

УСТРОЙСТВО ФОРМИРОВАНИЯ ПЕРЕКЛЮЧАЮЩИХ ФУНКЦИЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ МАТРИЧНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ ЧАСТОТЫ

Федоров С.В.¹, Рогинская Л.Э.², Бондарев А.В.¹

¹Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Оренбургский государственный университет» филиал в г. Кумертау, Кумертау, Россия (453300 Кумертау, 2-ой пер. Советский 3Б), e-mail: kafedraapp@kfosu.edu.ru

²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Уфимский государственный авиационный технический университет», Уфа, Россия (450000, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул.К. Маркса, д. 12), e-mail: office@ugatu.su

Приведено описание устройства формирования переключающих функций системы управления матричным преобразователем частоты. Данное устройство может быть использовано в системах регулирования частотно-управляемых электроприводов переменного тока и спецпотребителей. Выходное напряжение матричного преобразователя частоты формируется данным устройством по принципу амплитудной модуляции эталонной синусоиды ступенями, образованными из участков двенадцатифазного входного напряжения. Приведенное устройство позволяет формировать выходное напряжение в диапазоне от сверхнизких частот до частоты 150 Гц. При этом в области низких частот до 15 Гц коэффициент гармоник выходного напряжения соответствует значению, указанному в ГОСТ 13109-97. В области выше 15 Гц требует применение широтно-импульсной модуляции для смещения высших гармоник в область высоких частот. Структура устройства формирования переключающих функций, состоящая из отдельных идентичных блоков, позволяет упростить процесс производства, а также применять модульную технологию в изготовлении и обслуживании, как самого устройства, так и всей системы управления в целом.

Ключевые слова: матричный преобразователь частоты, амплитудная модуляция, коэффициент гармоник.

THE DEVICE FORMING THE SWITCHING FUNCTIONS OF THE SYSTEM CONTROL MATRIX FREQUENCY CONVERTER

Fedorov S.V.¹, Roginskaya L.E.², Bondarev A.V.¹

¹Federal state budgetary educational institution of higher professional education "Orenburg state University" branch, Kumertau, Kumertau, Russia (453300 Kumertau, 2 Sovetskaya street, 3B), e-mail: kafedraapp@kfosu.edu.ru

²Federal state budgetary educational institution of higher professional education "Ufa state aviation technical University, Ufa, Russia, 450000, Republic of Bashkortostan, city of Ufa, street K. Marx, 12), e-mail: office@ugatu.su

The description of device forming the switching functions of the system control matrix of the frequency Converter. This device can be used in control systems frequency-controlled AC drives and special consumers. The output voltage of the matrix Converter frequency is generated by this device on the principle of amplitude modulation of the reference sinusoid steps that are made up of sections twelve-phase input voltage. Given the device will generate an output voltage in the range from very low frequencies up to the frequency of 150 Hz. In the area of low frequencies up to 15 Hz output voltage corresponds to the value of the distortion factor of the waveform of the voltage specified in GOST 13109-97. In the region above 15 Hz requires the use of pulse-width modulation to offset the higher harmonics in the high frequency range. Structure consisting of individual blocks, and identity elements can simplify the manufacturing process, and to use modular technology in the manufacture and maintenance of the device and the whole system of governance in general.

Keywords: matrix converter frequency, amplitude modulation, harmonic.

При проектировании преобразователя частоты (ПЧ) основными критериями являются качество выходного напряжения, ценовые и массогабаритные показатели. Несмотря на то, что ГОСТом и международными стандартами предусмотрен целый ряд критериев качества электроэнергии, основным при проектировании преобразователей является спектральный критерий – коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения [1]. С целью улучшения гармонического состава выходного напряжения в преобразователях частоты

изменяют либо силовую схему, либо алгоритм модуляции системы управления, либо и то и другое.

Эти обстоятельства стимулируют использование в их составе входных фильтров, которые частично решают отмеченные выше проблемы, но при этом увеличивают стоимость и ухудшают массогабаритные и динамические показатели. Поэтому особого внимания заслуживают вопросы согласования ПЧ с питающей сетью. Помимо требований по качеству потребляемой электроэнергии, современные ПЧ также должны обеспечивать возможность рекуперации энергии в питающую сеть.

Одним из перспективных направлений уменьшения потребления реактивной мощности из питающей сети при одновременной возможности рекуперации энергии и снижения уровня высших гармоник сетевого тока является применение схем матричных преобразователей (МПЧ), использующих в своей схеме полностью управляемые ключи.

Развитие современной элементной базы и новые технические возможности дали толчок к развитию новых принципов управления, нереализуемых ранее ввиду своей сложности. Все это позволяет вести разработку систем управления, позволяющих снизить коэффициент гармонических составляющих выходного напряжения ПЧ.

Целью исследования является уменьшение коэффициента искажения синусоидальности выходного напряжения матричных преобразователей частоты на основе разработки устройства формирования переключающих функций системы управления с амплитудной модуляцией.

