

ВИЩІ ГАРМОНІКИ ВИПРЯМЛЕНОЇ НАПРУГИ ТРИФАЗНОГО МОСТОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА В НЕПОВНОВЕНТИЛЬНИХ РЕЖИМАХ

М.Й. Олійник, В.Г. Федішин, М.Б. Сабат

Національний університет «Львівська політехніка»; 79013, м. Львів, вул. Степана Бандери, 28а,
e-mail: myroslav.b.sabat@lpnu.ua

Отримано узагальнені вирази для розрахунку коефіцієнтів розкладу у ряд Фур'є випрямленої напруги у неповновентильних режимах роботи трифазного мостового випрямляча за умов симетричної системи живлення та різного характеру навантаження. Наведені вирази справедливі для тих форм кривих випрямленої напруги, які породжують новоутворені схеми випрямлення у випадку перегорання однієї, двох, трьох та чотирьох плавких вставок запобіжників у плечах вентилів, а також для будь-яких форм кривих, якщо вони описуються косинусоїдними функціями на ділянках інтегрування. Адекватність виразів підтверджено побудовою досліджуваних кривих випрямленої напруги за допомогою отриманих коефіцієнтів рядів Фур'є.

Ключові слова: вентиль, випрямляч, трифазна мостова схема, випрямлена напруга, ряд Фур'є.

Получены обобщенные выражения для расчета коэффициентов разложения у ряд Фурье выпрямленного напряжения у неполновентильных режимах работы трехфазного мостового выпрямителя при условии симметричной системы питания и различного характера нагрузки. Приведенные выражения справедливы для тех форм кривых выпрямленного напряжения, которые возникают у вновь созданных схемах выпрямления в случае перегорания одной, двух, трех и четверых плавких вставок предохранителей в плечах вентилей, а также для любых форм кривых, если они описываются косинусоидными функциями на участках интегрирования. Адекватность выражений подтверждена построением исследуемых кривых с помощью полученных значений коэффициентов рядов Фурье.

Ключевые слова: вентиль, выпрямитель, трехфазная мостовая схема, выпрямленное напряжение, ряд Фурье.

The generalized expressions for Fourier coefficients of rectified voltage in abnormal modes of operation of three-phase bridge rectifier under the conditions of symmetrical power supply system and different types of load are obtained. The provided expressions are fair for those rectification circuits converted from three-phase bridge circuit in case of deflagration of one, two, three or four fuse links, as well as curves of any shapes, if they are described by cosine function at the integration areas. The adequacy of expressions was confirmed by rectified voltage curves construction using the obtained values of Fourier series coefficients.

Key words: valve, rectifier, three-phase bridge circuit, rectified voltage, Fourier series.

Постановка проблеми. Трифазний мостовий випрямляч може функціонувати в режимах за умови вилучення одного, двох, трьох та чотирьох вентилів схеми. Вказане еквівалентно перегорання плавких вставок у плечах вентилів. Відповідно змінюється форма випрямленої напруги [1], що призводить до зміни як її середнього значення, так і складу та кількісних значень вищих гармонік. Звідси виникає необхідність у визначенні складу та оцінки вищих гармонік випрямленої напруги.

Аналіз останніх досліджень. Склад і кількісні значення коефіцієнтів вищих гармонік випрямленої напруги трифазного мостового випрямляча в нормальних режимах роботи можна оцінити за допомогою відомого ряду Фур'є [2]. Вказане стосується й інших новоутворених схем випрямлення, в які перетворюються трифазна мостова схема випрямлення за умови вилучення певної кількості її вентилів. Однак в аномальних режимах роботи виникають такі форми випрямленої напруги, для яких не існує готового ряду розкладу [див. форми напруг у табл. 1]. Автори пропонують узагальнену формулу для визначення коефіцієнтів ряду Фур'є будь-якої кривої, яка описується косинусоїдними функціями.

