

УДК 621.314

DOI: 10.31471/1993-9981-2019-1(42)-65-69

РОЗРАХУНОК СТРУМУ НАВАНТАЖЕННЯ ТРИФАЗНОГО МОСТОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА У НЕПОВНОВЕНТИЛЬНИХ РЕЖИМАХ ЗА НАЯВНОСТІ ФІЛЬТРІВ

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

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

Криві випрямленої напруги неповновентильних режимів трифазної мостової схеми випрямлення мають у своєму складі низку неканонічних вищих гармонік, що призводить до значних пульсацій струму навантаження. Звідси виникає проблема вибору оптимального складу фільтрів з метою доведення коефіцієнта пульсацій струму навантаження до допустимих значень. Проведено аналіз сучасного стану проблеми шляхом вивчення останніх публікацій.

Отримано аналітичні вирази та форми кривих струму навантаження за результатами математичного моделювання впливу на нього резонансних та індуктивних фільтрів вищих гармонік, увімкнених, відповідно, на виводах та у вітці навантаження випрямляча. Розраховано значення коефіцієнта пульсації струму у вітці навантаження для окремих випадків неповновентильного режиму трифазного мостового випрямляча. Наведені у статті криві струмів справедливі для тих форм випрямленої напруги, яка виникає у неповновентильних режимах трифазної мостової схеми випрямлення, та можуть бути отримані за умови відомого складу вищих гармонік вихідної напруги випрямляча. Показано, що установлення резонансного фільтра на частоті найбільшій з гармонік суттєво зменшує коефіцієнт пульсацій струму у вітці навантаження.

У випадку реального резонансного фільтра на виході випрямляча у струмі кола навантаження з'явиться гармоніка, яка буде протікати під дією спаду напруги на активному опорі фільтра. Однак її вплив буде незначним, оскільки активний опір фільтрів, як правило, малий. Дещо зменшиться також рівень гармонічних складових у струмі навантаження внаслідок відгалуження певного значення цих струмів через вітки резонансних фільтрів.

Запропонована методика дозволяє розрахувати струм у колі навантаження випрямляча у неповновентильних режимах з врахуванням певного складу резонансних паралельних і індуктивних послідовних фільтрів для досягнення бажаного рівня пульсацій струму.

Ключові слова: неповновентильний режим, випрямлена напруга, струм навантаження, резонансний фільтр, індуктивний фільтр, коефіцієнт пульсацій.

Кривые выпрямленного напряжения неповновентильных режимов трехфазной мостовой схемы выпрямления имеют в своем составе ряд неканонических высших гармоник, что приводит к значительным пульсациям тока нагрузки. Отсюда возникает проблема выбора оптимального состава фильтров с целью доведения коэффициента пульсаций тока нагрузки до допустимых значений. Проведен анализ современного состояния проблемы путем изучения последних публикаций.

Получены аналитические выражения и формы кривых тока нагрузки по результатам математического моделирования влияния на него резонансных и индуктивных фильтров высших гармоник, включенных соответственно на выводах и в ветке нагрузки выпрямителя. Рассчитано значение коэффициента пульсации тока в ветке нагрузки для отдельных случаев неповновентильного режима трехфазного мостового выпрямителя. Приведенные в статье кривые токов справедливы для форм выпрямленного напряжения, которое возникает в неповновентильных режимах трехфазной мостовой схемы выпрямления, и могут быть получены при известном составе высших гармоник выходного напряжения выпрямителя. Показано, что установленные резонансного фильтра на частоте крупнейшей из гармоник существенно уменьшает коэффициент пульсаций тока в ветке нагрузки.

В случае реального резонансного фильтра на выходе выпрямителя в токе цепи нагрузки появится гармоника, которая будет протекать под действием падения напряжения на активном сопротивлении фильтра. Однако ее влияние будет незначительным, поскольку активное сопротивление фильтров, как правило, мало.

Несколько уменьшится также уровень гармонических составляющих в токе нагрузки вследствие ответвления определенного значения этих токов через ветки резонансных фильтров.

Предложенная методика позволяет рассчитать ток в цепи нагрузки выпрямителя в неповновентильных режимах с учетом определенного состава резонансных параллельных и индуктивных последовательных фильтров для достижения желаемого уровня пульсаций тока.