Устройство относится к преобразовательной технике, в частности к элементам систем управления преобразователями частоты с непосредственной связью матричного типа, и может быть использовано в системах регулирования частотно-управляемых электроприводов переменного тока и спецпотребителей.

Задачей устройства является формирование выходного напряжения в соответствии с требованиями ГОСТ 13109-97 к значению коэффициента искажения синусоидальности [1].

Поставленная задача решается устройством формирования переключающих функций системы управления матричным преобразователем частоты (рисунок 1) с силовой схемой на основе трехфазно-однофазного преобразователя. Силовая схема ПЧ содержит основные первый – шестой полностью управляемые ключи с двухсторонней проводимостью, соединенные по трехфазной мостовой схеме, вход которой через реакторы подключен к фазным проводам трехфазной сети переменного тока, а выход – к нагрузке, и дополнительные седьмой и восьмой полностью управляемые ключи с двухсторонней проводимостью [4].

Выходом устройства формирования переключающих функций системы управления матричным преобразователем частоты являются переключающие функции $h_{Л1}, h_{Л2}, h_{Л3}, h_{Л4}, h_{Л5}, h_{Л6}, h_{Ф1}, h_{Ф2}, h_{Ф3}, h_{Ф4}, h_{Ф5}, h_{Ф6}$. Значение какой-либо из этих функций равно 1, если четырехзначный код заданной ступени на выходе блока квантования и записи модулирующего сигнала (блок 1 на рисунке 1) совпадает с четырехзначным кодом идентифицированной ступени (сформированной каким-либо входным напряжением) на выходе одного из блоков квантования и записи фазного напряжения (блоки 4 на рисунке 1) или блоков квантования и записи линейного напряжения (блоки 2 на рисунке 1). Таким образом, данная переключающая функция отпирает соответствующие силовые ключи, которые подключают соответствующее входное напряжение к выходу преобразователя частоты. Все остальные переключающие функции равны 0 [2].

