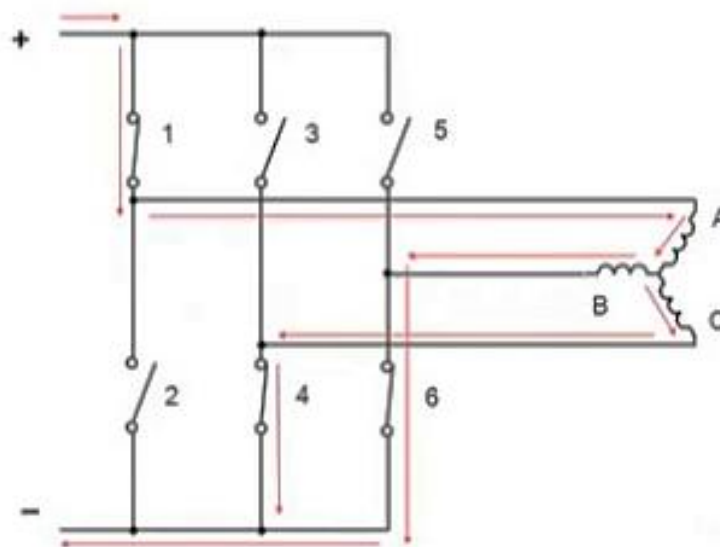


Рисунок 3 - Эквивалентная схема работы транзисторов

Чтобы лучше понять принцип работы, рассмотрим эквивалентную схему, где каждый транзистор заменен обычным выключателем. На схеме (рис. 3) условными обозначениями показаны 6 выключателей (транзисторов) и электродвигатель.

Изучим, как формируются выходные токи в обмотках двигателя. За управление транзисторами (переключателями на схеме) отвечает центральный процессор. Он переключает их строго по определенной программе, которая задается изначально алгоритмом его действия.

На схеме показано срабатывание ключей № 1, № 4, № 6. Обратите внимание, категорически не допускается ситуация, когда в одном плече замкнут и верхний ключ, и нижний – это короткое замыкание и отказ изделия. В ситуации, показанной на схеме, ток протекает через открытый ключ № 1, далее заходит в обмотку А электродвигателя, выходит из обмоток В и С, и через открытые нижние ключи №4 и № 6 уходит в минусовое звено.

Для того чтобы поменять ток в обмотке С, нужно переключить ключи среднего плеча. Ток по-прежнему будет протекать через открытый ключ № 1, а уходить через обмотку В и ключ №6 в минусовое плечо. При этом, одновременно, через замкнутый ключ № 3 и втекающий ток через обмотку С уходит в минус. Меняя положение открытых и закрытых ключей можно менять ток в обмотках двигателя. Если это делать по определенной программе, то получится изменяемый ток, как при работе двигателя от сети, то есть будет происходить плавное перетекание одной фазы в другую.

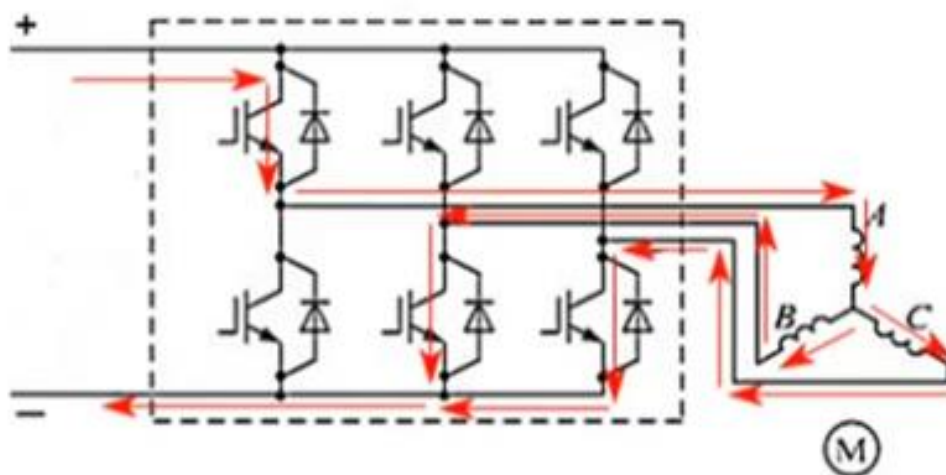


Рисунок 4 - Протекание тока в инверторе

Теперь вместо упрощенной схемы с выключателями рассмотрим, как протекает ток в цепи транзисторов на примере реального инвертора (рис. 4). По своей сути этот процесс ничем не отличается от рассмотренного ранее ключевого режима, за исключением того, что мы имеем дело с реальным двигателем, который, в принципе, является индуктивной нагрузкой.

