

Научная статья

DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.07

УДК 621.341.572

**А.В. Саушев, И.В. Белоусов,
В.Ф. Самосейко, О.М. Толокнова**

Государственный университет морского и речного флота им. адмирала
С.О. Макарова, Санкт-Петербург, Российская Федерация

НЕПОЛНОФАЗНЫЕ АЛГОРИТМЫ ДВУХФАЗНОЙ ШИРОТНО-ИМПУЛЬСНОЙ МОДУЛЯЦИИ В СИСТЕМЕ «ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕГИИ – ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ»

Системы широтно-импульсной модуляции находят самое широкое применение в системах частотного управления электроприводами. Качество системы широтно-импульсной модуляции определяется различными показателями качества, среди которых можно выделить уровень пульсаций тока на периоде модуляции, дисперсию тока в нагрузке, динамические потери энергии в ключевых элементах преобразователя электрической энергии. Актуальным направлением является разработка неполнофазных алгоритмов системы широтно-импульсной модуляции, которые позволяют снизить динамические потери энергии в ключевых элементах, увеличить частоту модуляции и уменьшить дисперсию тока в нагрузке. **Цель работы:** рассмотрение возможных вариантов модуляции в системе «преобразователь электрической энергии – электродвигатель», оценка возможных алгоритмов модуляции неполнофазной системы широтно-импульсной модуляции двухфазного напряжения при частотном управлении электроприводами по критерию дисперсии тока в нагрузке при заданных потерях энергии в ключевых элементах. **Методы:** при решении поставленной задачи применялись методы теории электрических цепей и математического анализа. **Результаты:** установлено, что применение алгоритма однофазной модуляции двухполярного напряжения электронно-ключевой схемы двухфазной широтно-импульсной модуляции приводит к существенному увеличению дисперсии токов по сравнению с алгоритмом двухфазной модуляции. При увеличении частоты в алгоритме однофазной модуляции электронно-ключевой схемы двухфазной широтно-импульсной модуляции до значения, при котором динамические потери у сравниваемых алгоритмов одинаковы, данный алгоритм становится более предпочтительным. Получена область целесообразности использования однофазной модуляции электронно-ключевой схемы двухфазной широтно-импульсной модуляции при повышенной частоте модуляции в пространстве параметров коэффициента амплитуды модулирующей функции и относительной частоты модуляции. **Практическая значимость:** полученные результаты могут быть использованы при разработке алгоритмов управления преобразователями частоты в системах частотного управления электроприводов.

Ключевые слова: двухфазная широтно-импульсная модуляция, преобразователь электрической энергии – электродвигатель, неполнофазные алгоритмы, дисперсия тока нагрузки.

**A.V. Saushev, I.V. Belousov,
V.F. Samoseiko, O.M. Toloknova**

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

INCOMPLETE-PHASE ALGORITHMS OF TWO-PHASE PULSE WIDTH MODULATION IN THE ELECTRIC ENERGY CONVERTER – ELECTRIC MOTOR SYSTEM

Pulse width modulation systems are widely used in frequency control systems for electric drives. Pulse width modulation quality is determined by various quality indicators, among which one can distinguish the level of current pulsations during the modulation period, current dispersion in the load, dynamic energy losses in key elements of an electric energy converter. An urgent direction is the development of incomplete-phase pulse width modulation algorithms that reduce dynamic energy losses in key elements, increase the modulation frequency and reduce the current dispersion in the load. **Purpose** of the work: to consider possible modulation options in the electric energy converter – electric motor system, to evaluate possible algorithms for modulation of incomplete-phase pulse width modulation of two-phase voltage in frequency control of electric drives according to the criterion of current dispersion in the load at specified energy losses in key elements. **Methods:** methods of the theory of electrical circuits and mathematical analysis were used to solve the problem. **Results:** it is established that the application of the algorithm of single-phase modulation of bipolar voltage of the electronic key circuit of two-phase pulse width modulation leads to a significant increase in current dispersion compared with the algorithm of two-phase modulation. When the frequency in the single-phase modulation algorithm of the two-phase pulse width modulation electronic key circuit is increased to a value at which the dynamic losses of the compared algorithms are the same, this algorithm becomes more preferable. The field of expediency of using single-phase modulation of an electronic key circuit of a two-phase pulse width modulation with an increased modulation frequency in the parameter space of the amplitude coefficient of the modulating function and the relative frequency of modulation is obtained. **Practical significance:** the results obtained can be used in the development of algorithms for controlling frequency converters in frequency control systems of electric drives.

Keywords: two-phase pulse width modulation, electric energy converter – electric motor, incomplete-phase algorithms, load current dispersion.

Введение

Системы широтно-импульсной модуляции (ШИМ) находят самое широкое использование при синтезе разнообразных систем управления электроприводами. На транспорте и в промышленности основное применение находит асинхронный электропривод, для управления которым, как правило, используются системы частотного скалярного и векторного управления.

С момента появления преобразователей с ШИМ начались исследования по разработке способов и алгоритмов, обеспечивающих высокие показатели их качества [1–6]. Были синтезированы возможные

способы ШИМ [2, 3]. В настоящее время широкое применение находят так называемые классический и векторный способы модуляции [2]. Выполнено достаточно много исследований, посвященных сравнительной оценке возможных способов ШИМ [7–14]. Для анализа процессов, протекающих в преобразователях с ШИМ, использовались методы компьютерного и аналитического моделирования. Интересным представляется использование спектральных методов анализа в сочетании с получением аналитических моделей, позволяющих оценить качество ШИМ.

