

## АНАЛІЗ РОБОТИ ТРИФАЗНОГО НЕКЕРОВАНОГО МОСТОВОГО ВИПРЯМЛЯЧА ЗА УМОВИ КОРЕКТНОГО ВИЛУЧЕННЯ З ЙОГО СХЕМИ ДВОХ ТА ТРЬОХ ВЕНТИЛІВ

© Мальцева Н. Г., Олійник М. Й., Федішин В. Г., 2017

Проаналізовано режим роботи трифазного некерованого мостового випрямляча з коректно вилученими зі схеми двома та трьома вентилями за суто активного та активно-індуктивного характеру навантаження. Подано тлумачення незмінності форми випрямленої напруги під час переходу від активного до активно-індуктивного характеру навантаження у випадку вилучення двох вентилів та пояснено причини зміни форми випрямленої напруги за тих самих умов у випадку вилучення трьох вентилів. Визначено склад і значення вищих гармонік випрямленої напруги та наведено енергетичні характеристики новоутворених схем випрямлення. Матеріал статті має навчально-практичний характер.

*Ключові слова:* випрямляч, характер навантаження, ряд Фур'є.

The operation mode of a three-phase uncontrolled bridge rectifier has been analysed when two or three gates are correctly removed from the circuit under active and active-inductive nature of load. We provide an explanation of the unchanged form of rectified voltage during transition from active to active-inductive nature of load when two gates are removed, also the reasons for the changed form of rectified voltage are explained under the same conditions when three gates are removed. The composition and value of higher harmonics of rectified voltage are identified, and energy characteristics for the newly created rectification circuits are provided. The article is of educational and practical character.

*Key words:* rectifier, nature of load, Fourier series.

### Постановка проблеми

Режими роботи схем випрямлення, що утворюються з трифазного мостового випрямляча після коректного вилучення з його схеми окремих вентилів для суто активного характеру навантаження, розглянуто в [1]. Під коректним слід розуміти таке вилучення, що не призводить до розриву кола протікання випрямленого струму. Таке перетворення вихідної схеми можна створити штучно для дискретного регулювання випрямленої напруги або воно може виникнути у разі перегорання запобіжників захисту вентилів у плечах трифазної мостової схеми. Зміна характеру навантаження у новоутворених схемах випрямлення призводить до зміни умов вступу вентилів у роботу. Відповідно змінюються енергетичні показники схеми, зокрема, середнє значення випрямленої напруги, тривалість провідного стану вентилів, середнє значення комутаційних втрат, склад вищих гармонік кривої випрямленої напруги тощо. Звідси випливає необхідність поглибленого дослідження режимів роботи новоутворених схем випрямлення.

### Аналіз останніх досліджень

Способи дискретного регулювання напруги живлення споживачів змінного та постійного струму наведені в роботах [1, 2]. Зокрема у роботі [2] виведено залежності для розрахунку середнього значення випрямленої напруги для неповновентильних режимів роботи трифазного

мостового випрямляча за умови його роботи на активне навантаження. За такого способу регулювання змінюється форма кривої випрямленої напруги  $i$ , відповідно, склад її вищих гармонік. У публікації [3] наголошено на необхідності та актуальності дослідження спектра вищих гармонік напруги та струму випрямляча. Вплив вищих гармонік на систему електропостачання в нормальних режимах розглянуто в [4], а в несиметричних режимах – у публікації [5]. Однак у названих публікаціях не проаналізовано процеси, що відбуваються у неповновентильних режимах. Зокрема, зміна характеру навантаження від активного до активно-індуктивного зумовлює цікаві явища, які виникають під час вилучення зі схеми двох чи трьох вентилів та не були досліджені раніше. Розмаїття методик розрахунку вищих гармонійних складових відображено в роботі [6]. Автори цієї статті використали класичну методику розкладу в ряд Фур'є [7].

### Виклад основного матеріалу

Нижче наведено результати аналізу роботи неповновентильного трифазного некерваного випрямляча, зокрема за умови коректного вилучення зі схеми двох та трьох вентилів (рис. 1, а, б) і результати впливу зміни характеру навантаження на енергетичні показники випрямляча.