Ключевые слова: неповновентильный режим, выпрямленное напряжение, ток нагрузки, резонансный фильтр, индуктивный фильтр, коэффициент пульсаций.

The curves of the rectified voltage of the non-ventilated modes of the three-phase bridge rectifier circuit have in their composition a number of non-canonical higher harmonics, which results in significant pulsations of the load current. Hence the problem of choosing the optimal composition of filters in order to prove the load current pulsation coefficient to allowable values. The analysis of the current state of the problem is carried out by studying the latest publications.

The analytical expressions and forms of load current curves are obtained based on the results of mathematical modeling of the resonant and inductive filters higher harmonics influence on the outputs and rectifier loads, respectively, on the leads and in the rectifier load cell. The value of the current ripple coefficient in the load cell for the individual cases of the non-ventilated mode of the three-phase bridge rectifier is calculated. The curves of the currents given in this article are valid for those forms of rectified voltage that arises in non-blunt modes of the three-phase bridge rectifier scheme, and can be obtained under the condition of a known composition of higher harmonics of the output voltage of the rectifier. It is shown that the establishment of a resonance filter at the frequency of the largest harmonic significantly reduces the current pulsation coefficient in the load cell.

In the case of a real resonance filter at the output of the rectifier in the current of the load circuit there will be a harmonic, which will proceed under the action of a voltage drop on the active resistance of the filter. However, its effect will be negligible, since the active resistance of the filters is usually small. The level of harmonic components in the load current will also diminish somewhat as a result of the branching of a certain value of these currents through the branches of the resonant filters.

The proposed method allows to calculate the current in the recirculation load cell in non-ventilated modes, taking into account a certain composition of resonant parallel and inductive serial filters to achieve the desired level of current pulsations.

Keywords: non-bloc mode, rectified voltage, load current, resonance filter, inductive filter, pulsation coefficient.

Постановка проблеми. Криві випрямленої напруги неповновентильних режимів трифазної мостової схеми випрямлення мають у своєму складі низку неканонічних вищих гармонік [1], що призводить до значних пульсацій струму навантаження. Звідси виникає проблема вибору оптимального складу фільтрів з метою доведення коефіцієнта пульсацій струму навантаження до допустимих значень.

Аналіз останніх досліджень. Вплив індуктивного фільтра на склад і кількісні значення вищих гармонік струму навантаження у неповновентильних режимах трифазного мостового випрямляча досліджені в [2]. Однак досягнення незначних пульсацій струму

навантаження у таких режимах досягається лише за великих значень співвідношення індуктивного та активного опорів вітки навантаження. Автори пропонують альтернативний шлях зменшення пульсацій випрямленого струму без істотного збільшення індуктивного опору вітки навантаження.

Виклад основного матеріалу. Знання коефіцієнтів розкладу у ряди Фур'є випрямленої напруги неповновентильних режимів трифазної мостової схеми випрямлення дозволяє створити розрахункову схему (рис.1) та дослідити вплив на форму струму кола навантаження резонансних та індуктивних фільтрів.

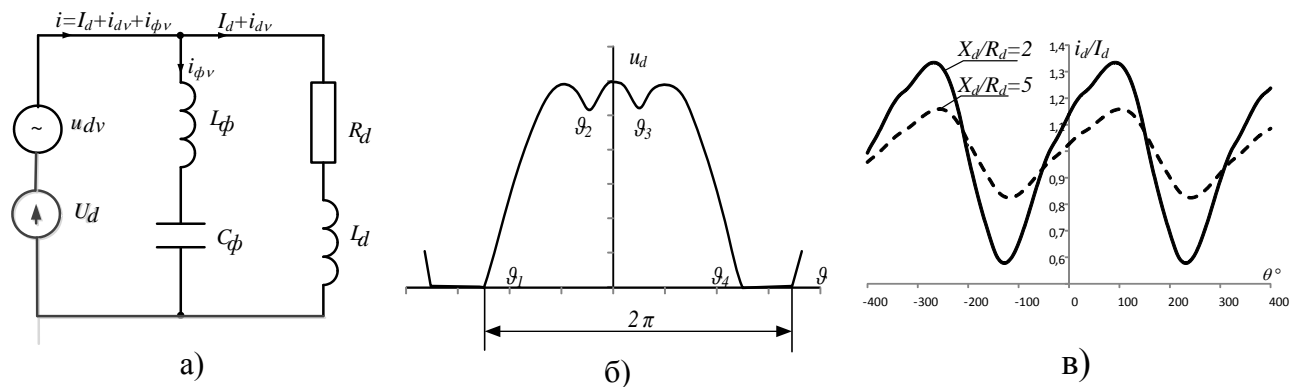


Рисунок 1 – Розрахункова схема (а), крива випрямленої напруги (б) та форми струму навантаження за наявності тільки індуктивного фільтра у вітці навантаження (в) і відсутності резонансного фільтра.