Анализ показал, что качество работы ШИМ во многом определяет свойства преобразователя электрической энергии. Важнейшим показателем качества ШИМ является степень приближения между идеальным графиком напряжения на выходе преобразователя и его импульсной аппроксимацией. Таким образом, при синтезе ШИМ важно стремиться к уменьшению пульсаций тока на нагрузке [15–20]. Важным параметром ШИМ является частота модуляции, которая имеет как нижний, так и верхний предел. При увеличении частоты следования импульсов выходное напряжение будет стремиться к синусоиде, но при этом потери в ключевых элементах будут возрастать. Возможная частота следования импульсов зависит также от мощности приводного электродвигателя. Следовательно, задача повышения качества ШИМ является многокритериальной и не может быть сведена только к выбору частоты коммутации ключевых элементов. Таким образом, повышение качества модуляции лишь за счет повышения частоты модуляции не дает желаемого эффекта и приводит к дополнительным потерям.

В работах [20–22] установлено, что основным критерием, определяющим качество модуляции, по которому следует сравнивать алгоритмы ШИМ, является дисперсия тока в нагрузке. При этом важнейшим показателем качества ШИМ является также число коммутаций ключей преобразователя частоты. Это обусловлено тем, что уменьшение числа коммутаций ключей на периоде модулирующей функции ведет к снижению динамических потерь энергии в электронных ключах. В работах [13, 17–20, 22–25] показано, что для минимизации числа коммутаций ключей преобразователя частоты целесообразно применение неполнофазных алгоритмов ШИМ (Н-ШИМ). Возможные алгоритмы Н-ШИМ достаточно подробно рассмотрены в работе [8].

Очевидно, что реализация любого алгоритма Н-ШИМ приведет к увеличению дисперсии тока, которая, как отмечалось, является критерием качества модуляции. Однако минимизация числа коммутаций, которая имеет место в Н-ШИМ, ведет к снижению динамических потерь энергии в ключах, что позволит увеличить частоту модуляции и, как следствие, уменьшить дисперсию тока.

Целью статьи является оценка алгоритмов модуляции Н-ШИМ двухфазного напряжения по величине дисперсии тока в нагрузке с учетом ограничений на потери электрической энергии в ключевых элементах преобразователя. Для решения этой задачи в статье сравниваются интегральные дисперсии тока, которые имеют место при реализации алгоритмов Н-ШИМ и полнофазной ШИМ (П-ШИМ).

Основное содержание статьи

Следуя работам [20–22, 26], будем полагать, что оптимальной будет являться такая ШИМ, которая минимизирует дисперсию тока нагрузки. При этом возможно применение полнофазных и неполнофазных алгоритмов ШИМ.

Неполнофазные алгоритмы Н-ШИМ предполагают, что модуляция осуществляется одним из полумостов. При этом второй полумост участвует лишь в смене полярности модулируемого напряжения. Известны два алгоритма модуляции: симметричный и несимметричный.

В случае использования несимметричного алгоритма ШИМ коммутируют ключевые элементы того полумоста, который не используется в модуляции напряжения. Очевидно, что в этом случае выделение тепловой энергии на ключевых элементах не будет одинаковым. Ключевые элементы полумоста, участвующие в модуляции, будут иметь большие динамические потери и, как следствие, больший износ.

При симметричном алгоритме ШИМ для равномерной загрузки ключей полумостов обычно чередуют работу полумостов модулирующего и переключающего полярность напряжения на нагрузке.

В работе рассматриваются алгоритмы, позволяющие получить модулированное напряжение между средними точками двух электронно-ключевых полумостов (рис. 1) при минимальном числе коммутаций ключей. Данная схема, а также используемая терминология, рассмотрены в работе [26].

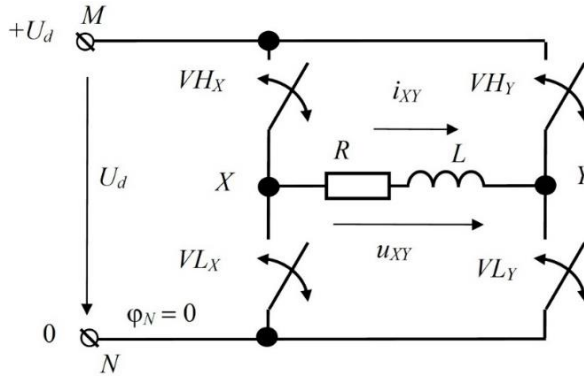


Рис. 1. Электронно-ключевая схема двухфазной ШИМ

При этом полагается, что функция модулирующего напряжения на нагрузке g_{xy} является периодической и изменяется по закону:

$$g_{xy} = a \sin(2\pi t / f^*), \quad (1)$$

где a – коэффициент амплитуды модулирующей функции, $a \in [0, 1]$; f^* – относительная частота модуляции, $f^* = T_1/T_0$; T_1 – период модулирующей функции; T_0 – период ШИМ, $\tau = t/T_0$ – относительное время.

Таким образом, задача синтеза алгоритма управления сводится к получению заданного модулированного напряжения при минимальном числе коммутаций ключей полумостов X и Y . Минимизация коммутаций ключей преследует цель снижения динамических потерь мощности в ключах моста. Снижение мощности в ключах позволяет поднять частоту коммутаций и повысить качество модуляции напряжения и тока в R, L -нагрузке.

Основной целью работы является количественное сравнение качества оптимальной П-ШИМ и Н-ШИМ по критерию дисперсии тока электронно-ключевой схемы двухфазной модуляции при учете потерь в ключевых элементах.

Будем полагать, что задано межфазное модулирующее напряжение на нагрузке, и, следовательно, известна его модулирующая функция. Модулирующие функции полумостов X и Y связаны с модулирующей функцией напряжения соотношением $g_{xy} = \gamma_x - \gamma_y$, где $\gamma_x - \gamma_y$ – модулирующие функции потенциалов полумостов. Модулирующие функции потенциалов ключей полумостов определены соотношениями

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_A = \gamma_0 + g_A = (1 + g_{AB})/2 - g_0 \\ \gamma_B = \gamma_0 + g_B = (1 - g_{AB})/2 - g_0 \end{array} \right\}, \quad (2)$$

где g_0 – функция предмодуляции, $g_0 = 1/2 - \gamma_x$; g_A, g_B – фазные модулирующие функции напряжения моста, $g_A = g_{AB}/2$; $g_B = -g_{AB}/2$; g_{AB} – моделирующая функция межфазного напряжения.

