

Рис. 7. Зависимость между количеством витковых замыканий обмотки якоря генератора ГСР-СТ-12/40Д и значением минимума огибающей результирующего балансно-модулированного колебания

## ВЫВОД

Таким образом, сущность диагностирования обмотки якоря заключается в формировании фазоманипулированного испытательного сигнала и выделении из выходного сигнала двух гармонических составляющих, первая из которых соответствует по частоте верхней, а вторая – нижней границам разброса значений первых максимумов амплитудно-частотной характеристики исправной обмотки электрической машины. Результатом сложения этих спектральных составляющих является балансно-модулированное колебание с низкочастотной периодической огибающей, параметры которой чувствительны к дефектам изоляции обмотки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. З о н т о в, А. В. Системы электроснабжения летательных аппаратов / А. В. Зонтов. – М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1986. – 420 с.
2. Г е м к е, Р. Г. Неисправности электрических машин / Р. Г. Гемке. – Л.: Энергия, 1969. – 272 с.
3. Ж е р в е, Г. К. Промышленные испытания электрических машин / Г. К. Жерве. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 504 с.
4. Р а д и о т е х н и ч е с к и е цепи и сигналы: учеб. пособие для вузов / К. А. Самойло [и др.]. – М.: Радио и связь, 1982. – 528 с.
5. Г о н о р о в с к и й, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. – М.: Дрофа, 2006. – 719 с.

Представлена кафедрой  
авиационной техники  
и вооружения

Поступила 17.05.2012

УДК 621.311.7:621.382

## СИНТЕЗ НАПРЯЖЕНИЙ МНОГОКРАТНЫХ ШИМ, СОЗДАННЫХ ПО ТРАПЕЦЕИДАЛЬНОЙ И СИНУСОИДАЛЬНОЙ ФУНКЦИЯМ ПОСТРОЕНИЯ

Канд. техн. наук, доц. СТРИЖНЕВ А. Г., инж. РУСАКОВИЧ А. Н.

НПООО «ОКБ ТСП»

Для управления электроприводом, содержащим электродвигатель переменного тока, используют частотные преобразователи, которые формируют напряжения в виде многократной широтно-импульсной модуляции (ШИМ). Принято считать [1], что указанные выходные ШИМ-напря-

жения  $U_{\text{вых}}$  образуются в результате сравнения различных модулирующих, аппроксимирующих синусоиду эталонных напряжений  $U_{\text{эт}}$  и пилообразных опорных напряжений  $U_{\text{оп}}$ . Такой способ формирования напряжения  $U_{\text{вых}}$  требует большой вычислительной мощности и приводит к необходимости использования специализированных и относительно дорогих микроконтроллеров. Значительно проще можно сформировать многократную ШИМ табличным или индексным табличным способом [2]. Однако для этого нужно аналитически определить параметры импульсов ШИМ и качественно оценить гармонический состав напряжений многократных ШИМ, созданных с использованием различных форм эталонного напряжения. В [3, 4] данная задача решена для простейших типовых эталонных напряжений и многократных ШИМ, созданных по ступенчатым функциям построения. Вместе с тем существует необходимость решить эту задачу и для многократных ШИМ, созданных с использованием трапецеидальных и синусоидальных эталонных напряжений [1]. Формирование многократной ШИМ с использованием трапецеидальной и синусоидальной функций построения основано на разделении (разбивке) полупериода на равные тактовые импульсные интервалы с последующей заменой каждого из них эквивалентным импульсом ШИМ.

**Многократная ШИМ по трапецеидальной функции построения** отличается от других видов многократной ШИМ тем, что содержит меньшее число импульсов в полупериоде. Лучшим вариантом данной ШИМ является равномерная, однополярная, односторонне-симметричная ШИМ с модуляцией по одной трети полупериода в его начале и конце [1]. При формировании такой ШИМ в системе управления преобразователем обычно используют эталонное трапецеидальное  $U_{\text{эт}}$  и опорное пилообразное  $U_{\text{оп}}$  напряжения, а импульсы управления формируют путем сравнения этих напряжений. Создание эталонного напряжения  $U_{\text{эт}}$  связано с модуляцией по одной трети полупериода, а  $U_{\text{оп}}$  – с выбором числа  $k$  импульсных интервалов в полупериоде. Число импульсных интервалов в полупериоде определяется из выражения  $k = 3m$ , где  $m = 1, 2, 3, \dots$  – целое натуральное число. Изменяя значение  $m$ , можно получить различное количество импульсных интервалов в полупериоде. Примеры формирования напряжения многократной ШИМ с нечетным  $k = 3$  ( $m = 1$ ) и четным  $k = 6$  ( $m = 2$ ) количеством импульсных интервалов в полупериоде представлены на рис. 1.

