

ОСОБЕННОСТИ ЧАСТОТНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ, ФОРМИРУЮЩЕГО ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОЕ ФАЗНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ

Стариков Александр Владимирович,

доктор технических наук, доцент,

Самарский государственный технический университет, г. Самара

Лисин Сергей Леонидович,

кандидат технических наук, доцент,

Самарский государственный технический университет, г. Самара

Рокало Даниил Юрьевич,

аспирант,

Самарский государственный технический университет, г. Самара

Партузенков Ринат Ряшидович,

магистрант,

Самарский государственный технический университет, г. Самара

Аннотация: В статье рассмотрены упрощенная функциональная схема и принцип работы частотного преобразователя, формирующего трапецеидальное фазное напряжение. Показано, что в рассматриваемом инверторе за период широтно-импульсной модуляции переключаются только три транзистора, что снижает коммутационные потери в силовой части. Приведены аналитические зависимости, позволяющие определить гармонический состав выходного фазного напряжения. Показано, что рассматриваемый частотный преобразователь превосходит устройства с синусоидальной модуляцией по максимальной величине действующего напряжения. Подчеркнуто главное достоинство частотного преобразователя с трапецеидальной формой фазного напряжения, заключающееся в исключительной простоте технической реализации.

Ключевые слова: частотный преобразователь, фазное напряжение, асинхронный двигатель, коммутационные потери, гармонический состав

Большинство современных частотных преобразователей используют в своем составе так называемые векторные модуляторы [1 – 3], которые особым образом формируют трехфазную систему напряжений с помощью силового транзисторного моста. Такие модуляторы пришли на смену синусоидальным, поскольку обеспечивают уменьшение в 1,5 раза коммутационных потерь в силовых транзисторах и большее действующее значение фазного напряжения [1, 2]. Снижение коммутационных потерь при векторной модуляции объясняется тем, что в этом случае на каждом периоде широтно-импульсной модуляции переключается 4 силовых транзистора, в то время как при синусоидальной модуляции – 6 транзисторов. Следует также отметить, что в векторном

модуляторе на каждом периоде, не считая операций умножения, необходимо вычислять два синуса, а в синусоидальном – три.

Другой подход к построению частотного преобразователя заключается в использовании цифрового модулятора, осуществляющего такую широтно-импульсную модуляцию, при которой формируется трапецеидальная форма фазного напряжения на статорных обмотках асинхронного двигателя [4].

Целью настоящего исследования является определение основных достоинств и недостатков частотного преобразователя, формирующего трапецеидальную форму фазного напряжения.

Функциональную схему такого преобразователя в режиме скалярного частотного управления асинхронным двигателем М упрощенно можно представить следующим образом (рис. 1).