В момент закрытия ключа индуктивность двигателя не позволит току мгновенно прекратиться за счет явления самоиндукции. Этот остаточный ток гасится обратными диодами, которые подключены к закрытым транзисторам (см. рис. 4), т.е. в момент выключения (закрывания) транзисторов остаточный ток протекает через обратные диоды, таким образом предотвращаются выбросы напряжения на ключе.

Но поскольку транзистор работает как ключ, он может выдать либо полное напряжение на двигатель, либо не выдать вообще. На практике же нужно получить некое плавное напряжение синусоидальной формы, причем изменяемое как по величине, так и по частоте, для того чтобы иметь возможность управлять скоростью вращения асинхронного двигателя.

### Алгоритм работы ШИМ

Далее рассмотрим, как формируется выходное напряжение методом широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Для примера возьмем некую гидравлическую модель, которая нам поможет понять, что происходит.

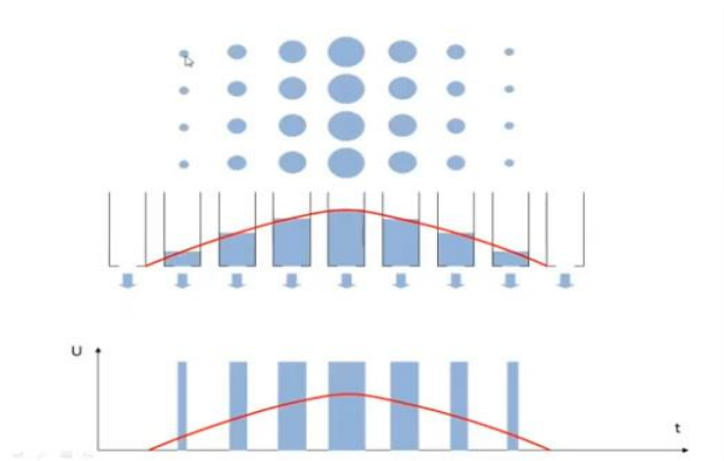


Рисунок 5 - Гидравлическая модель

Представим себе, что имеется ряд емкостей сосудов. В нижней части у каждого есть отверстия. С помощью некоего устройства, которое выдает капельки воды определенных размеров с неизменной частотой, начинаем наполнять эти сосуды. Понятно, что там, где размер капель небольшой, уровень жидкости установится на низком уровне, а чем больше размер капель, тем более высокий уровень будет иметь жидкость в сосуде. Подобрав определенным образом размер капель, можно получить огибающую этих уровней (см. рис. 5). Таким образом получилось изобразить статическую картину, которая дает понимание процесса, как можно из дискретных частей сделать некое подобие аналоговых.

Теперь перейдем к работе в динамике. Представим, что сосуд один, но меняем размер капель, которыми он заполняется. В нижней части рис. 5 показан процесс в этот момент времени – по оси  $x$  время ( $t$ ), по оси  $y$  напряжение ( $U$ ) или, по-другому – уровень воды в сосуде. По мере того, как изменяется размер капли, изменяется и средний уровень жидкости, он возрастает, а затем начинает

падать. Это уже динамический процесс. Теперь проводим аналогию с электричеством.