Заметим, что одна из модулирующих функций γ_X или γ_Y может быть задана равной нулю или единицы, а другая функция при этом будет формироваться таким образом, чтобы обеспечить требуемую величину модулирующей функции линейного напряжения g_{XY} путем однофазной модуляции. Таким образом, в мостовой электронно-ключевой схеме возможны четыре варианта модуляции – два варианта модуляции положительной модулирующей функции напряжения g_{XY} и два – отрицательной.

Несимметричный алгоритм с пассивной фазой X

Вариант 1. Модуляция напряжения положительной полярности фазой Y.

Если требуется сформировать модулированное напряжение на R, L -нагрузке положительной полярности ($g_{XY} > 0$), то можно считать, что $\gamma_X = 1$. Из полученного выражения следует, что коммутационная функция $\chi = 1$ и верхний ключ VH_X включен (см. рис. 1). Коммутация ключей полумоста Y позволяет получить модулированное напряжение на R, L -нагрузке положительной полярности без коммутации ключей полумоста X. В данном варианте работы ключей уменьшаются коммутационные потери в ключах полумоста X. Ключ VL_X при этом не работает. Функцию предмодуляции можно представить в виде следующего выражения:

$$g_0 = -1/2 + g_{XY}/2. \quad (3)$$

Вариант 2. Модуляция напряжения отрицательной полярности фазой Y (пассивная фаза X).

В этом случае модулированное напряжение на R, L -нагрузке отрицательной полярности ($g_{XY} < 0$) можно сформировать, если положить, что моделирующая функции потенциалов ключей полумостов $\gamma_X = 0$ и $\gamma_Y = -g_{XY}$. Из данных равенств следует, что коммутирующая функция полумоста X будет равна нулю, $\chi_X = 0$ и верхний ключ VH_X

выключен. Коммутации ключей полумоста Y позволяет получить модулированное напряжение на R, L -нагрузке отрицательной полярности без коммутации ключей полумоста X . В данном варианте работы ключей уменьшаются коммутационные потери в ключе VL_X . При этом ключ VH_X не работает. Функция предмодуляции в этом режиме модуляции имеет вид:

$$g_0 = 1/2 + g_{XY}/2. \quad (4)$$

При несимметричном алгоритме с пассивной фазой X функция предмодуляции будет иметь вид:

$$g_0^X = -\frac{1}{2} \text{sign}(g_{XY}) + \frac{g_{XY}}{2}. \quad (5)$$

Несимметричный алгоритм с пассивной фазой Y

Вариант 1. Модуляция напряжения положительной полярности фазой X .

Модулированное напряжение на R, L -нагрузке положительной полярности ($g_{XY} > 0$) можно сформировать аналогично рассмотренному выше варианту, если считать, что моделирующие функции потенциалов ключей полумостов определяются выражениями $\gamma_X = g_{XY}$ и $\gamma_Y = 0$. Тогда коммутирующая функция полумоста Y будет равна нулю, $\chi_Y = 0$. В этом случае нижний ключ VH_B включен, а модуляция осуществляется ключами полумоста X без коммутации ключей полумоста Y (см. рис. 1). Моделирующие функции потенциалов ключей полумостов: $\gamma_X = g_{XY}$ и $\gamma_B = 0$. В данном варианте работы ключей уменьшаются коммутационные потери в ключе VL_Y . Ключ VH_Y при этом не работает. Функция предмодуляции в данном режиме модуляции имеет вид:

$$g_0 = 1/2 - g_{XY}/2. \quad (6)$$

Вариант 2. Модуляция напряжения отрицательной полярности фазой X .

Модулированное напряжение на R, L -нагрузке отрицательной полярности ($g_{XY} < 0$) можно сформировать, если положить, что моделирующие функции потенциалов ключей полумостов (см. рис. 1) будут определяться выражениями $\gamma_X = 0$ и $\gamma_B = -g_{XY}$. Из данных равенств

следует, что $\chi_X = 0$ и верхний ключ VH_X выключен. Коммутации ключей полумоста Y позволяют получить модулированное напряжение на R, L -нагрузке отрицательной полярности без коммутации ключей полумоста X . В данном варианте работы ключей уменьшаются коммутационные потери в ключе VL_X . Ключ VH_X в данном случае не работает, функция предмодуляции определяется выражением:

$$g_0 = 1/2 + g_{XY}/2. \quad (7)$$

При несимметричном алгоритме с пассивной фазой Y функция предмодуляции будет иметь вид:

$$g_0^Y = \frac{1}{2} + \frac{g_{XY}}{2} \cdot \text{sign}(g_{XY}). \quad (8)$$

Симметричный алгоритм управления полумостами

Данный алгоритм предполагает чередование двух несимметричных алгоритмов, что ведет к равномерному распределению потерь мощности в электронных ключах. Для формального описания симметричного алгоритма управления введем модулирующие функции:

$$g_{XY} = a \sin(2\pi\tau/f^*); \quad g_{XY2} = a \sin\left(\frac{\pi\tau}{f^*}\right). \quad (9)$$

С помощью данных функций сформируем булевы переменные для четырех вариантов однофазной модуляции мостовой схемы (рис. 2):

$$\begin{aligned} x_1 &= 1(g_{XY}) \cdot 1(g_{XY2}); & x_2 &= (1 - 1(g_{XY})) \cdot 1(g_{XY2}); \\ x_3 &= 1(g_{XY}) \cdot (1 - 1(g_{XY2})); & x_4 &= (1 - 1(g_{XY})) \cdot (1 - 1(g_{XY2})). \end{aligned} \quad (10)$$