Якщо допустити, що резонансний фільтр v -тої гармоніки ідеальний, тобто його активний опір $r_{\phi v}=0$, а його реактивні опори рівні $v\omega L=1/(v\omega C)$, то струм v -тої гармоніки у струмі навантаження буде відсутнім ($i_{dv}=0$), оскільки він ($i_{\phi v}$) цілком замкнеться через нульовий резонансний опір фільтра. Щоб отримати та оцінити форму результуючого струму вітки навантаження, достатньо вилучити з розрахункових формули (1)-(3), що наведені у [2], складову v -тої гармоніки, резонансний

фільтр якої увімкнений паралельно до навантаження.

Нижче для ілюстрації дії фільтрів наведені аналітичні вирази струму навантаження для неповновентильного режиму з вилученням двох вентилів різних плеч і груп для режиму без фільтрів (1), за наявності фільтра тільки першої гармоніки (2), за наявності тільки фільтра другої гармоніки (3) та одночасного увімкнення фільтрів першої і другої гармонік (4).

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

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

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

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

Така методика досить легко дозволяє отримати форму струму кола навантаження та оцінити вплив на неї як індуктивного, так і резонансного фільтрів.

На рис. 2 наведені криві струму кола навантаження з урахуванням впливу тільки індуктивного фільтру (крива 1) та сумісної дії індуктивного і резонансного фільтрів відповідно другої (крива 2) та першої (крива 3) гармонік та одночасно першої й другої гармонік (крива 4) для неповновентильних режимів з видаленням двох вентилів різних плеч. Криві побудовані за співвідношення результуючого індуктивного

опору кола навантаження до активного $x_d/r_d=2$ та $x_d/r_d=5$. Із формули струму видно, що перша і друга гармоніки для даного режиму співмірні, однак кращий результат досягається під час увімкнення резонансного фільтра першої з ряду гармонійного розкладу.

У табл. 1 наведені значення коефіцієнта пульсацій струму навантаження для режиму вилучення одного вентиля та для режиму вилучення двох вентилів різних плеч і груп за різного складу фільтрів та різного відношення опорів X_d/R_d у колі навантаження.

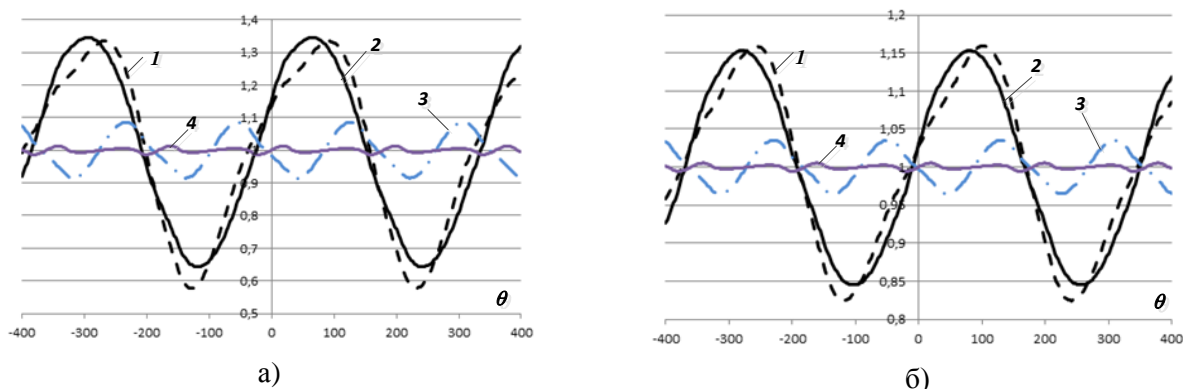


Рисунок 2 – Форма струму вітки навантаження для режиму видалення двох вентилів різних плеч:

а) $X_d/R_d=2$; б) $X_d/R_d=5$; 1 – наявний тільки індуктивний фільтр у вітці навантаження; 2 – індуктивний фільтр та резонансний фільтр 2-ї гармоніки; 3 – індуктивний фільтр та резонансний фільтр 1-ї гармоніки; 4 – індуктивний фільтр та одночасно фільтри 1-ї та 2-ї гармонік.