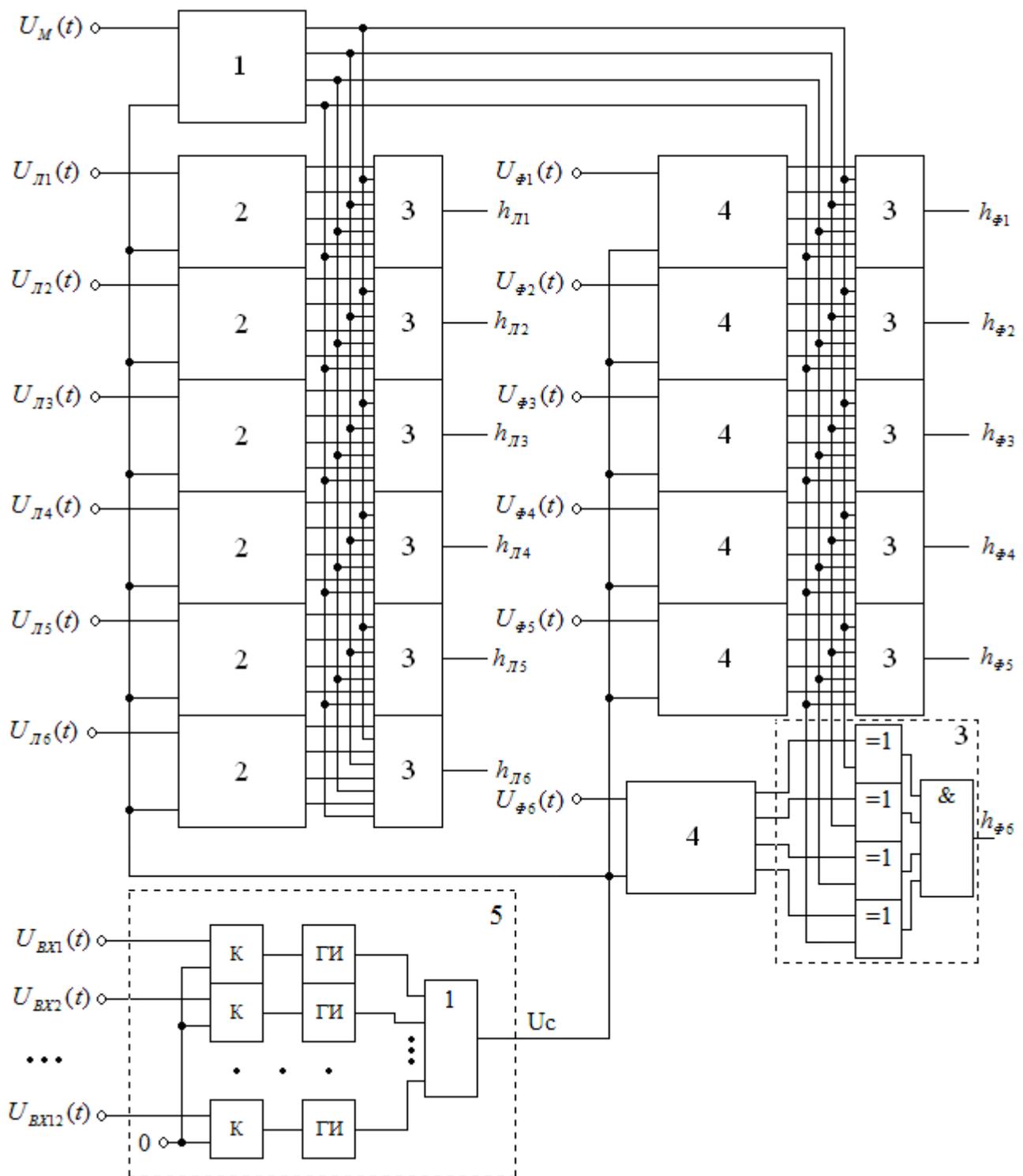


Рис. 1. Устройство формирования переключающих функций системы управления МПЧ с алгоритмом на основе амплитудной модуляции

Выходное напряжение преобразователя частоты формируется по принципу амплитудной модуляции эталонной синусоиды ступенями, полученными из участков 12-фазного напряжения длительностью равной периоду дискретизации T_d . В качестве периода дискретизации T_d принято время между пересечением какой-либо из 12 фаз нулевого

значения. Время дискретизации T_d составляет величину равную $T_0/12$, где T_0 период входного 12 фазного сигнала.

Амплитудная модуляция синусоидального напряжения осуществляется 6 положительными и 6 отрицательными уровнями (всего 12 уровней). Это означает, что выходное напряжение будет ступенчатым с 6 положительными и 6 отрицательными ступенями. Выбор такого количества ступеней связан с тем, что на всем периоде дискретизации T_d 12 фазное входное напряжение представлено 12 участками с различными средними значениями (рисунок 2, а). Выходное напряжение показано на рисунке 2, б.

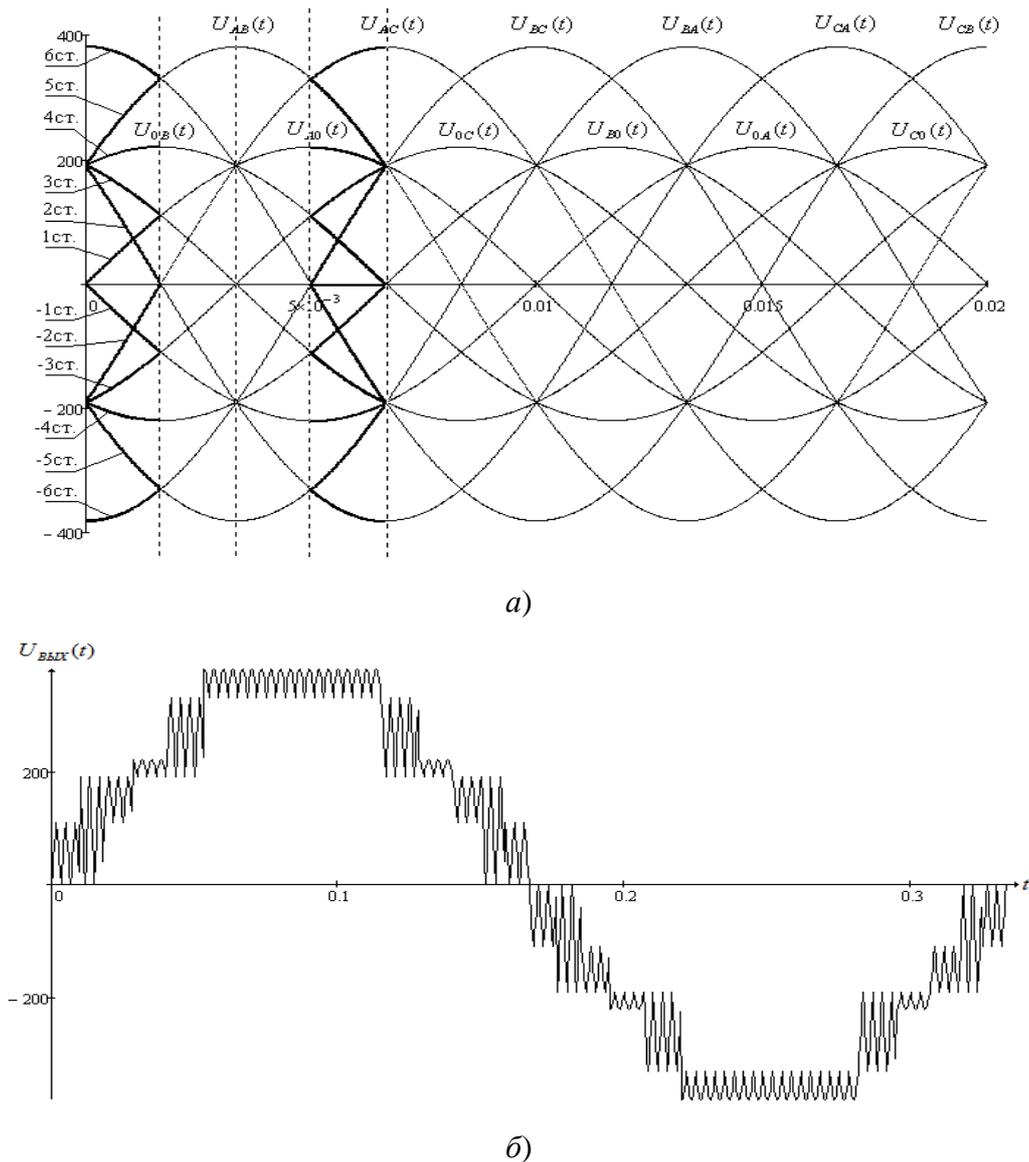


Рис. 2. Участки входного 12-фазного напряжения, используемые в качестве ступеней при формировании выходного напряжения (а), выходное напряжение с частотой 3 Гц (б)