Последовательности импульсов ШИМ (рис. 1), имеющих постоянную амплитуду  $U_a$ , удобно характеризовать параметрами:  $\alpha_i$  – фазовый угол  $i$ -го ШИМ импульса, отсчитанный от момента прохождения переменного синусоидального напряжения через нулевое значение до начала импульса;  $\tau_i$  – длительность  $i$ -го ШИМ импульса. Импульсы с номерами  $i = 1, 2, 3, \dots, m$ , расположенные в первой трети полупериода, имеют параметры:

$$\alpha_i = \frac{iT}{6(m+1)}; \quad \tau_i = \frac{iT}{6m(m+1)}. \quad \text{Центральный импульс с номером } i = m + 1$$

имеет параметры:  $\alpha_i = \frac{T}{4} - \frac{\tau_i}{2}; \quad \tau_i = \frac{T}{6}$ . Импульсы с номерами

$i = m + 2, m + 3, m + 4, \dots, 2m + 1$ , расположенные в последней трети полупериода, имеют параметры:  $\alpha_i = \frac{T}{2} - \alpha_{2m+2-i} - \tau_i$ ;  $\tau_i = \tau_{2m+2-i}$ .

Напряжения многократной ШИМ (рис. 1) можно рассматривать как сумму напряжений однократных ШИМ и представить рядом Фурье [5]

$$u(t) = \sum_{i=1}^l \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin n\omega t, \quad (1)$$

где  $l = 2m + 1$  – число импульсов в полупериоде;  $U_n$  – амплитуда гармоники;  $\omega = 2\pi/T$  – основная частота;  $n$  – номер гармоники,  $n = 1, 2, 3, \dots$ .

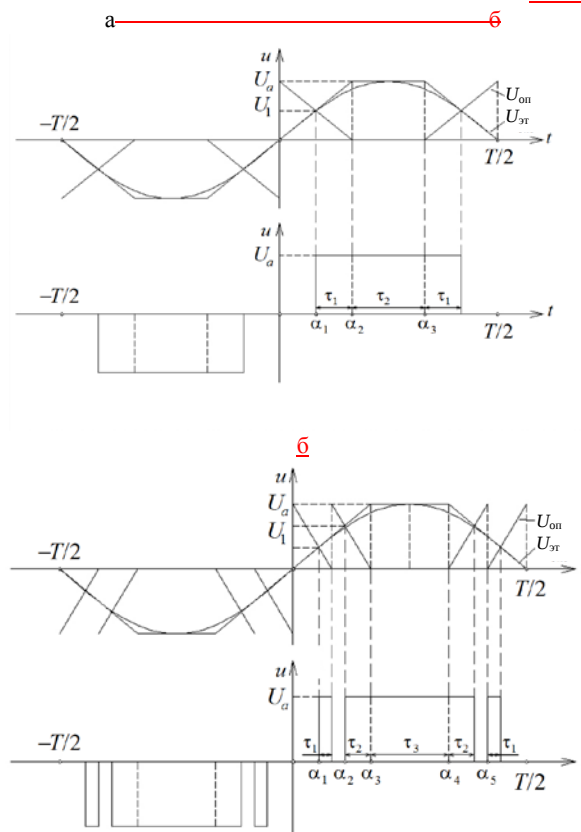


Рис. 1. Примеры формирования напряжений многократных ШИМ с различным количеством импульсных интервалов в полупериоде: а – с нечетным  $k = 3$ ; б – с четным  $k = 6$

Последовательности импульсов ШИМ (рис. 1), имеющих постоянную амплитуду  $U_a$ , удобно характеризовать параметрами:  $\alpha_i$  – фазовый угол  $i$ -го ШИМ-импульса, отсчитанный от момента прохождения переменного синусоидального напряжения через нулевое значение до начала импульса;  $\tau_i$  – длительность  $i$ -го ШИМ-импульса. Импульсы с номерами  $i = 1, 2, 3, \dots, m$ , расположенные в первой трети полупериода, имеют параметры:  $\alpha_i = \frac{iT}{6(m+1)}$ ;  $\tau_i = \frac{iT}{6m(m+1)}$ . Центральный импульс с номером  $i = m + 1$

имеет параметры:  $\alpha_i = \frac{T}{4} - \frac{\tau_i}{2}$ ;  $\tau_i = \frac{T}{6}$ . Импульсы с номерами  $i = m+2, m+3, m+4, \dots, 2m+1$ , расположенные в последней трети полупериода, имеют параметры:  $\alpha_i = \frac{T}{2} - \alpha_{2m+2-i}$ ;  $\tau_i = \tau_{2m+2-i}$ .