Таблиця 1– Значення коефіцієнта пульсацій випрямленого струму для різних значень X_d/R_d та різного складу фільтрів гармонік струму.

Відношення X_d/R_d	2				5			
	Без фільтрів	1	2	1 і 2	Без фільтрів	1	2	1 і 2
Вилучення одного вентиля								
Коефіцієнт пульсацій	0,198	0,086	0,169	0,032	0,084	0,035	0,067	0,012
Вилучення двох вентилів різних плеч і груп								
Коефіцієнт пульсацій	0,396	0,086	0,353	0,013	0,169	0,035	0,154	0,005

Наступні вищі гармоніки у кривих струму кола навантаження фільтруються за допомогою індуктивного фільтра (або індуктивності кола навантаження). Зауважимо, що у випадку реального резонансного фільтра ($r_{\phi} \neq 0$) v -тої гармоніки на виході випрямляча у струмі кола навантаження з'явиться означена гармоніка, яка буде протікати під дією спаду напруги на активному опорі фільтра. Однак її вплив буде незначним, оскільки активний опір фільтрів, як правило, малий. Дещо зменшиться також рівень гармонічних складових у струмі навантаження внаслідок відгалуження певного значення цих струмів через вітки резонансних фільтрів.

Висновок.

Запропонована методика дозволяє розрахувати струм у колі навантаження випрямляча у неповновентильних режимах з врахуванням певного складу резонансних паралельних і індуктивних послідовних фільтрів для досягнення бажаного рівня пульсацій струму.

Література

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

2. Олійник М.Й., Мальцева Н.Г., Сабат М.Б., Федішин В.Г. Аналіз пульсацій випрямленого струму трифазного мостового випрямляча у неповновентильних режимах. Всеукраїнський науково-технічний журнал «Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ». – 2018. № 2(67). с. 27 – 30.

3. Олійник М.Й., Федішин В.Г., Сабат М.Б. Вищі гармоніки випрямленої напруги трифазного мостового випрямляча в неповновентильних режимах. Всеукраїнський

науково-технічний журнал «Нафтова енергетика». – 2017. № 1(27). с. 99 – 102.

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

5. Мальцева Н. Г., М.Й. Олійник, В.Г.Федішин. Аналіз роботи трифазного індуктивного мостового випрямляча за умови коретного вилучення з його схеми 2-х та 3-х вентилів. Вісник НУ ЛП «Електроенергетичні та електромеханічні системи». – 2017р. № 170. с. 55 – 64.

References

1.Klimuk P.P., Olijnik M.J., Fedishin V.G. Gliboke diskretne reguluvannya naprugi vipryamlyacha z nekerovanimi ventilyami. Visn. Nac. un - tu «Lvivska politehnika». – 2007r. № 587. s. 27 – 31.

2. Olijnik M.J., Malceva N.G., Sabat M.B., Fedishin V.G. Analiz pulsacij vipryamlenogo strumu trifaznogo mostovogo vipryamlyacha u nepovnoventilnih rezhimah. Vseukrayinskij naukovo-tehnicnij zhurnal «Rozvidka ta rozrobka naftovih i gazovih rodovish». – 2018. № 2(67). s. 27 – 30.

3. Olijnik M.J., Fedishin V.G., Sabat M.B. Vishi garmoniki vipryamlenoyi naprugi trifaznogo mostovogo vipryamlyacha v nepovnoventilnih rezhimah. Vseukrayinskij naukovo-tehnicnij zhurnal «Naftova energetika». – 2017. № 1(27). s. 99 – 102.

4. Perhach V.S. Teoretichna elektrotehnika. Linijni kola. – K.: Visha shk., 1992. – 439 s.

5. Malceva N. G., M.J. Olijnik, V.G.Fedishin. Analiz roboti trifaznogo induktivnogo mostovogo vipryamlyacha za umovi koretного viluchennya z jogo shemi 2-h ta 3-h ventiliv. Visnik NU LP «Elektroenergetichni ta elektromehaniczni sistemi». – 2017r. № 170. s. 55 – 64.