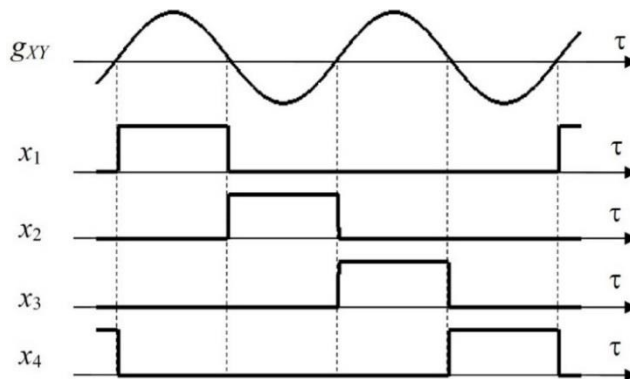


Рис. 2. Булевы переменные для четырех вариантов однополярной модуляции мостовой схемы

Функция предмодуляции запишется в следующем виде:

$$g_0 = \frac{1}{2}(x_2 + x_3 + x_1 + x_4) + \frac{g_{XY}}{2}(x_1 + x_4 + x_2 + x_3). \quad (11)$$

Определим модулирующие переменные полумостов X и Y :

$$\left\{ \begin{array}{l} \gamma_X = (1 + g_{XY})/2 - g_0 = x_1 + x_2 \cdot (1 + g_{XY}) + x_3 \cdot g_{XY} \\ \gamma_Y = (1 - g_{XY})/2 - g_0 = x_1 \cdot (1 - g_{XY}) + x_2 - x_4 \cdot g_{XY} \end{array} \right\}. \quad (12)$$

Коммутационные функции полумоста $Z = X, Y$, позволяющие реализовать алгоритм с минимальным числом их коммутаций, запишутся в следующем виде:

$$\chi_Z = 1 \left(\phi - \frac{1 - \gamma_Z}{2} + \Delta\alpha_Z \right) \cdot 1 \left(\frac{1 + \gamma_Z}{2} + \Delta\alpha_Z - \phi \right), \quad (13)$$

где $\Delta\alpha_Z$ – коэффициент смещения импульса относительно середины интервала ШИМ, которому соответствует минимум дисперсии тока при однофазной модуляции; ϕ – относительное время на интервале модуляции, $\phi \in [0, 1]$.

В том случае, если приращение моделирующей функции $\Delta\gamma_X$ достаточно большое, то минимум локальной дисперсии тока достигается при следующем условии [21]:

$$\Delta\alpha_X = \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{\gamma_X^2}{12} + \frac{\gamma_X^2}{\Delta\gamma_X^2} - \frac{\gamma_X}{\Delta\gamma_X}}. \quad (14)$$

В более простом виде, используя разложение функции $\Delta\alpha_X$ в ряд Тейлора в окрестности $\gamma_X = 1/2$ и $\Delta\gamma_X = 0$ с точностью до двух слагаемых минимум дисперсии тока будет при значении $\Delta\alpha_X \approx 0,23\Delta\gamma_X$.

Сравнение вариантов П-ШИМ и Н-ШИМ в электронно-ключевой схеме двухфазной модуляции

В работе [26] описан алгоритм оптимальной П-ШИМ по критерию дисперсии тока, в котором число коммутаций полумостов на периоде модулирующей функции определяется выражением: $N = 2f^*$. Дисперсия тока в режиме однофазной модуляции при Н-ШИМ получена в работе [21]. Число коммутаций полумостов на периоде модулирующей функции при Н-ШИМ определяется выражением $N = f^* + 2$.

Сравнение этих вариантов управления двухфазным мостом может быть выполнено по интегральной дисперсии тока в нагрузке. Интегральная дисперсия тока $ED_{XY}(a, f^*, \Delta\alpha_{XY})$ в алгоритме оптимальной двухфазной синусоидальной модуляции по критерию дисперсии тока определяется выражением:

$$ED_{XY}(a, f^*, \Delta\alpha_{XY}) = \frac{4}{f^*} \cdot \int_0^{f^*/4} D(g_0) dt \approx \frac{a^2 \varepsilon^2}{96} \left(1 - \frac{16a}{3\pi} + \frac{3a^2}{4} + \frac{1-a^2}{f^{*2}} \right), \quad (15)$$

где ε – характеристика фильтрующих свойств электрической машины, $\varepsilon = T_0/T$; $\Delta\alpha_{XY}$ – коэффициент смещения импульсов относительно центра интервала модуляции. Этот коэффициент, при котором дисперсия имеет минимальную величину, может быть вычислен по формуле:

$$\Delta\alpha_{XY} = \frac{(11 - 3g_{XY}^2)\Delta g_{XY}}{48(1 + (1 - g_{XY})^2)}. \quad (16)$$

Интегральная дисперсия тока $ED_X(a, f^*, \Delta\alpha_{XY})$ при использовании алгоритма однофазной модуляции двухполярного напряжения электронно-ключевой схемы двухфазной модуляции имеет следующий вид [21–25]:

$$ED_X(a, f^*, \Delta\alpha'_X) \approx \frac{\varepsilon^2}{512} \left(a^4 + \frac{8}{3}(1-a^2) - \frac{6a^2}{f^{*2}} \right). \quad (17)$$

Анализ показал, что точность данной формулы при $f^* > 10$ более 99 %.