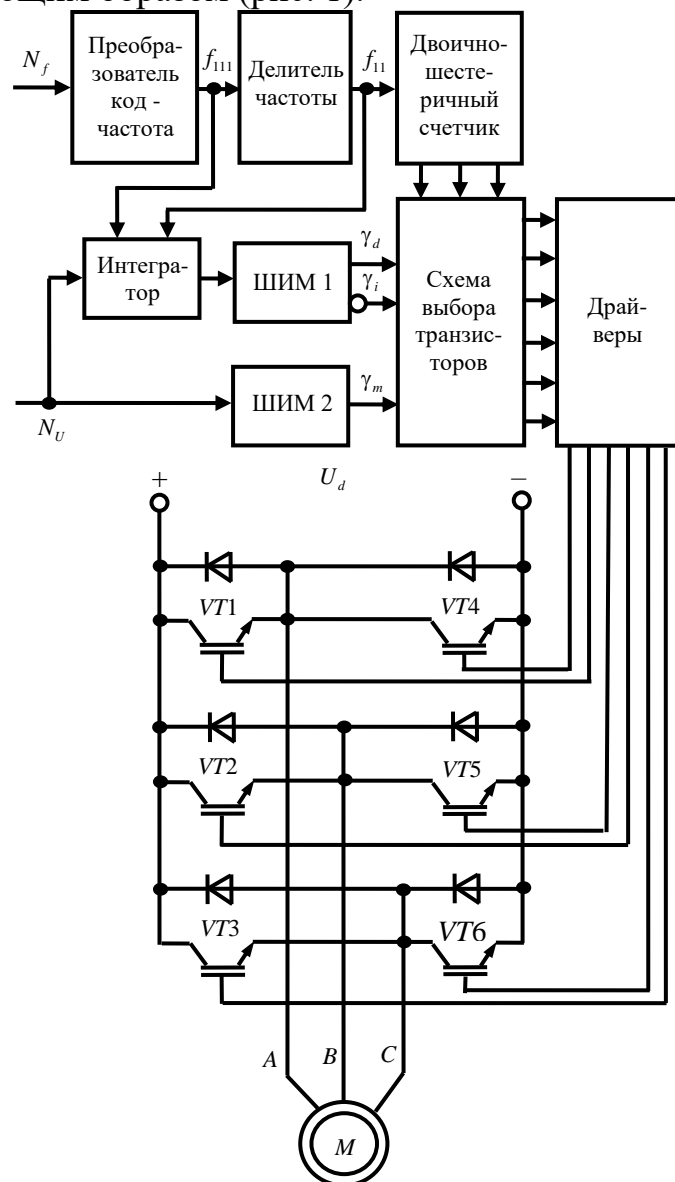


Рис. 1. Функциональная схема частотного преобразователя, формирующего трапецеидальную форму фазного напряжения

Она содержит преобразователь код – частота, делитель частоты, двоично-шестеричный счетчик, интегратор, два широтно-импульсных модулятора ШИМ1 и ШИМ2, схему выбора транзистора, драйверы управления процессами включения и выключения силовых транзисторов $VT1 – VT6$ частотного преобразователя. Преобразователь код – частота представляет собой логическую схему, на выходе которой формируется частота

$$f_{111} = 6mf_1,$$

где m – коэффициент деления делителя частоты; f_1 – требуемая частота на выходе преобразователя, задаваемая цифровым кодом N_f .

Эта частота определяет постоянную времени интегратора, на вход которого подается цифровой код N_U , пропорциональный требуемой величине амплитуды фазного напряжения U_1 . На выходе интегратора формируется линейно-нарастающий цифровой код, который подается на вход ШИМ1. При этом на выходах первого широтно-импульсного модулятора получаются сигналы переменной скважности: γ_d – на прямом, $\gamma_i = 1 - \gamma_d$ – на инверсном.

Делитель частоты формирует на своем выходе сигнал частотой

$$f_{11} = 6f_1,$$

который подается на вход сброса интегратора и на вход двоично-шестеричного счетчика. В результате выходной сигнал интегратора обнуляется с частотой f_{11} , и процесс формирования линейно-нарастающей скважности γ_d повторяется. Цифровой код N_U подается также на вход второго широтно-импульсного модулятора ШИМ2, который формирует скважность γ_m , определяющий амплитудное значение фазного напряжения на статорных обмотках асинхронного двигателя M .

На выходе двоично-шестеричного счетчика формируется переменный двоичный код (в десятичной интерпретации от 0 до 5), частота повторения которого равна f_1 . Этот код управляет схемой выбора транзисторов, через драйверы открывающей и закрывающей силовые транзисторы $VT1 – VT6$ трехфазного моста. Алгоритм работы схемы выбора транзисторов можно представить таблицей режима функционирования силовых ключей (таблица 1).

Таблица 1

Режимы функционирования силовых ключей

ωt , рад	$0 - \pi/3$	$\pi/3 - 2\pi/3$	$2\pi/3 - \pi$	$\pi - 4\pi/3$	$4\pi/3 - 5\pi/3$	$5\pi/3 - \pi$
Режим $VT1$	γ_d	γ_m	γ_i	Выкл.	Выкл.	Выкл.
Режим $VT2$	Выкл.	Выкл.	γ_d	γ_m	γ_i	Выкл.

Режим VT3	γ_i	Выкл.	Выкл.	Выкл.	γ_d	γ_m
Режим VT4	Выкл.	Выкл.	Выкл.	γ_d	γ_m	γ_i
Режим VT5	γ_m	γ_i	Выкл.	Выкл.	Выкл.	γ_d
Режим VT6	Выкл.	γ_d	γ_m	γ_i	Выкл.	Выкл.

Период синусоиды разделен на 6 частей, длительностью $\frac{\pi}{3}$, причем $\omega = 2\pi f_1$, и для каждого транзистора определен алгоритм работы, то есть указано с какой скважностью на данном участке он должен коммутироваться (γ_d , γ_i или γ_m) или должен быть выключен. В результате реализации этого алгоритма на статорных обмотках асинхронного двигателя формируется трехфазная система фазных напряжений, которые с учетом усреднения широтно-модулированного сигнала имеют трапецеидальный вид (рис. 2).

