

АНАЛІЗ ПУЛЬСАЦІЙ ВИПРЯМЛЕНОГО СТРУМУ ТРИФАЗНОГО МОСТОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА У НЕПОВНОВЕНТИЛЬНИХ РЕЖИМАХ

М.Й. Олійник, Н.Г. Мальцева, М.Б. Сабат, В.Г. Федюшин

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

Запропонована методика визначення пульсацій випрямленого струму трифазного мостового випрямляча у неповновентильних режимах за умов безперервного струму навантаження та симетричної системи живлення. Наведена методика дозволяє врахувати вплив на пульсації випрямленого струму також і фільтрів, які створюють активно-індуктивний характер кола навантаження. В однаковій мірі запропонована методика може бути застосована і для повновентильних режимів трифазного мостового випрямляча за означених вище умов.

Ключові слова: вентиль, випрямляч, трифазна мостова схема, випрямлений струм, пульсація, ряд Фур'є.

Предложена методика определения пульсаций непрерывистого постоянного тока трехфазного мостового выпрямителя в неполновентильных режимах при условии симметричной системы питания. Предлагаемая методика также разрешает учитывать влияние фильтров на пульсации постоянного тока, если они придают цепи нагрузки активно-индуктивный характер. В равной степени предлагаемая методика может быть применена к расчету полновентильных режимов трехфазного мостового выпрямителя при соблюдении выше указанных условий.

Ключевые слова: вентиль, выпрямитель, трехфазная мостовая схема, выпрямленный ток, пульсация, ряд Фурье.

The methodology of pulsations determination of the permanent current for the three-phase rectifier bridge at not fully valve modes under the condition of continuous current of loading and symmetrical supply system is proposed. The proposed methodology takes into account the influence of filters on the pulsations of the permanent current, in case they create actively-inductive character of loading. To the same extent the proposed methodology can be used for normal modes of operation of three-phase rectifier bridge under the above mentioned conditions.

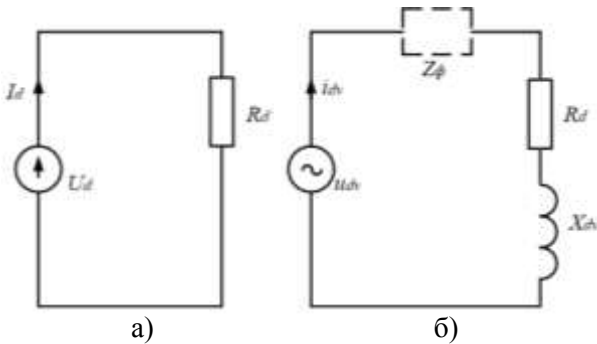
Key words: valve, rectifier, three-phase bridge circuit, rectified current, Fourier series.

Постанова проблеми. В ряді пристроїв для створення магнітного потоку використовуються випрямлений струм, який отримують за допомогою випрямлячів, зібраних за трифазною мостовою схемою. Трифазний мостовий випрямляч може функціонувати за умови вилучення одного, двох, трьох чи навіть чотирьох вентилів схеми [1]. Це призводить до зменшення середнього значення випрямленої струму та істотної зміни форми випрямленої напруги й появи у її складі неканонічних вищих гармонік [2]. Вони викликають зміну форми випрямленого струму та його додаткові пульсації. Звідси впливає необхідність аналізу пульсацій випрямленого струму у неповновентильних режимах трифазного мостового випрямляча з метою визначення допустимості такого режиму.

Аналіз останніх досліджень. Відомо [3], що у нормальних режимах трифазного мостового випрямляча випрямлену напругу можна представити рядом Фур'є. Випрямлена напруга у своєму складі має лише канонічні вищі гармоніки кратні шести. Перша з ряду розкладу незначна та становить 5,7% по відношенню до середнього значення випрямленої напруги. За умови $X_d/R_d \geq 5$ випрямлений струм вважається ідеально згладженим, відповідно його коефіцієнт пульсацій наближається до нуля.