Напряжения многократной ШИМ (рис. 1) можно рассматривать как сумму напряжений однократных ШИМ и представить рядом Фурье [5]

$$u(t) = \sum_{l=1}^l \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin n\omega t, \quad (1)$$

где  $l = 2m+1$  – число импульсов в полупериоде;  $U_n$  – амплитуда гармоники;  $\omega = 2\pi/T$  – основная частота;  $n$  – номер гармоники,  $n = 1, 2, 3, \dots$

Выражение для определения амплитуды  $n$ -й гармоники отдельных импульсов можно получить следующим образом [6]:

$$U_n = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} U_a \sin n\omega t dt = \frac{4U_a}{T} \int_{\alpha_i}^{\alpha_i + \tau_i} \sin n\omega t dt = \frac{4U_a}{n\pi} \sin \frac{n\omega(2\alpha_i + \tau_i)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_i}{2}, \quad (2)$$

где  $\alpha_i$  – фазовый угол  $i$ -го импульса;  $\tau_i$  – длительность  $i$ -го импульса.

Регулирование скорости двигателя можно осуществить путем изменения длительности импульсов (широтно-импульсное регулирование)

$$\tau_i^* = \frac{\tau_i}{q}, \quad (3)$$

где  $q$  – параметр регулирования,  $q = 1 - \infty$ .

Используя формулы (2) и (3), запишем выражения для определения амплитуды  $n$ -й гармоники при регулировании:

а) для напряжения с  $k = 3$  (рис. 1а)

$$U_n^* = \frac{4U_a}{n\pi} \left[ \sin \frac{n\omega(2\alpha_1 + \tau_1^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_1^*}{2} + \sin \frac{n\omega(2\alpha_2 + \tau_2^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_2^*}{2} + \right. \\ \left. + \sin \frac{n\omega(2\alpha_3 + \tau_3^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_3^*}{2} \right], \quad - (4a)$$

где  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ;  $\alpha_1 = \frac{T}{12}$ ;  $\tau_1^* = \frac{T}{12q}$ ;  $\alpha_2 = \frac{T}{4} - \frac{\tau_2^*}{2} = \frac{T}{4} \left( 1 - \frac{1}{3q} \right)$ ;  $\tau_2^* = \frac{T}{6q}$ ;

$$\alpha_3 = \frac{T}{2} - \alpha_1 - \tau_1^* = \frac{T}{12} \left( 5 - \frac{1}{q} \right);$$

б) для напряжения при  $k = 6$  (рис. 1б)

$$U_n^* = \frac{4U_a}{n\pi} \left[ \sin \frac{n\omega(2\alpha_1 + \tau_1^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_1^*}{2} + \sin \frac{n\omega(2\alpha_2 + \tau_2^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_2^*}{2} + \right. \\ \left. + \sin \frac{n\omega(2\alpha_3 + \tau_3^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_3^*}{2} + \sin \frac{n\omega(2\alpha_4 + \tau_4^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_4^*}{2} + \right.$$

$$+ \sin \frac{n\omega(2\alpha_5 + \tau_1^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_1^*}{2} \Big], \quad (46)$$

$$\text{где } \omega = \frac{2\pi}{T}; \quad \alpha_1 = \frac{T}{18}; \quad \tau_1^* = \frac{T}{36q}; \quad \alpha_2 = \frac{T}{9}; \quad \tau_2^* = \frac{T}{18q}; \quad \alpha_3 = \frac{T}{4} - \frac{\tau_3^*}{2} = \frac{T}{4} \left(1 - \frac{1}{3q}\right);$$

$$\tau_3^* = \frac{T}{6q}; \quad \alpha_4 = \frac{T}{2} - \alpha_2 - \tau_2^* = \frac{T}{18} \left(7 - \frac{1}{q}\right); \quad \alpha_5 = \frac{T}{2} - \alpha_1 - \tau_1^* = \frac{T}{36} \left(16 - \frac{1}{q}\right).$$