Виклад основного матеріалу. Всі наведені в табл. 1 криві випрямленої напруги трифазного мостового випрямляча у неповновентильних режимах роботи симетричні відносно осі ординат, які мають місце за умови симетричної трифазної системи живлення. В розкладі таких кривих у ряд Фур'є відсутні синусні складові і наявні лише косинусні складові [2], тобто

$$u_d(\vartheta) = A_0 + A_1 \cos(\vartheta) + A_2 \cos(2\vartheta) + A_3 \cos(3\vartheta) + \dots \quad (1)$$

Тут і надалі $\vartheta = \omega t$.

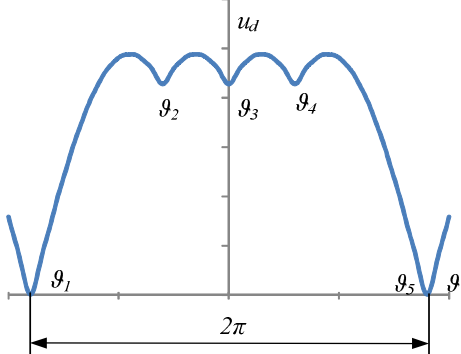
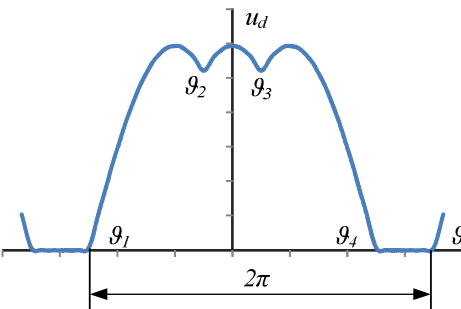
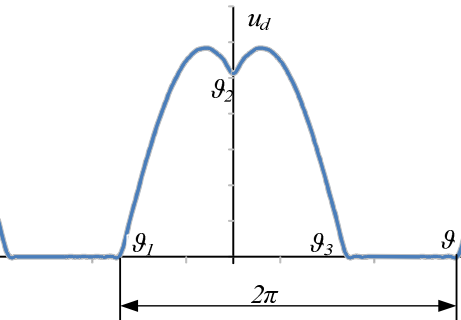
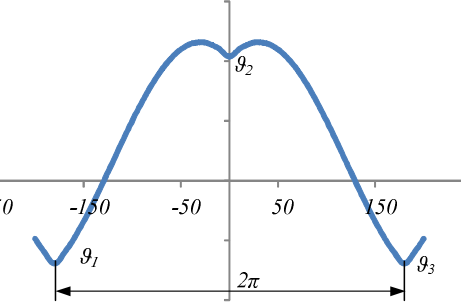
Постійна складова A_0 рядів Фур'є для всіх кривих, наведених у табл.1 визначається з виразу [1]

$$A_0 = U_{dn} = \frac{6-n}{6} U_{d0}, \quad (2)$$

де U_{dn} – середнє значення випрямленої напруги трифазного мостового випрямляча, що відповідає певній кількості n коректно вилучених діодів схеми ($n = 1,2,3,4$);

U_{d0} – середнє значення випрямленої напруги трифазного мостового випрямляча в повновентильному режимі.

Таблиця 1 – Форми кривої випрямленої напруги на полюсах трифазного мостового випрямляча у неповновентильних режимах роботи