У неповновентильних режимах трифазного мостового випрямляча [2] у складі випрямленої напруги виникає низка неканонічних вищих гармонік, а також перша частотою $f=50$ Гц, які в разі перевершують найбільшу гармоніку нормального режиму. Тепер, очевидно, буде некоректним твердження про те, що випрямлений струм ідеально спрямлений за умови $X_d/R_d \geq 5$. Вплив означеного співвідношення на форму випрямленого струму i_d у нормальних режимах трифазного мостового випрямляча досліджено в [4], де отримано аналітичний вираз для його розрахунку шляхом інтегрування диференційного рівняння на інтервалі повторюваності процесів $T=\pi/3$. Для неповновентильних режимів треба розв'язувати диференційні рівняння для активно-індуктивного кола навантаження на окремих ділянках в інтервалі $T=2\pi$, де кожен раз у досліджуваному колі буде діяти інша лінійна напруга, яка бере участь у формуванні випрямленої напруги та за допомогою граничних умов визначати постійні інтегрування. Вказане призведе до формування і розв'язку системи алгебраїчних рівнянь для їх визначення, що робить такий шлях громіздким. Автори статті пропонують простіший метод аналізу пульсацій випрямленого струму як у неповновентильних режимах так і повновентильних.

Виклад основного матеріалу. Відомий склад гармонік кривої випрямленої напруги у повновентильному чи неповновентильному режимі дозволяє вести розрахунок струму навантаження випрямляча за допомогою наведених на рис. 1 заступних схем, де U_d – постійна складова (середнє значення напруги неповновентильного режиму) та u_{dv} – змінні складові відповідного розкладу в ряд Фур'є напруги випрямляча у неповновентильних режимах. Результуючий струм у колі навантаження отримуємо шляхом накладання постійної складової I_d та всіх змінних складових $\sum i_{dv}$, які визначаються за формулою $i_d = I_d + \sum i_{dv}$. Середнє значення випрямленої напруги U_d у неповновентильних режимах визначається з виразу $U_d = \frac{6-n}{6} U_{d0}$, де n – кількість вилучених вентилів, U_{d0} – середнє значення випрямленої напруги повновентильного режиму.



а – для постійної складової, б – для всіх змінних складових відповідного ряду розкладу

Рисунок 1 – Заступні схеми для визначення струму навантаження випрямляча

За наведеною заступною схемою можна визначити вплив фільтрів, які задають активно-індуктивний характер кола навантаження випрямляча, на форму струму навантаження i_d . З врахуванням рядів розкладу кривих випрямленої напруги [2] повні вирази струму навантаження для випадку активно-індуктивного кола в режимах вилучення відповідного числа вентилів зі схеми трифазного мостового випрямляча набудуть вигляду:

а) вилучений один ventиль

$$i_d(\vartheta) = \frac{6-n}{6} \frac{U_{d0}}{R_d} + \frac{U_m}{2\pi} \frac{\sqrt{3} \cos(\vartheta - \varphi_d)}{Z_d} + \frac{U_m}{\pi} \left\{ \frac{2 \cos(2\vartheta - \varphi_2)}{1 \times 3 Z_2} + \frac{3 \cos(3\vartheta - \varphi_3)}{2 \times 4 Z_3} - \frac{2 \cos(4\vartheta - \varphi_4)}{3 \times 5 Z_4} - \frac{5 \cos(6\vartheta - \varphi_6)}{5 \times 7 Z_6} - \frac{2 \cos(8\vartheta - \varphi_8)}{7 \times 9 Z_8} + \frac{3 \cos(9\vartheta - \varphi_9)}{8 \times 10 Z_9} - \dots \right\} \quad (1)$$

б) вилучено два вентилі різних плеч та груп

$$i_d(\vartheta) = \frac{6-n}{6} \frac{U_{d0}}{R_d} + \frac{U_m}{2\pi} \frac{1 \cos(\vartheta - \varphi_d)}{Z_d} + \frac{U_m}{\pi} \left\{ -\frac{2 \cos(2\vartheta - \varphi_2)}{1 \times 3 Z_2} + \frac{2 \cos(4\vartheta - \varphi_4)}{3 \times 5 Z_4} + \frac{4 \cos(6\vartheta - \varphi_6)}{5 \times 7 Z_6} + \frac{2 \cos(8\vartheta - \varphi_8)}{7 \times 9 Z_8} - \frac{2 \cos(10\vartheta - \varphi_{10})}{9 \times 11 Z_{10}} - \frac{4 \cos(12\vartheta - \varphi_{12})}{11 \times 13 Z_{12}} - \dots \right\} \quad (2)$$