После подстановки и несложных преобразований выражения (4а) и (4б) примут вид:

$$U_n^* = \frac{16U_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{2} \sin \frac{n\pi}{12q} \cos \frac{n\pi}{6} \cos \frac{n\pi}{12} \left(\frac{1}{q} - 2\right); \quad (5a)$$

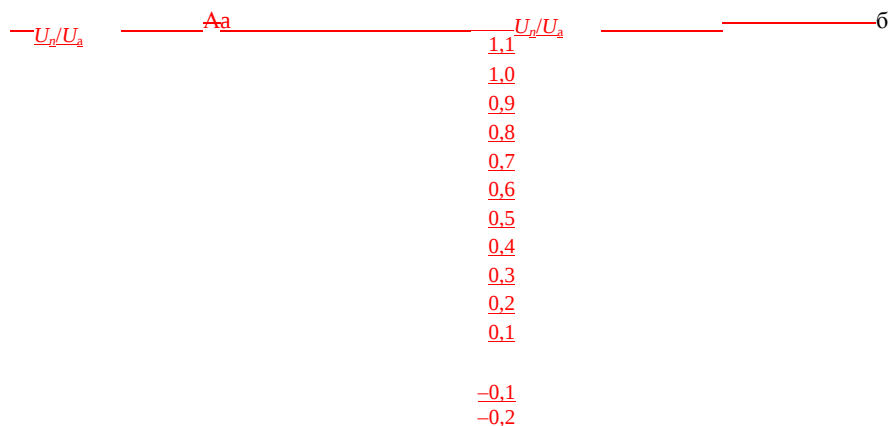
$$U_n^* = \frac{4U_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{2} \left\{ 2 \left[ \sin \frac{n\pi}{36q} \cos \frac{n\pi}{36} \left(\frac{1}{q} - 14\right) + \sin \frac{n\pi}{18q} \cos \frac{n\pi}{18} \left(\frac{1}{q} - 5\right) \right] + \sin \frac{n\pi}{6q} \right\}. \quad (5б)$$

С помощью выражений (5) построены графики (рис. 2), показывающие зависимость относительных амплитуд  $U_n/U_a$  первых пяти гармоник  $n = 1, 2, 3, 4, 5$  от параметра регулирования  $q = 1-6$ . Из рис. 2 следует, что в процессе регулирования  $q = 1-6$  присутствуют только нечетные гармоники, имеющие номера  $n = 1, 3, 5$ . Ближайшая к основной гармоника с номером  $n = 3$  имеет амплитуду не более 5 % (рис. 2б), а в случае, как на рис. 2а, вообще отсутствует. Гармоника с номером  $n = 5$  имеет амплитуды не более 23 % (рис. 2а) и 20 % (рис. 2б). Высшие гармоники имеют частоты, кратные их номеру  $n$  относительно частоты  $\omega$  первой основной гармоники. Лучшим показателем по критерию минимума гармонических составляющих при широтно-импульсном регулировании обладает напряжение на рис. 2б.

Качественный анализ напряжений (рис. 2) многократных ШИМ осуществим с помощью коэффициента несинусоидальности [7]

$$K_{\text{нс}} = \frac{U_1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2}}, \quad (6)$$

где  $U_1$  – амплитуда напряжения основной (первой) гармоники;  $U_n$  – то же произвольной гармоники,  $n = 1 \dots \infty$ .



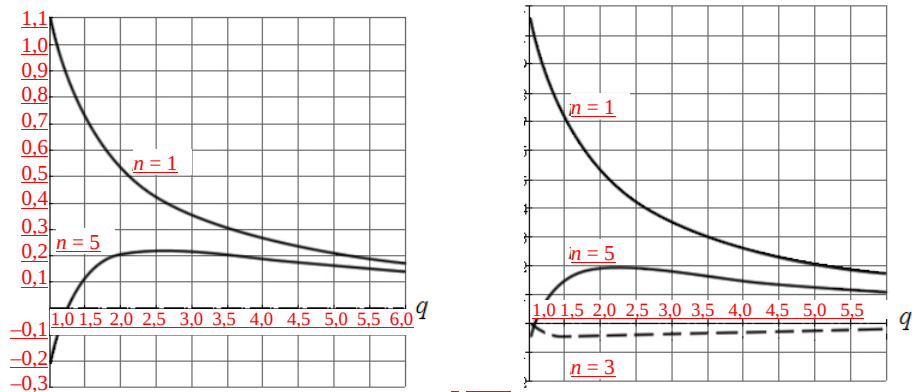


Рис. 2. Изменение относительных амплитуд  $U_n/U_a$  гармоник  $n = 1, 2, 3, 4, 5$  при регулировании  $q = 1-6$  многократной ШИМ с различным количеством импульсных интервалов в полупериоде: а – с нечетным  $k = 3$ ; б – с четным  $k = 6$

С помощью выражений (5) и (6) для гармоник, имеющих номера  $n = 1-5$ , построен график (рис. 3а), из которого следует, что в процессе регулирования коэффициент несинусоидальности не остается постоянным, а изменяется. Лучшим коэффициентом  $K_{нс}^*$  (рис. 3а, кривая б) обладает напряжение многократной ШИМ с четным  $k = 6$  количеством импульсных интервалов в полупериоде.