Эффективность однофазной модуляции двухполярного напряжения электронно-ключевой схемы двухфазной ШИМ можно оценить по величине отношения:

$$Z(a, f^*) = \frac{ED_{XY}(a, f^*, \Delta\alpha_{XY})}{ED_X(a, f^*, \Delta\alpha_X)}. \quad (18)$$

При $f^* \rightarrow \infty$ и коэффициенте амплитуды $a = 1$ коэффициент эффективности $Z(a, f^*)$ однофазной модуляции двухполярного напряжения электронно-ключевой схемы двухфазной ШИМ по сравнению с двухфазной модуляцией максимален и имеет значение: $Z(0,8, \infty) = 0,304$. График коэффициента эффективности однофазной модуляции двухполярного напряжения электронно-ключевой схемы двухфазной ШИМ в сравнении с двухфазной модуляцией приведен на рис. 3.

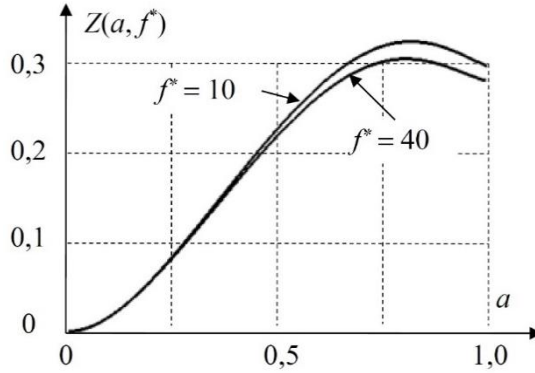


Рис. 3. График зависимости коэффициента эффективности однофазной ШИМ двухполярного напряжения электронно-ключевой схемы двухфазной модуляции в сравнении с двухфазной ШИМ

Из рис. 3 следует, что оптимальная двухфазная модуляция позволяет получить существенно более качественный ток в нагрузке по критерию его дисперсии.

Применение однофазной модуляции электронно-ключевой схемы двухфазной ШИМ позволяет снизить тепловые потери в электронных ключах в k раз:

$$k = 2f^*/(f^* + 2). \quad (19)$$

Следовательно, для уменьшения дисперсии токов при однофазной модуляции электронно-ключевой схемы двухфазной ШИМ относительную частоту модуляции f^* можно поднять в k раз и использовать частоту модуляции:

$$f^{**} = kf^* = 2(f^*)^2/(f^* + 2). \quad (20)$$

В этом случае коэффициент эффективности однофазной модуляции двухполярного напряжения электронно-ключевой схемы двухфазной ШИМ можно оценить по величине отношения:

$$Z(a, f^*) = \frac{k^2 \cdot ED_{XY}(a, f^*, \Delta\alpha_{XY})}{ED_X(a, f^*, \Delta\alpha_X)}. \quad (21)$$

В данном выражении коэффициента эффективности множитель k^2 появился с учетом соотношения характеристики фильтрующих свойств нагрузки ε , которая определяется следующей формулой:

$$\varepsilon = \frac{T_0}{T} = \frac{2\pi}{T^* \cdot f^* \cdot a}, \quad (22)$$

где T^* – относительная постоянная времени нагрузки, определяющая фильтрующие свойства нагрузки и не связанная с управлением ШИМ.

При возрастании частоты модуляции ε уменьшается в k раз.

Границу области целесообразной модуляции с минимальным числом коммутаций на плоскости $\{a, f^*\}$ можно найти из следующего равенства:

$$\frac{4f^* \cdot ED_{XY}(a, f^*, \Delta\alpha'_{XY})}{(f^* + 2)^2 \cdot ED_X(a, f^{**}, \Delta\alpha'_{XY})} = 1. \quad (24)$$

Область целесообразности использования однофазной модуляции электронно-ключевой схемы двухфазной ШИМ при повышенной частоте модуляции f^{**} на плоскости $\{a, f^*\}$ приведена на рис. 4. В точке $\{0,8, 50\}$ максимальное значение коэффициента эффективности $Z(0,8, 50) = 1,13$. Из рисунка следует, что область целесообразности использования однофазной модуляции электронно-ключевой схемы двухфазной ШИМ при повышенной частоте модуляции f^{**} достаточно мала. При относительной частоте модуляции $f^* < 18$ применение однофазной модуляции электронно-ключевой схемы двухфазной ШИМ неэффективно при любом значении коэффициента амплитуды.

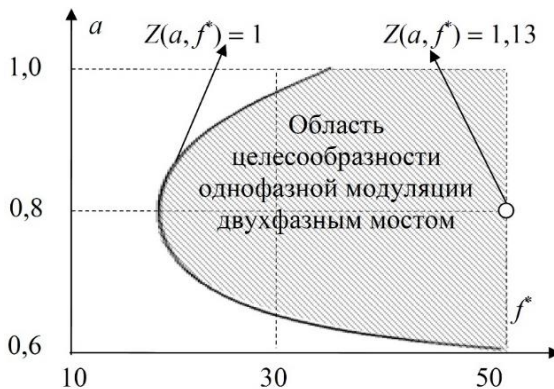


Рис. 4. Область целесообразности применения однофазной модуляции электронно-ключевой схемы двухфазной ШИМ при повышенной частоте модуляции f^{**}

Заключение

В двухфазной мостовой электронно-ключевой схеме возможны четыре варианта модуляции – два варианта модуляции положительной модулирующей функции напряжения g_{XY} и два – отрицательной.

Сравнение вариантов управления электронно-ключевой схемы двухфазной модуляции при П-ШИМ и Н-ШИМ может быть выполнено по интегральной дисперсии тока в нагрузке.

Анализ показал, что при использовании алгоритма оптимальной однофазной Н-ШИМ двухполярного напряжения электронно-ключевой схемы двухфазной модуляции дисперсия тока в нагрузке в 3,58 раза больше, чем при использовании алгоритма двухфазной П-ШИМ. Если повысить частоту модуляции в алгоритме однофазной модуляции электронно-ключевой схемы двухфазной ШИМ до значения, при котором потери электрической энергии в ключевых элементах преобразователя у обоих алгоритмов будут равны, то при относительной частоте модуляции $f^* > 18$ и коэффициенте амплитуды $a > 0,6$ по критерию дисперсии тока более эффективным будет алгоритм однофазной модуляции. При этом выигрыш в дисперсии тока незначительный. Получена область целесообразности использования однофазной Н-ШИМ электронно-ключевой схемы двухфазной модуляции при повышенной частоте модуляции в пространстве параметров коэффициента амплитуды модулирующей функции и относительной частоты модуляции.