в) вилучено три вентилі

$$i_d(\vartheta) = \frac{6-n}{6} \frac{U_{d0}}{R_d} + \frac{U_m}{2\pi} \frac{\sqrt{3} \cos(\vartheta - \varphi_d)}{Z_d} + \frac{U_m}{\pi} \left\{ -\frac{3 \cos(3\vartheta - \varphi_3)}{2 \times 4 Z_3} - \frac{3 \cos(6\vartheta - \varphi_6)}{5 \times 7 Z_6} - \frac{3 \cos(9\vartheta - \varphi_9)}{8 \times 10 Z_9} - \dots \right\} \quad (3)$$

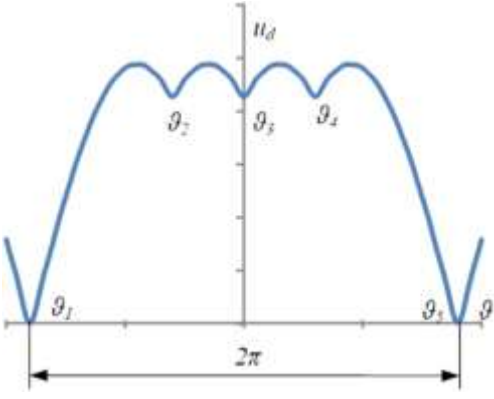
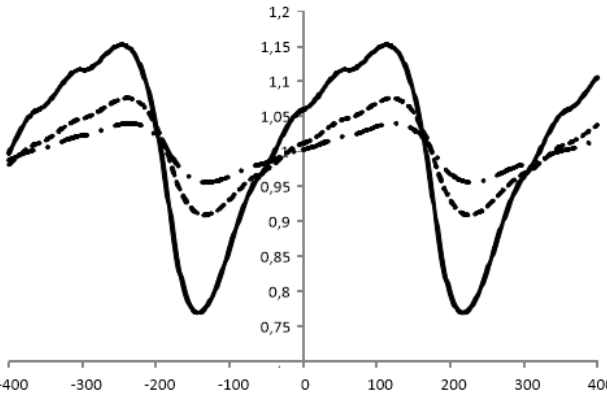
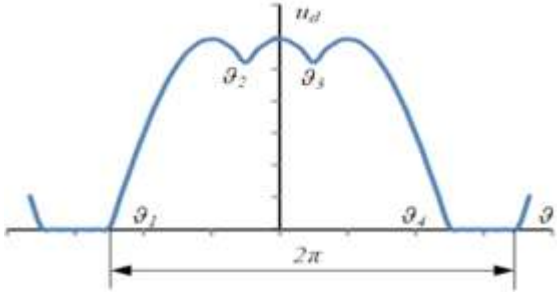
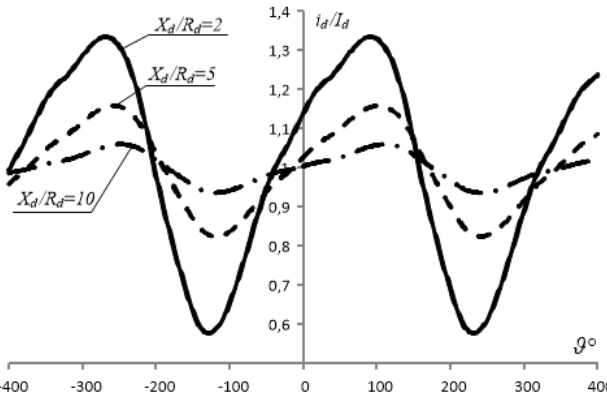
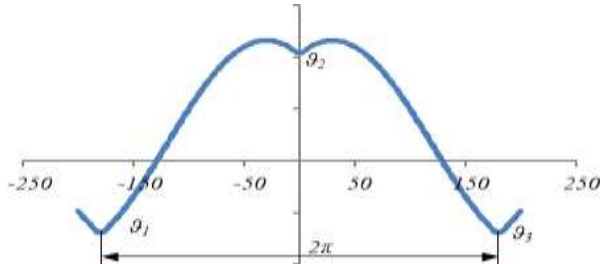
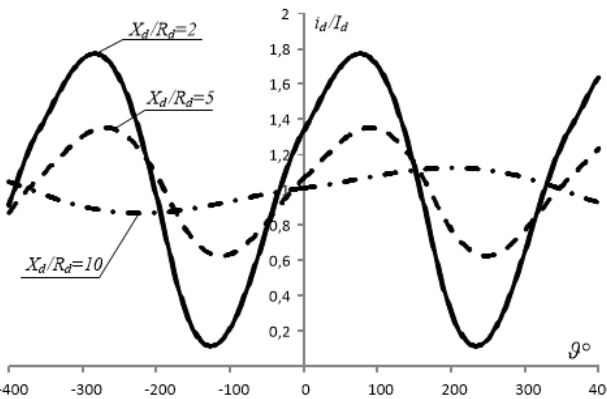
У наведених виразах $U_{d0} = \frac{3\sqrt{2}\sqrt{3}U_2}{\pi}$ – середнє значення випрямленої напруги повновентильного режиму трифазного мостового випрямляча; U_2 – дієве значення фазної напруги живлення; $U_m = \sqrt{2}\sqrt{3}U_2$ – амплітуда лінійної напруги живлення; R_d , X_d , Z_d – активний, індуктивний та повний опори кола навантаження на частоті 50 Гц; $Z_2 = \sqrt{R_d^2 + (2X_d)^2}$, $Z_3 \dots$ – повні опори кола навантаження на гармоніках $v=2, v=3 \dots$ відповідного ряду розкладу; $\varphi_d = \arccos(R_d / Z_d)$, $\varphi_v = \arccos(R_d / Z_v)$... – початкові фази струму для частоти 50 Гц та відповідних гармонік ряду розкладу.