Качественный анализ напряжений (рис. 2) многократных ШИМ осуществим с помощью коэффициента 1.00 инусоидальности [7]

$$\frac{K_{нс}}{1.00} \quad \frac{K_{нс}}{0.95} \quad \text{--- (6)}$$

где  $U_1$  — амплитуда напряжения основной (первой) гармонической,  $U_n$  — то же произвольной гармонической,  $n = 1, 2, 3, 4, 5$

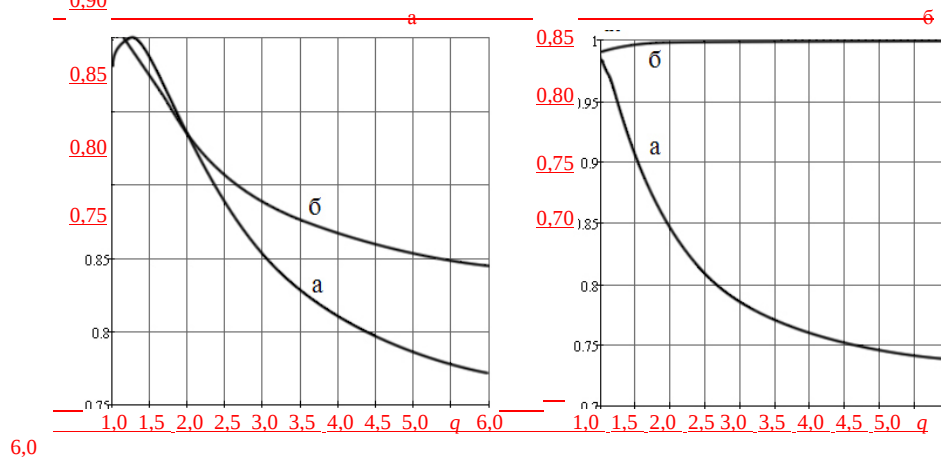


Рис. 3. Изменение коэффициента несинусоидальности ШИМ при регулировании  $q = 1-6$  для различных функций построения: а – трапецеидальной; б – синусоидальной

С помощью выражений (5) и (6) для гармоник, имеющих номера  $n = 1-5$ , построен график (рис. 3а), из которого следует, что в процессе регулирования коэффициент несинусоидальности не остается постоянным, а изменяется. Лучшим коэффициентом  $K_{нс}^*$  (рис. 3а, кривая б) обладает напряже-

ние многократной ШИМ с четным  $k=6$  количеством импульсных интервалов в полупериоде.

Многократная ШИМ по синусоидальной функции построения отличается от других видов многократной ШИМ очевидной простотой. Лучшим вариантом данной ШИМ является равномерная, однополярная, двусторонняя II рода ШИМ, когда указанная точка соответствует тактовым моментам времени (началу, концу или середине импульсного интервала) [1]. При формировании такой ШИМ в системе управления преобразователем используют эталонное синусоидальное  $U_{э\tau}$  и опорное пилообразное  $U_{оп}$  напряжения, а импульсы управления формируют путем сравнения этих напряжений. Создание опорного напряжения  $U_{оп}$  связано с выбором числа  $k$  импульсных интервалов в полупериоде, где  $k = 1, 2, 3, \dots$  – целое натуральное число. Изменяя число  $k$ , можно получить различное количество импульсных интервалов в полупериоде и, следовательно, – различное количество импульсов в полупериоде. Примеры формирования напряжения многократной ШИМ с нечетным  $k = 3$  и четным  $k = 4$  количеством импульсных интервалов (импульсов) в полупериоде представлены на рис. 4.