Форма випрямленої напруги	Межі інтегрування та початкові фази напруг, з яких сформована крива випрямленої напруги (всі напруги представлені косинусоїдами)
Вилучений один вентиль схеми	
	$\vartheta_1 = -\pi; \vartheta_2 = -\frac{\pi}{3}; \vartheta_3 = 0;$ $\vartheta_4 = \frac{\pi}{3}; \vartheta_5 = \pi;$ $\varphi_1 = \frac{\pi}{2}; \varphi_2 = \frac{\pi}{6}; \varphi_3 = -\frac{\pi}{6}; \varphi_4 = -\frac{\pi}{2};$
Вилучено два вентиля схеми різних плеч та груп	
	$\vartheta_1 = -\frac{5\pi}{6}; \vartheta_2 = -\frac{\pi}{6}; \vartheta_3 = \frac{\pi}{6}; \vartheta_4 = \frac{5\pi}{6};$ $\varphi_1 = \frac{\pi}{3}; \varphi_2 = 0; \varphi_3 = -\frac{\pi}{3}$
Вилучено три вентиля схеми	
	$\vartheta_1 = -\frac{2\pi}{3}; \vartheta_2 = 0; \vartheta_3 = \frac{2\pi}{3};$ $\varphi_1 = \frac{\pi}{6}; \varphi_2 = -\frac{\pi}{6};$
Вилучено чотири вентиля схеми	
	$\vartheta_1 = -\frac{6\pi}{6}; \vartheta_2 = 0; \vartheta_3 = \frac{6\pi}{6};$ $\varphi_1 = \frac{\pi}{6}; \varphi_2 = -\frac{\pi}{6};$

Розрахунок коефіцієнтів ряду Фур'є здійснюється в загальному з виразу [1]

$$A_v = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} u_d(\vartheta) \cos(v\vartheta) d\vartheta, \quad (3)$$

де $u_d(\vartheta)$ – закон зміни випрямленої напруги на ділянці інтегрування,

$v=1,2,3,\dots$ – номер гармоніки.

Для наведених в табл.1 кривих випрямленої напруги закон зміни на окремих ділянках

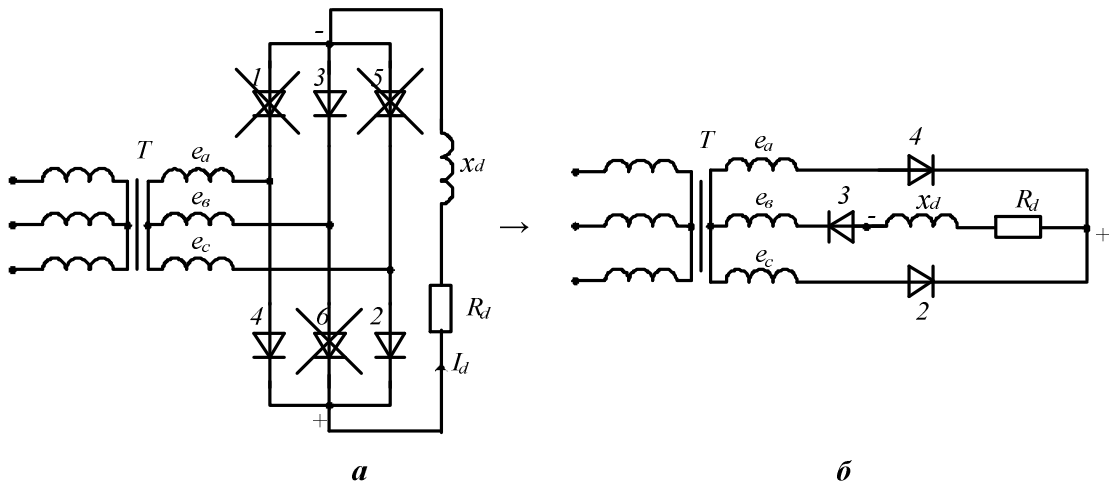


Рисунок 1 – Вихідна схема трифазного мостового випрямляча (а) з трьома вилученими вентилями та новоутворена схема (б) за наявності x_d

інтегрування можна записати в узагальненій формі

$$u_{di} = U_m \cos(\vartheta + \varphi_i), \quad (4)$$

де i – номер ділянки інтегрування,

φ_i – початкова фаза напруги на ділянці інтегрування. Межі ділянок інтегрування та початкові фази напруг відносно прийнятої системи відліку наведені в табл.1. З врахуванням цього вираз для визначення амплітуди першої гармоніки згідно з виразом (3) отримаємо у такому вигляді

$$A_{v=1} = \frac{U_m}{2\pi} \sum_{i=1}^i [(v_{i+1} - v_i) \cos \varphi_i + \sin(v_{i+1} - v_i) \cos(v_{i+1} + v_i + \varphi_i)]. \quad (5)$$