Устройство формирования переключающих функций системы управления матричным преобразователем частоты, реализующее принцип, описанный выше, состоит из следующих блоков.

Первая часть представляет собой блок квантования и записи модулирующего напряжения $U_M(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ (блок 1 на рисунке 1). На рисунке 3 приведена схема блока квантования и записи модулирующего напряжения.

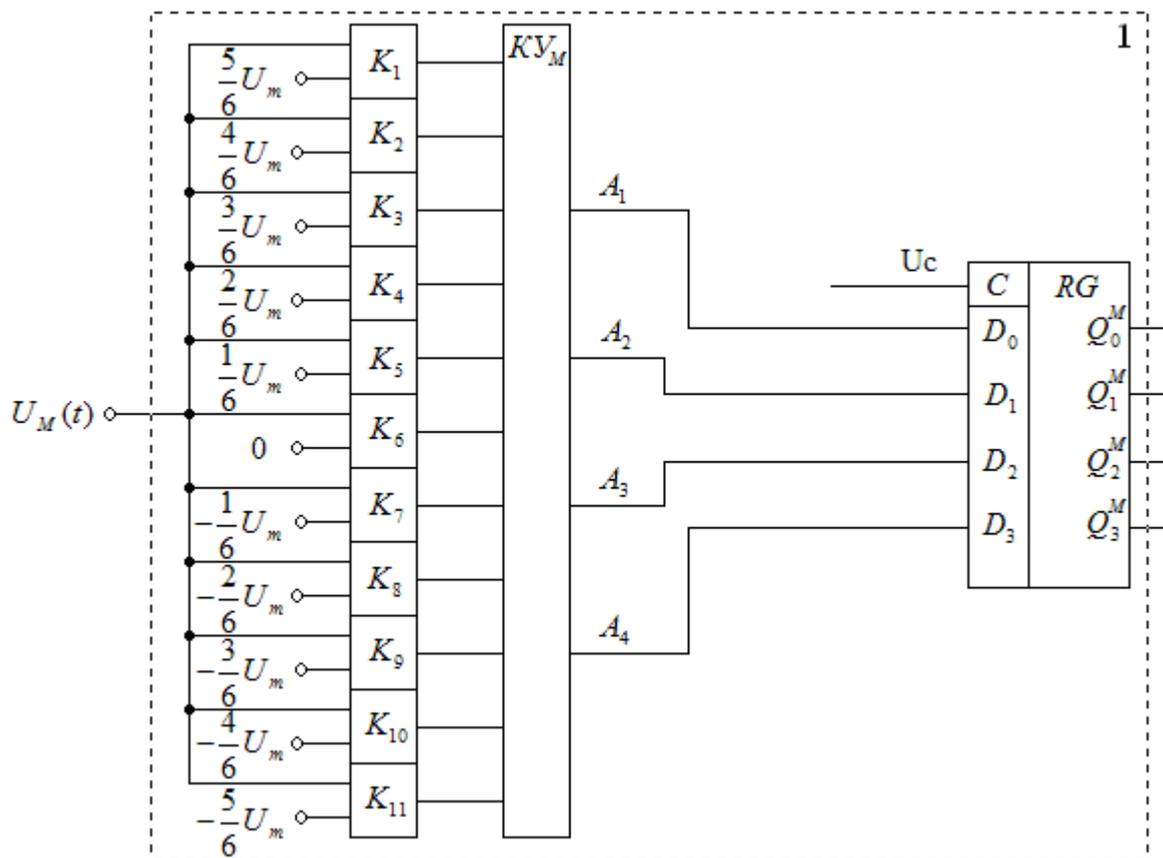


Рисунок 3 – Схема блока квантования и записи модулирующего напряжения

Поскольку число ступеней выходного напряжения равно 12, то число уровней квантования также равно 12.

В качестве устройства, реализующего данное квантование используется схема из 11 компараторов напряжения ($K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6, K_7, K_8, K_9, K_{10}, K_{11}$). Каждый компаратор настраивается на определенный уровень входного напряжения так, чтобы выходной сигнал изменялся от 0 до 1 каждый раз, когда входное напряжение превысит заданный уровень.