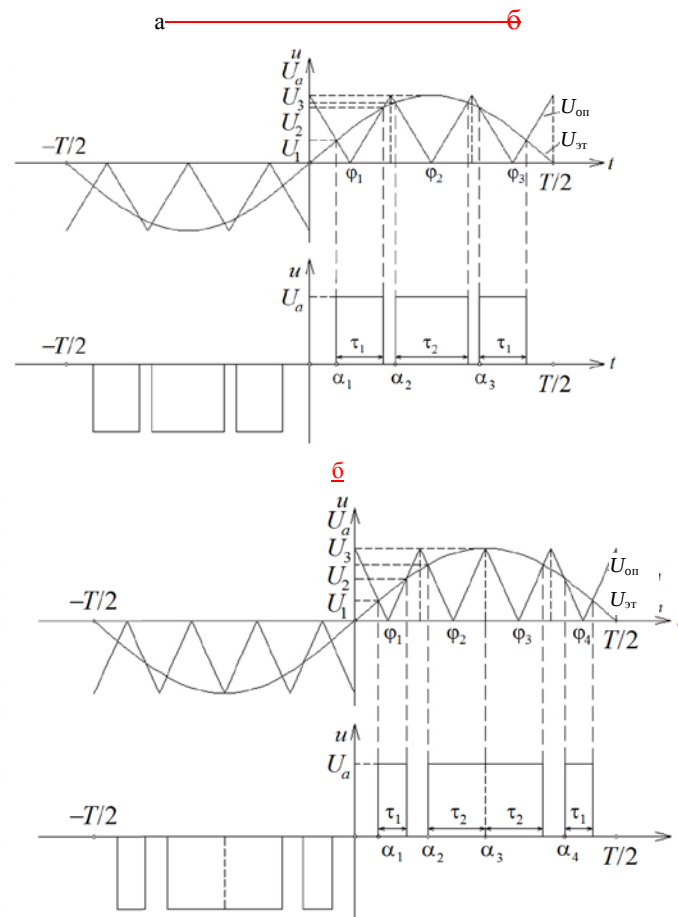


Рис. 4. Примеры формирования напряжений многократных ШИМ с различным количеством импульсных интервалов в полупериоде: а – с нечетным  $k = 3$ ; б – с четным  $k = 4$

Последовательность ШИМ импульсов (рис. 4), имеющих постоянную амплитуду  $U_a$ , удобно характеризовать параметрами:  $\alpha_i = \varphi_i - \Delta\tau =$

$= \frac{T(2i-1)}{4k} - \frac{T}{\pi} \sin \frac{\pi(4i-3)}{4k} \sin \frac{\pi}{4k}$  – фазовый угол  $i$ -го ШИМ импульса, отсчитанный от момента прохождения переменного синусоидального напряжения через нулевое значение до начала импульса;  $\tau_i = \frac{S_i}{U_a} = \frac{T}{\pi} \sin \frac{\pi(2i-1)}{2k}$   ~~$\times$~~   
 ~~$\times \sin \frac{\pi}{2k}$~~  – длительность  $i$ -го ШИМ импульса. Здесь приняты обозначения:

$\varphi_i = \frac{T(2i-1)}{4k}$  – центральный фазовый угол  $i$ -го интервала, отсчитанный от момента прохождения переменного синусоидального напряжения через нулевое значение до середины интервала;  $\Delta\tau_i = \frac{\Delta S_i}{U_a}$  – длительность части

(от  $\alpha_i$  до  $\varphi_i$ ) ШИМ импульса на  $i$ -м интервале;  $S_i = U_a \int_{\theta_i}^{\theta_i + T/2k} \sin \omega t dt =$

$$= \frac{U_a T}{\pi} \sin \frac{\pi(2i-1)}{2k} \sin \frac{\pi}{2k}$$
 – площадь фигуры синусоидального напряжения

на  $i$ -м интервале;  ~~$\Delta S_i = U_a \int_{\theta_i}^{\varphi_i} \sin \omega t dt =$~~

$$\Delta S_i = U_a \int_{\theta_i}^{\varphi_i} \sin \omega t dt = \frac{U_a T}{\pi} \sin \frac{\pi(4i-3)}{4k} \sin \frac{\pi}{4k}$$
 – площадь части (от  $\theta_i$  до  $\varphi_i$ )

фигуры синусоидального напряжения на  $i$ -м интервале;

$$\theta_i = \varphi_i - \frac{T}{4k} = \frac{T(i-1)}{2k}$$
 – фазовый угол начала  $i$ -го интервала.