Вираз для визначення значень амплітуд всіх вищих гармонік ($v=2,3,4,5,6\dots$) ряду Фур'є отримаємо, перетворивши добуток косинусів формули (3) суму, а після інтегрування отримані різниці синусів знову перетворивши в добуток за відомими формулами перетворення [3]. В результаті отримаємо

$$A_v = \frac{U_m}{\pi} \sum_{i=1}^i \left\{ \frac{1}{v+1} \sin \left[(v+1) \frac{v_{i+1} - v_i}{2} \right] \times \cos \left[(v+1) \frac{v_{i+1} + v_i}{2} + \varphi_i \right] + \frac{1}{v-1} \sin \left[(v-1) \frac{v_{i+1} - v_i}{2} \right] \times \cos \left[(v-1) \frac{v_{i+1} + v_i}{2} - \varphi_i \right] \right\}. \quad (6)$$

Зауважимо, що отримані вирази (5), (6) справедливі для всіх наведених в табл. 1 форм кривих випрямленої напруги, а також і для кривих випрямленої напруги інших схем випрямлення, зокрема, для трифазної схеми з нульовою точкою трансформатора. Отримані згідно з виразами (5), (6) кількісні значення коефіцієнтів рядів Фур'є для означених форм випрямленої напруги дозволяють записати ряди Фур'є в такій формі:

а) вилучено один вентиль (крива 2 табл.1) за умови чисто активного чи активно-індуктивного характеру навантаження

$$u_d(\vartheta) = \left\{ \frac{6-n}{6} U_{d0} + \frac{U_m \sqrt{3}}{2\pi} \cos \vartheta + \frac{U_m}{\pi} \left(-\frac{2}{1 \times 3} \cos(2\vartheta) + \frac{3}{2 \times 4} \cos(3\vartheta) - \frac{2}{3 \times 5} \cos(4\vartheta) - \frac{5}{5 \times 7} \cos(6\vartheta) - \dots \right) \right\}; \quad (7)$$

б) вилучено два вентиля різних плеч та груп (крива 4 табл. 1) за умови чисто активного чи активно-індуктивного характеру навантаження

$$u_d(\vartheta) = \left\{ \frac{6-n}{6} U_{d0} + \frac{U_m}{2\pi} \cos \vartheta + \frac{U_m}{\pi} \left(-\frac{2}{1 \times 3} \cos(2\vartheta) + \frac{2}{3 \times 5} \cos(4\vartheta) + \frac{4}{5 \times 7} \cos(6\vartheta) + \frac{2}{7 \times 9} \cos(8\vartheta) - \frac{2}{9 \times 11} \cos(10\vartheta) - \frac{4}{11 \times 13} \cos(12\vartheta) - \dots \right) \right\}; \quad (8)$$

в) вилучено три вентиля (крива 5 табл. 1) за умови чисто активного характеру навантаження

$$u_d(\vartheta) = \frac{6-n}{6} U_{d0} + \frac{U_m \sqrt{3}}{2\pi} \cos \vartheta + \frac{U_m}{\pi} \left(-\frac{3}{2 \times 4} \cos(3\vartheta) - \frac{3}{5 \times 7} \cos(6\vartheta) - \frac{3}{8 \times 10} \cos(9\vartheta) - \dots \right); \quad (9)$$

г) вилучено чотири вентиля (крива 6 табл. 1) за умови активно-індуктивного характеру навантаження

$$u_d(\vartheta) = \frac{6-(n+1)}{6} U_{d0} + \frac{U_m \sqrt{3}}{2\pi} \cos \vartheta + \frac{U_m}{\pi} \left(-\frac{2}{1 \times 3} \cos(2\vartheta) - \frac{2}{3 \times 5} \cos(4\vartheta) - \frac{2}{5 \times 7} \cos(6\vartheta) - \dots \right). \quad (10)$$

У наведених рядах знаки та значення чисельників коефіцієнтів ряду Фур'є повторюються так, як наведено у фігурних дужках. Перевіркою правильності отриманих результатів слугує побудова наведених в табл.1 форм кривих випрямленої напруги за отриманими рядами Фур'є з врахуванням перших 24 гармонік.