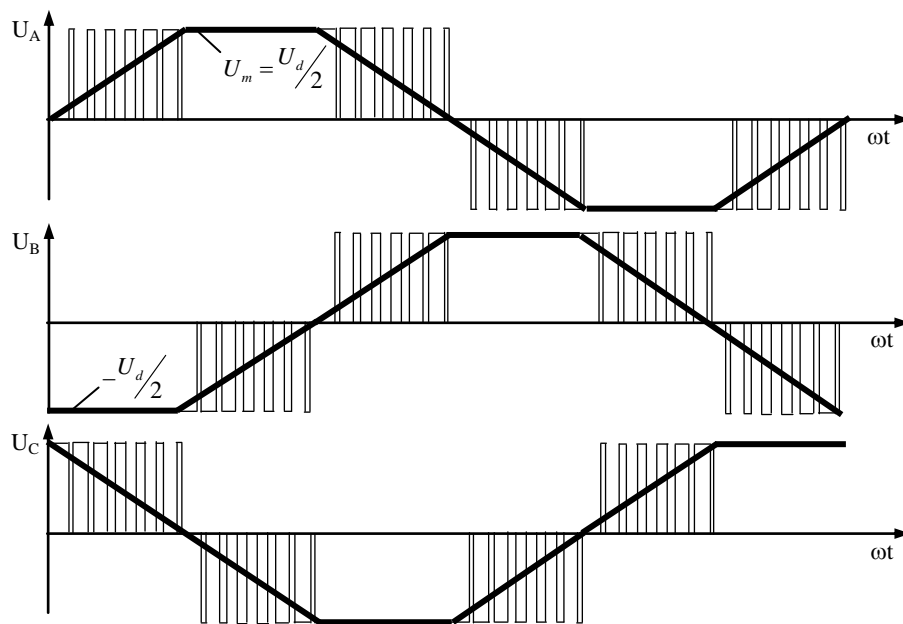


Рис. 2. Форма фазных напряжений на статорных обмотках асинхронного двигателя

Следует отметить, что на рисунке 2 представлены графики для случая максимальной амплитуды напряжения и в предположении, что индуктивность обмоток стремится к нулю. При скалярном частотном управлении зависимость между N_U и N_f определяется в основном режимом работы электропривода.

Для векторного управления асинхронным или синхронным двигателем может быть применена другая модификация частотного преобразователя с трапецеидальной формой фазного напряжения [5].

Анализ таблицы 1 показывает, что на каждом периоде широтно-импульсной модуляции работают три транзистора (а при максимальной величине напряжения только два), и это является одним из достоинств частотного преобразователя, формирующего трапецеидальную форму фазного напряжения. Действительно, в случае использования векторного модулятора за период переключаются четыре транзистора, при традиционной синусоидальной модуляции – шесть [1]. Следовательно, коммутационные потери в рассматриваемом частотном преобразователе как минимум на 25 % меньше, чем в устройствах с векторной модуляцией, и вдвое ниже по сравнению с синусоидальной модуляцией.

Другое преимущество частотного преобразователя, приведенного на рисунке 1, заключается в том, что в нем нет необходимости применения так называемой раздвижки фронтов («мертвого» времени) между сигналами выключения и включения транзисторов полумоста. Это объясняется тем, что переключение транзисторов происходит в момент прохождения фазного напряжения через ноль, когда $\gamma_d = 0$. В крайнем случае, при большой инерционности силовых ключей «мертвое» время можно вводить для каждого полумоста всего два раза за период синусоиды.

Еще одно достоинство рассматриваемого частотного преобразователя определяется исключительной простотой технической реализации. Действительно, в цифровом модуляторе, формирующем трапецеидальную форму фазных напряжений, не надо производить никаких вычислений, и он может быть реализован на программируемой логической интегральной схеме.

Однако упрощение приводит и к появлению недостатков. Во-первых, следует отметить, что трапецеидальная трехфазная система вызывает неравномерность вращения вектора напряжения и, как следствие, вектора тока в асинхронном двигателе. Максимальная погрешность скорости вращения вектора напряжения равна 12,17 % [6]. Наблюдается также вариация модуля этого вектора, которая составляет 7,18 % от среднего значения [6]. Тем не менее, следует обратить внимание на тот парадокс, что минимуму модуля вектора напряжения соответствует максимальная мгновенная скорость вращения. Отсюда вытекает, что при максимальной скорости будет минимальный динамический момент электродвигателя, и оба фактора нестабильности будут компенсировать друг друга с точки зрения стабилизации скорости вращения ротора. Кроме того, инерционность ротора и применение замкнутой системы управления асинхронным электродвигателем также будут сглаживать неравномерность вращения.