Используя формулы (2) и (3), запишем выражения для определения амплитуды  $n$ -й гармоники при регулировании:

а) для напряжения с  $k = 3$  (рис. 4а)

$$U_n^* = \frac{4U_a}{n\pi} \left[ \sin \frac{n\omega(2\alpha_1 + \tau_1^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_1^*}{2} + \sin \frac{n\omega(2\alpha_2 + \tau_2^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_2^*}{2} + \sin \frac{n\omega(2\alpha_3 + \tau_1^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_1^*}{2} \right], \quad (7a)$$

$$\text{где } \omega = \frac{2\pi}{T}; \quad \alpha_1 = T \left( \frac{1}{12} - \frac{1}{\pi q} \sin^2 \frac{\pi}{12} \right); \quad \tau_1^* = \frac{T}{4\pi q}; \quad \alpha_2 = T \left( \frac{1}{4} - \frac{1}{\pi q} \sin \frac{5\pi}{12} \sin \frac{\pi}{12} \right);$$

$$\tau_2^* = \frac{T}{2\pi q}; \quad \alpha_3 = T \left( \frac{5}{12} - \frac{1}{\pi q} \sin \frac{3\pi}{4} \sin \frac{\pi}{12} \right);$$

б) для напряжения с  $k = 6$  (рис. 4б)

$$U_n^* = \frac{4U_a}{n\pi} \left[ \sin \frac{n\omega(2\alpha_1 + \tau_1^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_1^*}{2} + \sin \frac{n\omega(2\alpha_2 + \tau_2^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_2^*}{2} + \right.$$

$$+ \sin \frac{n\omega(2\alpha_3 + \tau_2^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_2^*}{2} + \sin \frac{n\omega(2\alpha_4 + \tau_1^*)}{2} \sin \frac{n\omega\tau_1^*}{2} \Big], \quad (7б)$$

где  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ;  $\alpha_1 = T \left( \frac{1}{16} - \frac{1}{\pi q} \sin^2 \frac{\pi}{16} \right)$ ;  $\tau_1^* = \frac{T}{\pi q} \sin^2 \frac{\pi}{8}$ ;  $\alpha_2 = T \left( \frac{3}{16} - \frac{1}{\pi q} \sin \frac{5\pi}{16} \sin \frac{\pi}{16} \right)$ ;  
 $\tau_2^* = \frac{T}{\pi q} \sin \frac{3\pi}{8} \sin \frac{\pi}{8}$ ;  $\alpha_3 = T \left( \frac{5}{16} - \frac{1}{\pi q} \sin \frac{9\pi}{16} \sin \frac{\pi}{16} \right)$ ;  $\alpha_4 = T \left( \frac{7}{16} - \frac{1}{\pi q} \sin \frac{13\pi}{16} \sin \frac{\pi}{16} \right)$ .

После подстановки и несложных преобразований выражения (7а) и (7б) примут вид:

$$U_n^* = \frac{4U_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{2} \left[ 2 \sin \frac{n}{4q} \cos \left( \frac{2n}{q} \sin \frac{\pi}{12} \sin \frac{\pi}{3} \cos \frac{5\pi}{12} - \frac{n\pi}{3} \right) + \sin \frac{n}{2q} \right]; \quad (8а)$$

$$U_n^* = \frac{8U_a}{n\pi} \sin \frac{n\pi}{2} \left\{ \sin \left( \frac{n}{q} \sin^2 \frac{\pi}{8} \right) \cos \left[ n \left( \frac{2}{q} \sin \frac{\pi}{16} \sin \frac{3\pi}{8} \cos \frac{7\pi}{16} - \frac{3\pi}{8} \right) \right] + \right. \\ \left. + \sin \left( \frac{n}{2q} \cos \frac{\pi}{4} \right) \cos \left[ n \left( \frac{2}{q} \sin^2 \frac{\pi}{16} \cos \frac{3\pi}{8} - \frac{\pi}{8} \right) \right] \right\}. \quad (8б)$$

С помощью выражений (8) построены графики (рис. 5), показывающие зависимость относительных амплитуд  $U_n/U_a$  первых пяти гармоник  $n = 1, 2, 3, 4, 5$  от параметра регулирования  $q = 1-6$ .