Отримані вирази дозволяють побудувати часові діаграми струму кола навантаження $i_d=f(\vartheta)$ для різних значень співвідношень X_d/R_d досліджуваних неповновентильних режимів трифазного мостового випрямляча (див. табл. 1). Зауважимо, що вирази (1) – (3) справедливі тільки для режиму неперервного струму.

Побудовані за виразами (1) – (3) криві дозволяють визначити максимальні I_{dmax} та мінімальні I_{dmin} значення випрямленого струму, що дає змогу здійснити оцінку впливу співвідношення X_d/R_d на його коливання. Крім того вирази (1) – (3) шляхом простих ітерацій дозволяють визначити мінімальне значення $[X_d/R_d]_{min}$, за якого підтримується режим неперервного струму навантаження у неповновентильних режимах (див. третій рядок табл. 2).

Зауважимо, що для повновентильного режиму трифазного випрямляча струм навантаження є неперервним за будь-якого характеру навантаження. Дослідження процесів, які виникають в режимі перервного струму, викладені в [5] і в даній статті не розглядаються.

Таблиця 1 – Вплив співвідношення R_d/X_d на форму випрямленого струму

Форма випрямленої напруги	Форма випрямленого струму за умови активно-індуктивного навантаження
Вилучення одного вентиля	
	
	
Вилучення трьох вентилів	
	

З наведених кривих видно, що пульсації струму навантаження (табл. 1) значно зменшуються із зростанням співвідношення X_d/R_d і, навпаки, збільшуються із його зменшенням. За малих значень X_d/R_d крива струму кола навантаження близька до форми кривої випрямленої напруги відповідного неповновентильного режиму. Однак кількісну оцінку пульсацій можна здійснити за допомогою коефіцієнта пульсацій. Зазвичай, коефіцієнт пульсацій струму кола навантаження визначають за амплітудою першої (найбільшої) гармоніки $I_{v \max}$ ряду розкладу $q = [I_{v \max} / I_d]$. В цьому виразі $I_d = U_d / R_d$ –

середнє значення струму навантаження відповідного неповновентильного режиму. Для досліджуваних режимів з використанням виразів (1) – (3) отримаємо наступні формули коефіцієнтів пульсацій випрямленого струму у функції співвідношення X_d/R_d :

а) вилучення одного вентиля зі схеми ($n=1$). Найбільшою гармонікою ряду Фур'є (1) є перша частотою 50 Гц. Відповідно коефіцієнт пульсації за першою гармонікою дорівнює:

Таблиця 2 – Параметри досліджуваних неповновентильних режимів трифазного мостового випрямляча