Поскольку общее количество уровней квантования выходного напряжения 12, то чтобы их закодировать требуется 4 разрядный код ($2^4=16$ значений). Поэтому на выходе компараторов необходимо синтезировать кодирующее устройство KU_M . Данное устройство

должно преобразовывать 11 разрядный код с выхода компараторов в 4 разрядный, т.е. иметь 11 входов и 4 выхода. Уравнения кодирующего KU_M устройства в форме СДНФ [3]:

$$A_1 = \bar{K}_1 \bar{K}_2 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8 K_9 K_{10} K_{11} + K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8 K_9 K_{10} K_{11}$$

$$A_2 = \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 \bar{K}_5 \bar{K}_6 K_8 K_9 K_{10} K_{11} + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 K_6 K_7 K_8 K_9 K_{10} K_{11}$$

$$A_3 = \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 \bar{K}_5 \bar{K}_6 \bar{K}_7 \bar{K}_8 K_{10} K_{11} + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 K_6 K_7 K_8 K_9 K_{10} K_{11} + K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8 K_9 K_{10} K_{11}$$

$$A_4 = \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 \bar{K}_5 \bar{K}_6 \bar{K}_7 \bar{K}_8 \bar{K}_9 \bar{K}_{10} K_{11} + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 \bar{K}_5 \bar{K}_6 \bar{K}_7 \bar{K}_8 K_9 K_{10} K_{11} + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 \bar{K}_5 \bar{K}_6 K_7 K_8 K_9 K_{10} K_{11} + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 K_5 K_6 K_7 K_8 K_9 K_{10} K_{11} + \bar{K}_1 \bar{K}_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8 K_9 K_{10} K_{11} + K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_7 K_8 K_9 K_{10} K_{11}$$

Данные уравнения реализуются с помощью методов цифровой схемотехники [3].

Принцип работы данной системы состоит в следующем. Входное двенадцатифазное напряжение (на схеме $U_{BX1}(t)$, $U_{BX2}(t)$, ..., $U_{BX12}(t)$) подается на вход блока синхронизации (блок 5 на рисунке 1). На выходе блока синхронизации образуется импульс U_C , фиксирующий переход через ноль какого-либо напряжения $U_{BX1}(t) - U_{BX12}(t)$. Далее этот импульс поступает на синхронизирующий вход S регистра RG блока 1 (блок квантования и записи модулирующего сигнала). В момент поступления этого импульса в регистре записывается двоичный четырехразрядный код с выхода KU_M . Т.е. записывается код текущей ступени квантованного напряжения $U_M(t)$.

Дальнейшей задачей является определить какое из входных напряжений $U_{BX1}(t) - U_{BX12}(t)$ в данный момент времени формирует данную ступень и, соответственно, подключить данное напряжение к выходу преобразователя частоты. Данную задачу решает вторая часть устройства формирования переключающих функций системы управления преобразователя частоты, осуществляющая идентификацию номера ступени, образуемой каждым из 12 входных напряжений.

Согласно рисунку 2, *a* в моменты дискретизации входными линейными напряжениями образуются ступени: 6, 5, 2, -2, -5, -6. Фазными напряжениями формируются ступени: 4, 3, 1, -1, -3, -4.

Следующим блоком является блок квантования и записи линейного напряжения (блок 2 на рисунке 1). На рисунке 4 приведена схема блока квантования и записи линейного напряжения.

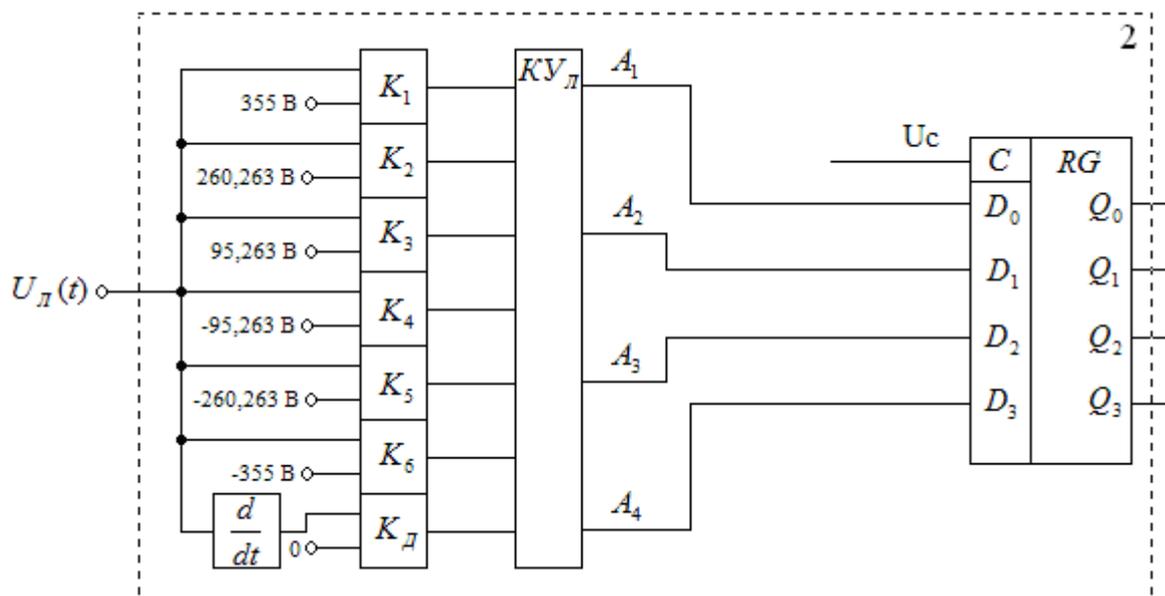


Рис. 4. Схема блока квантования и записи линейного напряжения

Номер ступени формируемой линейным напряжением однозначно можно определить по значению напряжения в момент переключения и знаку производной данного напряжения.