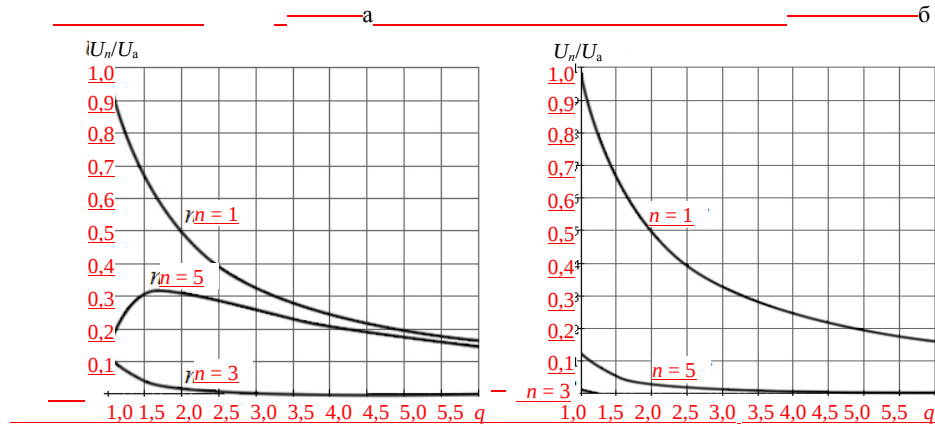


Рис. 5. Изменение относительных амплитуд  $U_n/U_a$  гармоник  $n = 1, 2, 3, 4, 5$  при регулировании  $q = 1-6$  многократной равномерной ШИМ с различным количеством импульсных интервалов в полупериоде: а – с нечетным  $k = 3$ ; б – с четным  $k = 4$

Из графиков рис. 5 следует, что в процессе регулирования  $q = 1-6$  присутствуют только нечетные гармоники, имеющие номера  $n = 1, 3, 5$ . Ближайшая к основной гармоника с номером  $n = 3$  имеет амплитуду не более 13 %, гармоника с номером  $n = 5$  – амплитуду не более 32 % (рис. 5а) и 15 % (рис. 5б). Высшие гармоники имеют частоты, кратные их номеру  $n$

относительно частоты  $\omega$  первой основной гармоники. Лучшим показателем по критерию минимума гармонических составляющих при широтно-импульсном регулировании обладает напряжение с  $k = 4$  (рис. 5б).

Используя выражения (6) и (8) для гармоник, имеющих номера  $n = 1-5$ , построен график (рис. 3б), из которого следует, что в процессе регулирования коэффициент несинусоидальности не остается постоянным, а изменяется. Лучшим коэффициентом  $K_{нс}^*$  (рис. 3б, кривая б) обладает напряжение многократной ШИМ с четным  $k = 4$  количеством импульсных интервалов в полупериоде.

### ВЫВОДЫ

Предлагаемый подход позволяет с использованием трапеце- и синусоидальной функций построения получить напряжения в виде многократной последовательности широтно-импульсных модуляций импульсов, определить их гармонический состав, провести сравнительный и качественный анализ. Получены аналитические выражения параметров ШИМ импульсов  $\alpha_i$  и  $\tau_i$ , которые позволяют программно сформировать указанные последовательности широтно-импульсных модуляций импульсов, определить амплитуды  $U_n^*$  напряжений  $n$ -й гармоники при регулировании, осуществить моделирование работы электродвигателя переменного тока. Лучшими показателями качества (меньшим количеством гармонических составляющих, большим коэффициентом несинусоидальности) при широтно-импульсном регулировании обладает напряжение в виде последовательности широтно-импульсных модуляций импульсов, созданных по синусоидальной функции построения с четным количеством импульсных интервалов в полупериоде.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Моин, В. С. Стабилизированные транзисторные преобразователи / В. С. Моин. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.
2. Марков, В. В. Индексная табличная ШИМ в автономном инверторе напряжения / В. В. Марков, К. П. Слядзевская // Электротехника. – 2000. – № 1. – С. 23–28.
3. Стрижнев, А. Г. Спектральный анализ напряжений, питающих электродвигатель переменного тока / А. Г. Стрижнев, Ю. Н. Петренко, Г. В. Ледник // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2010. – № 5. – С. 25–30.
4. Стрижнев, А. Г. Синтез напряжений равномерных ШИМ, созданных по ступенчатым функциям построения / А. Г. Стрижнев, Г. В. Ледник // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2011. – № 5. – С. 24–30.
5. Баскаков, С. И. Радиотехнические цепи и сигналы: учеб. / С. И. Баскаков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 448 с.
6. Бронштейн, И. Н. Справочник по математике / И. Н. Бронштейн, К. А. Семендяев. – М.: Наука, 1964. – 608 с.
7. Выходящие частотные транзисторные преобразователи / Э. М. Ромаш [и др.]. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.

Поступила 19.09.2012

УДК 620.92+502.174.3