Библиографический список

1. Holtz, J. Optimal control of a dual three-level inverter system for medium-voltage drives / J. Holtz, N. Oikonomou // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2010. – Vol. 46, № 3. – P. 1034–1041.
2. Holmes, D.G. Pulse width modulation for power converters: Principles and Practice / D.G. Holmes, T.A. Lipo. – New-York: Wiley-IEEE Press, 2003. – 734 p.
3. Trzynadlowski, A.M. Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate / A.M. Trzynadlowski, R.L. Kirlin, S.F. Legowski // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 1997. – Vol. 44, № 2. – P. 173–181.
4. Boller, T. Optimal pulsewidth modulation of a dual three-level inverter system operated from a single DC / T. Boller, J. Holtz, A.K. Rathore // IEEE Energy Conversion Congress and Exposition – ECCE, 2011. – P. 3406–3410.
5. Халас, Ш. Оптимизация управления инверторами напряжения в асинхронном электроприводе / Ш. Халас // Электричество. – 1993. – № 1. – С. 43–48.

6. Чаплыгин, Е.Е. Двухфазная широтно-импульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения / Е.Е. Чаплыгин // *Электричество*. – 2009. – № 8. – С. 56–61.

7. Обухов, С.Г. Широтноимпульсная модуляция в трехфазных инверторах напряжения / С.Г. Обухов, Е.Е. Чаплыгин, Д.Е. Кондратьев // *Электричество*. – 2008. – № 8. – С. 23–31.

8. Чаплыгин, Е.Е. Широтно-импульсная модуляция с пассивной фазой в трехфазных инверторах напряжения / Е.Е. Чаплыгин, С.В. Хухтиков // *Электричество*. – 2011. – № 5. – С. 53–61.

9. Сравнительный анализ энергетических показателей алгоритмов управления высоковольтным многоуровневым преобразователем / А.Б. Виноградов, А.Н. Сибирцев, А.А. Коротков, Д.А. Монов // *Труды VII Междунар. (XVIII Всерос.) конф. по автоматизир. электроприводе (АЭП-2012)*. – Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2012. – С. 109–113.

10. Андриянов, А.И. Сравнительная характеристика различных видов ШИМ по топологии областей существования периодических режимов / А.И. Андриянов, Г.Я. Михальченко // *Электричество*. – 2004. – № 12. – С. 46–54.

11. Баховцев, И.А. Сравнительный анализ выходного напряжения АИН с синусоидальной и векторной ШИМ / И.А. Баховцев // *Техническая электродинамика. Темат. вып. СЭЭ*. – Киев, 2008. – Ч. 3. – С. 63–66.

12. Баховцев, И.А. Обобщенный анализ выходной энергии многофазных многоуровневых инверторов напряжения с широтно-импульсной модуляцией / И.А. Баховцев, Г.С. Зиновьев // *Электричество*. – 2016. – № 4. – С. 26–33.

13. Гуськов, В.О. Сравнительный анализ математических описаний и методов широтно-импульсной модуляции / В.О. Гуськов, А.В. Лавин // *Вестник Астрахан. гос. техн. ун-та. Сер. Морская техника и технология*. – 2023. – № 3. – С. 74–81. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-3-74-81

14. McGrath, B.P. An analytical technique for the determination of spectral components of multilevel carrier-based PWM methods / B.P. McGrath, D.G. Holmes // *IEEE Trans. Ind. Electron.* – 2002. – Vol. 49, № 4. – P. 847–857.

15. Madhavi, R. Investigation of various space vector PWM techniques for inverter / R. Madhavi, C. Harinath // *International Journal of Engineering Research and Management (IJERM)*. – 2014. – Vol. 1, no. 7. – P. 162–165.

16. Samoseiko, V.F. Optimal pulse-width modulation with three bridges on criterion of power losses at load / V.F. Samoseiko, I.V. Belousov, A.V. Saushev // International Russian Industrial Engineering, ICIE, 2019. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM); Sochi, 25–29 March 2019. – Sochi, 2019. – P. 8743011. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743011

17. Hava, A.M. A generalized scalar PWM approach with easy implementation features for three-phase, three-wire voltage-source inverters / A.M. Hava, N.O. Çetin // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2011. – Vol. 26, no. 5. – P. 1385–1395. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2081689

18. Трехфазная синусоидальная модифицированная широтно-импульсная модуляция первого рода в автономных инверторах / Б.Ф. Дмитриев, С.Я. Галушин, А.М. Лихоманов, А.Ю. Розов // Морской вестник. – 2017. – Т. 61, № 1. – С. 69–72.

19. Mao, X. Optimal variable switching frequency scheme for reducing switching loss in single-phase inverters based on time-domain ripple analysis / X. Mao, R. Аyyanar, Н.К. Krishnamurthy // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – Vol. 24, no. 4. – P. 991–1001. DOI: 10.1109/TPEL.2008.2009635

20. Белоусов, И.В. Оптимальная широтно-импульсная модуляция в системе управления электроприводом / И.В. Белоусов, В.Ф. Самосейко, А.В. Саушев // Вестник Гос. ун-та морского и речного флота им. адм. С.О. Макарова. – 2022. – № 3 (14). – С. 463–471. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-463-471

21. Samoseiko, V.F. Optimized single-phase pulse-width modulation / V.F. Samoseiko, I.V. Belousov., A.V. Saushev // International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – 2018. – № 8501699. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501699

22. Belousov, I.V. Optimal double-halfbridge pulse width modulation by current-dispersion criterion / I.V. Belousov, V.F. Samoseiko, A.V. Saushev // 26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives, IWED 2019; Moscow, 30 January – 02 February 2019. – Moscow, 2019. – P. 8664344.