Т.е. задача идентификации сводится к определению значения напряжения и знака производной. Определение значения осуществляется с помощью квантования по уровню. Поскольку имеется 7 значений напряжения, весь диапазон входного сигнала разделим на участки так, чтобы все эти значения оказались в середине данных участков. В результате получаем 6 уровней квантования: 355 В; 260,263 В; 95,263 В; -95,263В; -260,263 В; -355 В.

В качестве устройства, реализующее данное квантование возьмем схему из 6 компараторов напряжения ($K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$) и компаратора скорости, состоящего из дифференциатора и компаратора K_d . Каждый компаратор настраиваются на определенный уровень входного напряжения так, чтобы выходной сигнал изменялся от 0 до 1 каждый раз, когда входное напряжение превысит заданный уровень.

Поскольку все 12 уровней квантования закодированы 4 разрядным кодом, то к выходу компараторов $K_1 - K_6, K_d$ необходимо подключить устройство с 7 входами и 4 выходами. Данное кодирующее устройство $KУ_л$ должно преобразовывать семизначный код каждой ступени, создаваемой линейным напряжением, в четырехзначный. Уравнения кодирующего устройства $KУ_л$ в форме СДНФ [3]:

$$A_1 = \bar{K}_1 \bar{K}_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_d + \bar{K}_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 \bar{K}_d + \bar{K}_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_d + K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6;$$

$$A_2 = \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 K_4 K_5 K_6 K_d + \bar{K}_1 \bar{K}_2 K_3 K_4 K_5 K_6 \bar{K}_d + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 K_4 K_5 K_6 \bar{K}_d + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 K_5 K_6 K_d;$$

$$A_3 = \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 K_4 K_5 K_6 K_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 K_3 K_4 K_5 K_6 \bar{K}_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_D + \bar{K}_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 \bar{K}_D + \bar{K}_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_D + K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6$$

$$A_4 = \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 K_4 K_5 K_6 K_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 K_3 K_4 K_5 K_6 \bar{K}_D + \bar{K}_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_D + K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 K_5 K_6 \bar{K}_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 \bar{K}_5 K_6 K_D$$

Данные уравнения реализуются с помощью методов цифровой схемотехники [3].

Далее следует блок квантования и записи фазного напряжения (блок 4 на рисунке 1).

На рисунке 5 приведена схема блока квантования и записи фазного напряжения.

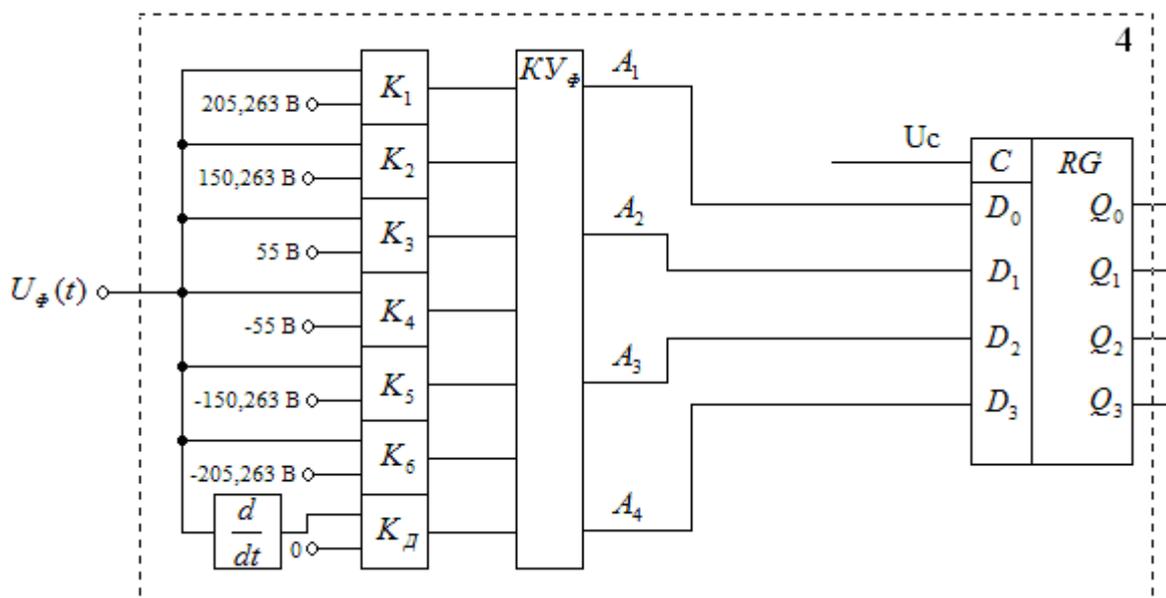


Рис. 5. Схема блока квантования и записи фазного напряжения

Номер ступени формируемой фазным напряжением $U_\phi(t)$ также однозначно можно определить по значению напряжения в момент переключения и знаку производной данного напряжения.