Аналіз отриманих результатів показує, що неповновентильні режими роботи трифазної мостової схеми випрямлення використовувати недоцільно. Зазвичай, під час вибору фільтрів у більшості випадків беруть до уваги вплив першої вищої гармоніки ($v=1$) із ряду розкладу. У випадку неповновентильної роботи трифазної мостової схеми випрямлення слід брати до уваги вплив, крім основної гармоніки ($v=1$), ще й однієї або декількох перших вищих гармонік з ряду розкладу, оскільки їх кількісні значення співрозмірні (див. ряди Фур'є а, б, в, г). Це породжує значні пульсації випрямленої напруги, які буде вкрай важко звести до нормативних значень. Крім того, неповновентильні режими трифазної мостової схеми випрямлення створюють несиметричне навантаження на мережу живлення.

Окремо слід вказати на те, що робота трифазної мостової схеми випрямлення з трьома вилученими вентилями на активно-індуктивне навантаження (або ж з індуктивним фільтром) призводить до погіршення форми кривої випрямленої напруги (крива 5 табл. 1).

Робота на активно-індуктивне навантаження збільшує у 1,5 рази амплітуду основної гармоніки і істотно змінює склад вищих гармонік (див. ряди розкладу в і г). Крім того, зменшується середнє значення випрямленої напруги у випадку достатньо великого індуктивного опору $x_d \rightarrow \infty$ у колі навантаження.

Зміна форми випрямленої напруги під час переходу від чисто активного до активно-індуктивного характеру навантаження пояснюється тим, що індуктивність в колі навантаження протидіє зміні випрямленого струму. Зокрема, тривалість провідного стану четвертого вентиля, який завершує формування випрямленого струму у випадку чисто активного навантаження, тепер буде збільшуватися за рахунок накопиченої енергії в індуктивності, яка, власне, підтримує струм у навантаженні. За достатньо великої індуктивності $x_d \rightarrow \infty$ у колі навантаження накопиченої енергії буде достатньо до моменту закриття четвертого вентиля та вступу у роботу другого вентиля і підтримання останнього у провідному стані, аж до появи додатних значень напруги $U_{cв.}$, тобто до створення режиму неперервного струму. Подальше збільшення індуктивності у режимі неперервного струму зменшує його пульсації, форма ж кривої випрямленої напруги вже не змінюється та відповідає наведені й у табл. 1.

Висновки

Отримані узагальнені формули для розрахунку коефіцієнтів рядів Фур'є розкладу кривих випрямленої напруги, які виникають у неповновентильних режимах роботи трифазного мостового випрямляча. Наведено ряди Фур'є дозволяють провести кількісну оцінку вищих гармонік та визначити їх склад.

Література

1 Климук П.П. Глибоке дискретне регулювання напруги випрямляча з некерваними вентилями / П.П. Климук, М.Й. Олійник, В.Г. Федішин // Вісн. Нац. у-ту «Львівська політехніка». – 2007. – № 587. – С. 27 – 31.

2 Перхач В.С. Теоретична електротехніка. Лінійні кола / В.С. Перхач. – К.: Вища шк., 1992. – 439 с.

3 Бронштейн И. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов / И. Бронштейн, К. Семендяев. – М.: Лань, 2009. – 608 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії
09.06.17*

*Рекомендована до друку
професором **Костишиним В.С.**
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)
професором **Сегедюю М.С.**
(Національний університет
«Львівська політехніка», м. Львів)*