Второй недостаток заключается в том, что несинусоидальность напряжения приводит к появлению высших гармонических составляющих. Однако исследования показывают, что если пренебречь процессом широтно-импульсной

модуляции, коэффициенты ряда Фурье, аппроксимирующего трапецеидальную форму напряжения, определяются системой уравнений [7]

$$\left. \begin{aligned} b_{2l+1} &= 0, \text{ при } r = 0; \\ b_{2l+1} &= (-1)^{r-1} \frac{6\sqrt{3}}{(2l+1)^2 \pi^2} U_m, \text{ при } r = 1 \text{ и } r = 2, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $l = 0, 1, 2, 3, \dots$ – целое число; r – целочисленный остаток от деления $2l + 1$ на 3; U_m – амплитуда трапецеидального фазного напряжения.

Расчет по формулам (1) позволяет сделать следующие выводы:

- четные гармоники и гармоники с номером, кратным 3, отсутствуют в выходном сигнале рассматриваемого частотного преобразователя;
- величина амплитуды пятой гармоники составит 4 % от амплитуды первой гармоники;
- амплитуда седьмой гармоники не превысит 2,23 % от амплитуды первой гармоники.
- если рассматривать частотный преобразователь, формирующий трапецеидальную форму фазного напряжения, как источник электроснабжения, то в целом качество электроэнергии на его выходе соответствует ГОСТ 32144-2013 [8].

Очень важным показателем частотных преобразователей является максимально достижимая величина действующего значения фазного напряжения, которую можно получить из напряжения U_d постоянного тока. Из системы уравнений (1) можно рассчитать амплитуду первой гармоники ряда Фурье

$$U_{1m} = b_1 = \frac{6\sqrt{3}}{\pi^2} U_m.$$

В частотном преобразователе, осуществляющем формирование трапецеидального фазного напряжения, при максимальном входном сигнале N_v

$$U_m = 0,5U_d.$$

Поскольку при подключении к трехфазной сети с линейным напряжением 380 В $U_d = 515$ В [1], то амплитуда первой гармоники составит $U_{1m} = 271$ В, а максимальное действующее значение фазного напряжения будет равно $U_1 = 192$ В. В то же время в инверторах с синусоидальной модуляцией при тех же условиях максимальное фазное напряжение составляет 182 В [1, 3]. Следовательно, по действующему напряжению частотный преобразователь с трапецеидальной формой фазного напряжения превосходит инверторы с синусоидальной модуляцией. Однако рассматриваемый преобразователь уступает по показателю максимального действующего напряжения устройствам с векторной модуляцией. Но необходимо помнить о том, что повышение выходного напряжения с

помощью векторных модуляторов приводит к появлению плавающего потенциала на нулевой точке асинхронного двигателя при соединении его обмоток в «звезду» и ухудшению гармонического состава выходного напряжения [1].

Проведенный анализ особенностей частотного преобразователя с трапецеидальной формой фазного напряжения позволяет сделать вывод, что он обладает рядом как преимуществ, так и недостатков. Но за счет конструктивной простоты он может найти применение в устройствах, где требуется высокая надежность при минимуме вычислительных затрат базового микроконтроллера и повышенная частота коммутации силовых транзисторов.

Список литературы

1. Анучин А.С. Системы управления электроприводов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2015. – 373 с.
2. Калачев Ю.Н. Векторное регулирование (заметки практика) / Ю.Н. Калачев. – М.: ЭФО, 2013. – 63 с.
3. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г.Г. Соколовский. – М.: Академия, 2006. – 265 с.
4. Патент России № 2216850, МПК H03K7/08. Цифровой модулятор для преобразователя частоты асинхронного электродвигателя / А.В. Стариков, В.А. Стариков (Россия) // Оpubл. 20.11.2003, Бюл. № 32.
5. Патент России № 2517423, МПК H03K7/08. Цифровой модулятор для управления синхронным электродвигателем / А.В. Стариков, С.Л. Лисин, Л.Я. Макаровский (Россия) // Оpubл. 27.05.2014, Бюл. № 15.
6. Стариков А.В., Рокало Д.Ю. Влияние трапецеидальной формы напряжения на вращение магнитного поля в электродвигателях переменного тока // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 3 (47) – 2015. – Самара: СамГТУ, 2015. – С. 149 – 153.
7. Стариков А.В., Кузнецов В.В., Рокало Д.Ю. Анализ гармонического состава трапецеидального фазного напряжения, формируемого частотным преобразователем // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», № 3 (55) – 2017. – Самара: СамГТУ, 2017. – С. 75 – 79.
8. ГОСТ 32144-2013. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2014. – 16 с.