23. Tan, G. An optimized SVPWM strategy for five-level active NPC (5L-ANPC) converter / G. Tan, Q. Deng, Z. Liu // IEEE Transactions on power electronics. – 2013. – Vol. 29, no. 1. – P. 386–395. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2248172

24. Belousov, I.V. Assessment of filtering properties of asynchronous electric drive with pulse width modulation / I.V. Belousov, V.F. Samoseiko, A.V. Saushev // XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry “State and Prospects for the Development of Agribusiness INTERAGROMASH 2022”; Rostov-on-Don, 25–27 May 2022. – Rostov-on-Don, 2022. – Vol. 363. – P. 01025. DOI: 10.1051/e3sconf/202236301025

25. Белоусов, И.В. Оптимальная двухфазная широтно-импульсная модуляция / И.В. Белоусов, В.Ф. Самосейко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 4 (28). – С. 32–49.

References

1. Holtz J., Oikonomou N. Optimal control of a dual three-level inverter system for medium-voltage drives. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2010, vol. 46, no. 3, pp. 1034-1041.

2. Holmes D.G., Holmes D.G., Lipo T.A. Pulse width modulation for power converters: Principles and Practice. New-York: Wiley-IEEE Press, 2003, 734 p.

3. Trzynadlowski A.M., Kirlin R.L., Legowski S.F. Space vector PWM technique with minimum switching losses and a variable pulse rate. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 1997, vol. 44, no. 2, pp. 173-181.

4. Boller T., Holtz J., Rathore A.K. Optimal pulsewidth modulation of a dual three-level inverter system operated from a single DC. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition - ECCE*, 2011, pp. 3406-3410.

5. Khalas Sh. Optimizatsiia upravleniia invertorami napriazheniia v asinkhronnom elektroprivode [Optimization of voltage inverters control in an asynchronous electric drive]. *Elektrichestvo*, 1993, no. 1, pp. 43-48.

6. Chaplygin E.E. Dvukhfaznaia shirotno-impul'snaia moduliatsiia v trekhfaznykh invertorakh napriazheniia [Two-phase pulse width modulation in three-phase voltage inverters]. *Elektrichestvo*, 2009, no. 8, pp. 56-61.

7. Obukhov S.G., Chaplygin E.E., Kondrat'ev D.E. Shirotnoimpul'snaia moduliatsiia v trekhfaznykh invertorakh napriazheniia [Pulse width modulation in three-phase voltage inverters]. *Elektrichestvo*, 2008, no. 8, pp. 23-31.

8. Chaplygin E.E., Khukhtikov S.V. Shirotno-impul'snaia moduliatsiia s passivnoi fazoi v trekhfaznykh invertorakh napriazheniia [Pulse width modulation with passive phase in three-phase voltage inverters]. *Elektrichestvo*, 2011, no. 5, pp. 53-61.

9. Vinogradov A.B., Sibirtsev A.N., Korotkov A.A., Monov D.A. Sravnitel'nyi analiz energeticheskikh pokazatelei algoritmov upravleniia vysokovol'tnym mnogourovnevym preobrazovatelem [Comparative analysis of energy parameters of control algorithms for high-voltage multilevel converter]. *Trudy VII Mezhdunarodnoi (XVIII Vserossiiskoi) konferentsii po avtomatizirovannomu elektroprivodu (AEP-2012)*. Ivanovo: Ivanovskii gosudarstvennyi energeticheskii universitet, 2012, pp. 109-113.

10. Andriianov A.I., Mikhal'chenko G.Ia. Sravnitel'naia kharakteristika razlichnykh vidov ShIM po topologii oblastei sushchestvovaniia periodicheskikh rezhimov [Comparative characteristics of different types of PWM in the topology of the regions of existence of periodic regimes]. *Elektrichestvo*, 2004, no. 12, pp. 46-54.

11. Bakhovtsev I.A. Sravnitel'nyi analiz vykhodnogo napriazheniia AIN s sinusodal'noi i vektornoii ShIM [Comparative analysis of the output voltage of the AIN with sinusodal and vector PWM]. *Tekhnicheskaiia elektrodinamika. Tematicheskii vypusk SEE*. Kiev, 2008, part 3, pp. 63-66.

12. Bakhovtsev I.A., Zinov'ev G.S. Obobshchennyi analiz vykhodnoi energii mnogofaznykh mnogourovnevnykh invertorov napriazheniia s shirotno-impul'snoi moduliatsiei [Generalized analysis of the output energy of multiphase multilevel voltage inverters with pulse-width modulation]. *Elektrichestvo*, 2016, no. 4, pp. 26-33.

13. Gus'kov V.O., Lavin A.V. Sravnitel'nyi analiz matematicheskikh opisaniia i metodov shirotno-impul'snoi moduliatsii [Comparative analysis of mathematical descriptions and pulse width modulation methods]. *Vestnik Astrakhanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Morskaiia tekhnika i tekhnologiia*, 2023, no. 3, pp. 74-81. DOI: 10.24143/2073-1574-2023-3-74-81

14. McGrath B.P., Holmes D.G. An analytical technique for the determination of spectral components of multilevel carrier-based PWM methods. *IEEE Trans. Ind. Electron*, 2002, vol. 49, no. 4, pp. 847-857.

15. Madhavi R., Harinath C. Investigation of various space vector PWM techniques for inverter. *International Journal of Engineering Research and Management (IJERM)*, 2014, vol. 1, no. 7, pp. 162-165.