$$F_{\text{ШИМ}} = 1 / T_{\text{ШИМ}}$$

$$F_{\text{ШИМ}} = 1 \dots 15 \text{ кГц}$$

$$F_{\text{ВЫХ}} = 1 / T_{\text{ВЫХ}}$$

$$F_{\text{ШИМ}} \gg F_{\text{ВЫХ}}$$

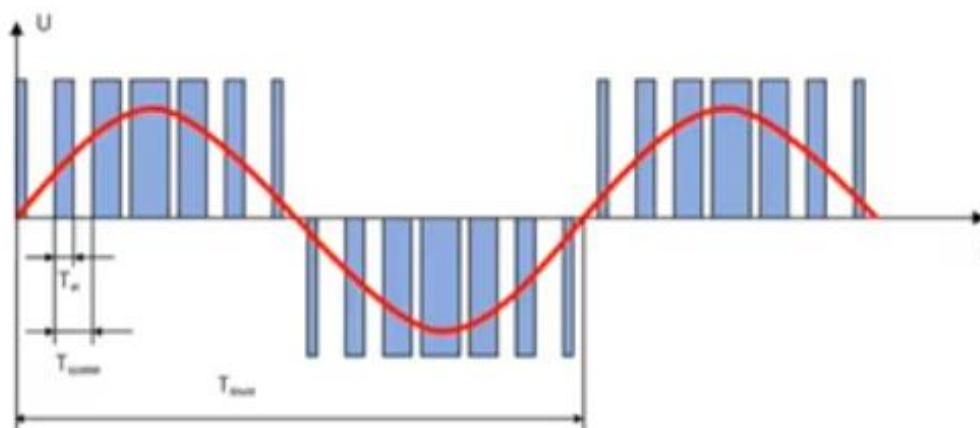


Рисунок 6 - Преобразование дискретного сигнала в аналоговый

На рис. 6 наглядно показано, что происходит с дискретным сигналом, если мы будем открывать ключ и закрывать с определенной частотой и на определенное время: чем шире импульс открытия транзистора, тем выше некий средний уровень напряжения (красная огибающая сигнала).

Введем несколько параметров и объясним их.

Период сигнала ШИМ – это время между импульсами. Параметр строго задан и не меняется (из ранее описанного примера это когда капельки все каплют с одинаковой частотой, только разного размера).

Частота ШИМ-модуляции — обратно пропорциональна длительности периода, это то, что мы имеем как один из параметров при программировании преобразователя частоты. Определяет частоту следования импульсов на выходе каждого из каналов IGBT-модуля.

Длительность импульса (t-импульса). Определяется уже самим процессором. То есть процессор в зависимости от заданного значения выходного сигнала в данный момент определяет, на какое время нужно открыть каждый ключ. Если рассмотреть общий период изменения этих колебаний, будем иметь период выходной частоты (t-выходная). Это выходная частота, которая будет у нас на выходе преобразователя частоты. От нее прямо пропорционально зависит скорость вращения двигателя.

За тем, чтобы двигатель не перегружался, и напряжение, которое подводится к нему на этой частоте, пропорционально уменьшалось или увеличивалось, следит преобразователь частоты. Он сам определяет необходимое время открытия каждого ключа, то есть определяя t-импульс. И такая ситуация про-



исходит одновременно на трех каналах, ведущих на выход преобразователя на электродвигатель.

Из рисунка видно, что чем чаще будут идти импульсы, тем ближе форма напряжения будет к синусоидальной.

### **Заключение**

Частотно-регулируемый привод нашел широкое применение в системах плавного пуска и управления асинхронных электродвигателей, работающих в разных отраслях промышленности, сфере ЖКХ, топливно-энергетическом комплексе. Чаще всего это насосы, мельницы, оборудование котельных, лифты, производственные линии, краны, станки. Результатом их использования становится существенное снижение эксплуатационных затрат при неизменном уровне производительности.

### **Литература**

1. Устройство и принцип работы преобразователя частоты. - Режим доступа: <https://www.vesper.ru/presscenter/articles/ustroystvo-i-printsip-raboty-preobrazovatelya-chastoty/>. – Дата доступа: 21.04.2024.

2. ЧАСТОТНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ (ЧАСТОТНЫЙ ИНВЕРТОР). - Режим доступа: <http://www.overdrive.by/articles/9/329.html>. – Дата доступа: 21.04.2024.