Т.е. задача идентификации сводится к определению значения напряжения и знака производной. Определение значения осуществляется с помощью квантования по уровню. Поскольку имеется 7 значений напряжения, весь диапазон входного сигнала разделим на участки так, чтобы все эти значения оказались в середине данных участков.

В результате получаем 6 уровней квантования: 205,263 В; 150,263 В; 55 В; -55 В; -150,263 В; -205,263 В.

В качестве устройства, реализующее данное квантование возьмем схему из 6 компараторов напряжения ($K_1, K_2, K_3, K_4, K_5, K_6$) и компаратора скорости, состоящего из дифференциатора и компаратора K_D . Каждый компаратор настраиваются на

определенный уровень входного напряжения так, чтобы выходной сигнал изменялся от 0 до 1 каждый раз, когда входное напряжение превысит заданный уровень.

Поскольку все 12 уровней квантования закодированы 4 разрядным кодом, то к выходу компараторов $K_1 - K_6$, K_D необходимо подключить устройство с 7 входами и 4 выходами. Данное кодирующее устройство KU_ϕ должно преобразовывать семизначный код каждой ступени, создаваемой фазным напряжением, в четырехзначный. Уравнения кодирующего устройства KU_ϕ в форме СДНФ [3]:

$$A_1 = \bar{K}_1 \bar{K}_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_D + \bar{K}_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 \bar{K}_D + \bar{K}_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_D + K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6;$$

$$A_2 = \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 K_4 K_5 K_6 K_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 K_3 K_4 K_5 K_6 \bar{K}_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 K_4 K_5 K_6 \bar{K}_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 K_5 K_6 K_D;$$

$$A_3 = \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 K_4 K_5 K_6 K_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 K_3 K_4 K_5 K_6 \bar{K}_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 K_5 K_6 \bar{K}_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 \bar{K}_5 K_6 K_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 K_5 K_6 \bar{K}_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 \bar{K}_5 \bar{K}_6;$$

$$A_4 = \bar{K}_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 K_D + K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 K_6 + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 K_4 K_5 K_6 \bar{K}_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 K_5 K_6 K_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 K_5 K_6 \bar{K}_D + \bar{K}_1 \bar{K}_2 \bar{K}_3 \bar{K}_4 \bar{K}_5 K_6 K_D;$$

Данные уравнения реализуются с помощью методов цифровой схемотехники [3].

Полученные на выходе шести блоков 2 и шести блоков 4 четырехзначные коды номеров ступеней, формируемых линейными и фазными входными напряжениями, необходимо сравнить с помощью *блока сравнения* (блок 3 на рисунке 1) с четырехзначным кодом номера ступени, полученным путем квантования модулирующего сигнала. Если код на выходе какого-либо из 12 блоков совпал с кодом на выходе схемы квантования эталонного модулирующего напряжения, то это означает, что формируемая данным входным напряжением ступень совпадает с требуемой ступенью, полученной в результате квантования эталонного модулирующего напряжения. И, следовательно, к выходу преобразователя частоты необходимо подключить данное входное напряжение.

Поскольку заданный и идентифицированный коды ступеней представлены в виде четырехразрядного кода, то для поразрядного сравнения необходимо 4 логических элемента «эквивалентность».

Сигналы Q_0^M , Q_1^M , Q_2^M , Q_3^M это сигналы с выхода схемы квантования эталонного модулирующего напряжения (рисунок 3). Сигналы Q_0 , Q_1 , Q_2 , Q_3 это сигналы с выхода одного из блоков 2 или 4 (рисунок 4, 5). Если они совпадают, то на выходе блока сравнения 3 формируется логическая единица. Это означает, что к выходу преобразователя частоты необходимо подключить данную фазу, участок которой в данный момент времени формирует требуемую ступень. Всего таких блоков сравнения должно быть 12 по числу фаз входного напряжения.

Входное двенадцатифазное напряжение ($U_{BX1}(t)$, $U_{BX2}(t)$, ..., $U_{BX12}(t)$) подается на входы нуль-детекторов (компараторов) K блока синхронизации. Компараторы K настраиваются так, чтобы их выходные сигналы изменялись от 0 до 1 каждый раз когда знак их входных сигналов изменяется с отрицательного на положительный в окрестности точки пересечения нуля вольт, т.е. при пересечении какого-либо входного напряжения нуля. Образовавшаяся в момент пересечения входного сигнала с нулем единица с компаратора поступает в генератор импульсов ГИ. Генератор импульсов вырабатывает единичный импульс. Единичные импульсы с выходов ГИ, образованные пересечением входных напряжений нуля вольт, поступают на логический элемент ИЛИ (1) в результате чего образуется импульс U_C , фиксирующий переход через ноль какого-либо напряжения $U_{BX1}(t)$ - $U_{BX12}(t)$. Схема блока синхронизации (5) приведена на рисунке 1.