Досліджуваний режим	Вилучення одного вентиля			Вилучення двох вентилів			Вилучення трьох вентилів		
	Числове значення відношення X_d/R_d								
Параметри досліджуваного режиму	2	5	10	2	5	10	2	5	10
Максимальне значення струму кола навантаження $I_{d\max}/I_d$	1,15	1,08	1,04	1,33	1,16	1,08	1,77	1,35	1,18
Мінімальне значення струму кола навантаження $I_{d\min}/I_d$	0,77	0,91	0,96	0,58	0,82	0,91	0,12	0,63	0,81
Мінімальне значення $[X_d/R_d]_{\min}$, яке підтримує режим неперервного струму i_d	режиму перервного струму не існує			0,3			1,73		
Коефіцієнт пульсацій струму навантаження (%)	2,58	1,132	0,574	8,08	3,317	1,665	8,61	3,774	1,915

$$q_1 = \frac{U_m \sqrt{3}}{2\pi 6Z_d} = \frac{U_m \sqrt{3}}{2\pi 6Z_d} \times \frac{6R_d \pi}{3U_m(6-n)} = \frac{U_{d0} \times \frac{6-n}{6}}{R_d} \quad (4)$$

$$= \frac{\sqrt{3}R_d}{30\sqrt{R_d^2 + X_d^2}} = \frac{\sqrt{3}}{30\sqrt{1 + \frac{X_d^2}{R_d^2}}}$$

б) вилучення двох вентилів зі схеми. В даному випадку в ряді розкладу струму навантаження переважає друга гармоніка (2) частотою 100 Гц. Виконуючи аналогічні перетворення та зважаючи, що індуктивний опір кола навантаження для другої гармоніки $X_{d2}=2X_d$, отримуємо коефіцієнт пульсації випрямленого струму за другою гармонікою

$$q_2 = \frac{1}{3\sqrt{1 + \frac{(2X_d)^2}{R_d^2}}}; \quad (5)$$

в) вилучення трьох вентилів зі схеми. Тут домінує перша гармоніка (3) частотою 50 Гц, відповідно коефіцієнт пульсації випрямленого струму за першою гармонікою дорівнює:

$$q_1 = \frac{\sqrt{3}}{9\sqrt{1 + \frac{X_d^2}{R_d^2}}}. \quad (6)$$

Результати розрахунків коефіцієнтів пульсації струму навантаження за отриманими формулами зведені в табл. 2. Зауважимо, що необхідне значення співвідношення X_d/R_d можна визначити з виразів (4) – (6) залежно від допустимого коефіцієнта пульсації.

Висновки

Пропонована методика дозволяє розрахувати струми кола навантаження трифазного мостового випрямляча для різних співвідно-

шень індуктивного та активного опорів у неповновентильних режимах. Отримано аналітичні вирази для розрахунку коефіцієнтів пульсації та визначені межі існування неперервного струму кола навантаження досліджуваних неповновентильних режимів.

Література

1 Климук П.П. Глибоке дискретне регулювання напруги випрямляча з некерваними вентилями / Климук П.П., Олійник М.Й., Федішин В.Г. // Вісн. Нац. ун-ту «Львівська політехніка». – 2007. – № 587. – С. 27–31.
 2 Олійник М.Й. Вищі гармоніки випрямленої напруги трифазного мостового випрямляча в неповновентильних режимах / М.Й. Олійник, В.Г.Федішин, М.Б. Сабат // Нафтогазова енергетика. – 2017. – № 1(27). – С. 99–102.
 3 Перхач В.С. Теоретична електротехніка. Лінійні кола. – К.: Вища шк., 1992. – 439 с.
 4 Полупроводниковые выпрямители / Беркович Е.И., Ковалев В.Н., Ковалев Ф.И. и др.; под. ред. Ф.И. Ковалева и Т.П. Мостковой. 2-е изд., переработ. – М.: Энергия, 1978 – 448 с., ил.
 5 Мальцева Н.Г. Аналіз роботи трифазного індуктивного мостового випрямляча за умови коретного вилучення з його схеми 2-х та 3-х вентилів / Н. Г. Мальцева, М.Й. Олійник, В.Г.Федішин // Вісник НУ ЛПІ «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2017. – № 170. – С. 55–64.

Стаття надійшла до редакційної колегії 26.04.18

Рекомендована до друку професором **Кондратом О.Р.** (ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ) професором **Сегедою М.С.** (НУ «Львівська політехніка», м. Львів)