16. Samoseiko V.F., Belousov I.V., Saushev A.V. Optimal pulse-width modulation with three bridges on criterion of power losses at load. *International Russian Industrial Engineering, ICIE, 2019. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing ICIEAM, Sochi, 25-29 March 2019. Sochi, 2019, 8743011 p. DOI: 10.1109/ICIEAM.2019.8743011*

17. Hava A.M., Çetin N.O. A generalized scalar PWM approach with easy implementation features for three-phase, three-wire voltage-source inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2010, vol. 26, no. 5, pp. 138-1395. DOI: 10.1109/TPEL.2010.2081689

18. Dmitriev B.F., Galushin S.Ia., Likhomanov A.M., Rozov A.Iu. Trekhfaznaia sinusoidal'naia modifitsirovannaia shirotno-impul'snaia moduliatsiia pervogo roda v avtonomnykh invertorakh [Three-phase sinusoidal modified pulse width modulation of the first kind in autonomous inverters]. *Morskoi vestnik*, 2017, vol. 61, no. 1, pp. 69-72.

19. Mao X., Ayyanar R., Krishnamurthy H.K. Optimal variable switching frequency scheme for reducing switching loss in single-phase inverters based on time-domain ripple analysis. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, vol. 24, no. 4, pp. 991-1001. DOI: 10.1109/TPEL.2008.2009635

20. Belousov I.V., Samoseiko V.F., Saushev A.V. Optimal'naia shirotno-impul'snaia moduliatsiia v sisteme upravleniia elektroprivodom [Optimal pulse width modulation in the electric drive control system]. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2022, no. 3 (14), pp. 463-471. DOI: 10.21821/2309-5180-2022-14-3-463-471

21. Samoseiko V.F., Belousov I.V., Saushev A.V. Optimized single-phase pulse-width modulation. *International Russian Automation Conference (RusAutoCon)*, 2018, no. 8501699. DOI: 10.1109/RUSAUTOCON.2018.8501699

22. Belousov I.V., Samoseiko V.F., Saushev A.V. Optimal double-halfbridge pulse width modulation by current-dispersion criterion. *26th International Workshop on Electric Drives: Improvement in Efficiency of Electric Drives, IWED 2019, Moscow, 30 January - 02 February 2019. Moscow, 2019, 8664344 p.*

23. Tan G., Deng Q., Liu Z. An optimized SVPWM strategy for five-level active NPC (5L-ANPC) converter. *IEEE Transactions on power electronics*, 2013, vol. 29, no. 1, pp. 386-395. DOI: 10.1109/TPEL.2013.2248172

24. Belousov I.V., Samoseiko V.F., Saushev A.V. Assessment of filtering properties of asynchronous electric drive with pulse width modulation. *XV International Scientific Conference on Precision Agriculture and Agricultural Machinery Industry "State and Prospects for the Development of Agribusiness INTERAGROMASH 2022"*, Rostov-on-Don, 25-27 May 2022. Rostov-on-Don, 2022, vol. 363, 01025 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202236301025

25. Belousov I.V., Samoseiko V.F. Optimal'naiia dvukhfaznaia shirotno-impul'snaia moduliatsiia [Optimal two-phase pulse width modulation]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2018, no. 4 (28), pp. 32-49.

Сведения об авторах

Саушев Александр Васильевич (Санкт-Петербург, Российская Федерация) – доктор технических наук, заведующий кафедрой «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: saushev@bk.ru).

Белоусов Игорь Владимирович (Санкт-Петербург, Российская Федерация) – доцент кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: igor5.spb@yandex.ru).

Самосейко Вениамин Францевич (Санкт-Петербург, Российская Федерация) – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: samoseyko@mail.ru).

Толокнова Ольга Михайловна (Санкт-Петербург, Российская Федерация) – старший преподаватель кафедры «Электропривод и электрооборудование береговых установок» Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова (198035, Санкт-Петербург, ул. Двинская, 5/7, e-mail: olga_toloknova@mail.ru).

About the authors

Alexander V. Saushev (Saint Petersburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department "Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations" of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet (198035, St. Petersburg, Dvinskaya str., 5/7, e-mail: saushev@bk.ru).

Igor V. Belousov (Saint Petersburg, Russian Federation) – Associate Professor of the Department of "Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations" of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet (198035, St. Petersburg, Dvinskaya str., 5/7, e-mail: igor5.spb@yandex.ru).

Veniamin F. Samoseiko (Saint Petersburg, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations of the Admiral S.O. Makarov State University of Marine and River Fleet (198035, St. Petersburg, Dvinskaya str., 5/7, e-mail: samoseyko@mail.ru).

Olga M. Toloknova (Saint Petersburg, Russian Federation) – Senior Lecturer at the Department of Electric Drive and Electrical Equipment of Coastal Installations of the Admiral S.O. Makarov State University of the Marine and River Fleet (198035, St. Petersburg, Dvinskaya str., 5/7, e-mail: ol-ga_toloknova@mail.ru).

Поступила: 24.05.2024. Одобрена: 29.05.2024. Принята к публикации: 08.07.2024.

Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов по отношению к статье.

Вклад авторов. Авторы сделали равноценный вклад в подготовку статьи.

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом:
Неполнофазные алгоритмы двухфазной широтно-импульсной модуляции в системе «преобразователь электрической энергии – электродвигатель» / А.В. Саушев, И.В. Белоусов, В.Ф. Самосейко, О.М. Толокнова // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2024. – № 50. – С. 126–145. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.07

Please cite this article in English as:

Saushev A.V., Belousov I.V., Samoseiko V.F., Toloknova O.M. Incomplete-phase algorithms of two-phase pulse width modulation in the electric energy converter - electric motor system. *Perm National Research Polytechnic University Bulletin. Electrotechnics, information technologies, control systems*, 2024, no. 50, pp. 126-145. DOI: 10.15593/2224-9397/2024.2.07