Результаты исследования

1. Разработана схема устройства формирования переключающих функций системы управления МПЧ с алгоритмом на основе амплитудной модуляции, состоящая из 6 идентичных блоков квантования и записи линейного напряжения и 6 идентичных блоков квантования и записи фазного напряжения, а также блока квантования модулирующего напряжения, блока синхронизации и 12 блоков сравнения.
2. Данное устройство позволяет получать на выходе МПЧ напряжение следующего качества [5]:
 - в области частот от 5,172 Гц и ниже коэффициент гармоник K_G не превышает 8%. Согласно ГОСТ 13109-97 нормально допустимое значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения при $U_{НОМ}=380В$ составляет 8%;
 - в области частот от 13,636 Гц до 5,357 Гц коэффициент гармоник K_G не превышает предельно допустимого значения 12% согласно ГОСТ 13109-97. Т.е. не требуется дополнительных средств (например, ШИМ) для улучшения выходного напряжения;
 - в области от 50 Гц до 15 Гц коэффициент гармоник K_G изменяется от 16,8% до 13,1%, что требует применение ШИМ для смещения гармоник в область высоких частот.
3. Структура, состоящая из отдельных идентичных блоков, позволяет упростить процесс производства, а также применять модульную технологию в изготовлении и обслуживании устройства и всей системы управления в целом.
4. Результаты сравнения качества выходного напряжения, получаемого с помощью амплитудной модуляции, с существующими способами модуляции [6, 7], приведены в таблице 1.

Значения коэффициента гармоник выходного напряжения

Вид модуляции	Значения коэффициента гармоник выходного напряжения		
	От 50 Гц до 15 Гц	От 13,636 Гц до 5,357 Гц	до 5,172 Гц
ШИМ	Принимает значения в пределах $64,9\% \geq K_G \geq 63,5\%$		
Прямое преобразование	Не менее 53,9% при 3-фазном входном напряжении		
	При 6-фазном напряжении K_G изменяется в пределах $31,8\% \geq K_G \geq 27,3\%$		
	При 9-фазном напряжении K_G изменяется в пределах $21,1\% \geq K_G \geq 16\%$		
	При 12-фазном напряжении K_G изменяется в пределах $15\% \geq K_G \geq 11,9\%$		
	При 18-фазном напряжении K_G изменяется в пределах $9,8\% \geq K_G \geq 7,9\%$		
Амплитудная модуляция	При 24-фазном напряжении K_G изменяется в пределах $7,3\% \geq K_G \geq 4,3\%$		
	Изменяется от 16,8% до 13,1%, что требует применение ШИМ для смещения гармоник в область высоких частот	Не превышает предельно допустимого значения 12% согласно ГОСТ 13109-97	Не превышает 8% согласно ГОСТ 13109-97

Заключение

В результате исследования удалось достичь получения качественного выходного напряжения МПЧ без изменения силовой схемы, а только за счет разработки устройства формирования переключающих функций системы управления, реализующего алгоритм амплитудной модуляции. Сравнение данного способа с другими, используемыми в преобразователях частоты, показал его преимущество по обеспечению качества выходного напряжения.

Список литературы

1. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Стандартинформ, 2006.
2. Джюджи Л., Пели Б. Силовые полупроводниковые преобразователи частоты: Теория, характеристики, применение. Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 400 с., ил.
3. Ланчин В.И., Савёлов Н.С. Электроника : учеб. пособие / В.И. Ланчин, Н.С. Савёлов. – Изд. 6-е, перераб. и доп. – Ростов н/Д : Феникс, 2007. – 703, [1] с. – (Высшее образование).

4. Пьяных Б.Е., Чехет Э.М., Михальский В.М., Мордач В.П., Соболев В.Н., Корольков К.М. Способ формирования выходного напряжения трехфазно-однофазного преобразователя частоты//Патент СССР № 1617572.1990. Бюл. № 48.
5. Федоров С.В., Бондарев А.В. Спектральный анализ выходного напряжения непосредственных преобразователей частоты, получаемого путем синтеза синусоиды участками двенадцатифазного входного напряжения. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014660563 от 10.10.2014 г.
6. Федоров С.В., Бондарев А.В. Спектральный анализ выходного напряжения непосредственных преобразователей частоты, получаемого с помощью метода прямого преобразования. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014660465 от 08.10.2014 г.
7. Федоров С.В., Бондарев А.В. Спектральный анализ выходного напряжения непосредственных преобразователей частоты, получаемого с помощью широтно-импульсной модуляции. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014660062 от 01.10.2014 г.

Рецензенты:

Фетисов В.С., д.т.н., профессор, профессор кафедры информационно-измерительной техники Уфимского государственного авиационного технического университета, г. Уфа;
Хайруллин И.Х., д.т.н., профессор, профессор кафедры электромеханики Уфимского государственного авиационного технического университета, г. Уфа.