Відомо [8], що трифазна мостова схема випрямляє міжфазну напругу та ще й ту, яка найбільша у поточний момент часу. З вилученням зі схеми двох вентилів (в нашому випадку першого та шостого) випрямлена напруга формуватиметься лише міжфазними напругами  $u_{cb}$ ,  $u_{ab}$  та  $u_{ac}$  (див. рис. 2, б), які є найбільшими на ділянках формування випрямленої напруги. Струми вентилів (рис. 2, в–е) повторюють форму випрямленої напруги на своїх ділянках провідності. Тривалість провідного стану третього та четвертого вентилів становить  $T=\pi$ , а п'ятого та другого –  $T=2\pi/3$ . Струми фаз А та В однонаправлені та протилежні за знаком, струм фази С знакозмінний та повторює форми струмів п'ятого та другого вентилів. Випрямлений струм повторює форму випрямленої напруги.

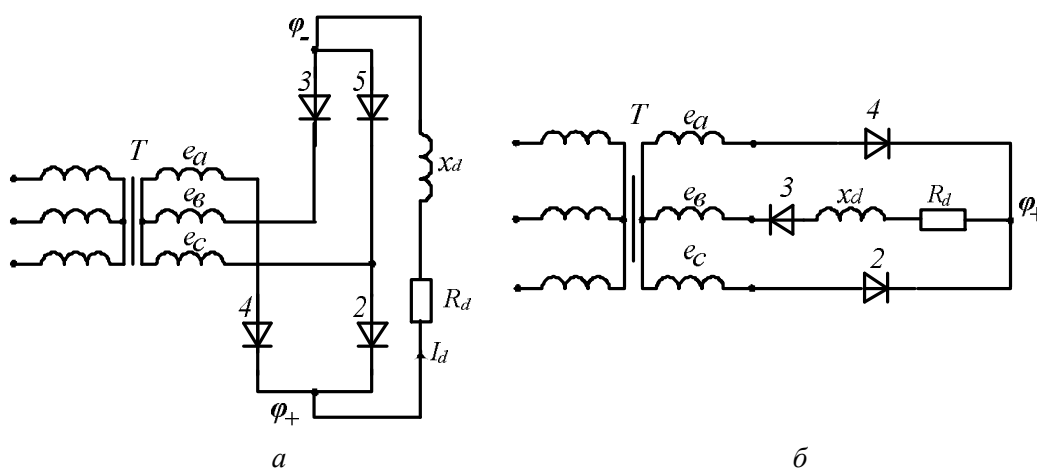


Рис. 1. Новоутворені схеми з двома (а) та з трьома (б) вилученими вентилями

Якщо взяти до уваги умови вступу в роботу вентилів окремих груп [8], то із катодної групи у провідному стані буде той вентиль, потенціал аноду якого має найвище значення, а із анодної групи у провідному стані буде вентиль, потенціал катода якого має найнижче значення. За цих умов формуються потенціали відповідно додатного  $\phi_+$  та від'ємного  $\phi_-$  полюсів випрямляча (рис. 2, а). Побудова кривої випрямленої напруги за виразом  $u_d = j_+ - j_-$  дає такий самий результат, як і побудова за допомогою міжфазних напруг. З рівності додатного та від'ємного потенціалів на нульовій ділянці випрямленої напруги випливає, що навантаження зашунтоване одночасно відкритими п'ятим та другим вентилями, однак на цій ділянці випрямлений струм  $i_d$  дорівнює нулю, оскільки немає жодної електрорушійної сили в колі навантаження. Виникнення режиму

шунтування стане зрозумілішим, якщо розглядати функціонування новоствореної схеми випрямлення за умови активно-індуктивного характеру навантаження.

Навіть найменша індуктивність в колі навантаження сповільнює зменшення випрямленого струму  $i_d$ , що призведе до збільшення тривалості провідного стану п'ятого вентиля (рис. 3 б, в). Струм у навантаженні підтримується ще деякий час за рахунок накопиченої енергії. Коло протікання випрямленого струму  $i_d$  створюється провідним станом п'ятого та другого вентилів, четвертий вентиль у момент виникнення короткозамкнутого контуру  $J_{к.з.}$  (рис. 3 а, д) припиняє свою роботу, оскільки його напруга між анодом та катодом  $u_{ac} = 0$  і надалі стає від'ємною. Якщо індуктивність у колі навантаження незначна, то  $i_d$  спаде до нуля, струми п'ятого та другого вентилів також дорівнюватимуть нулю.

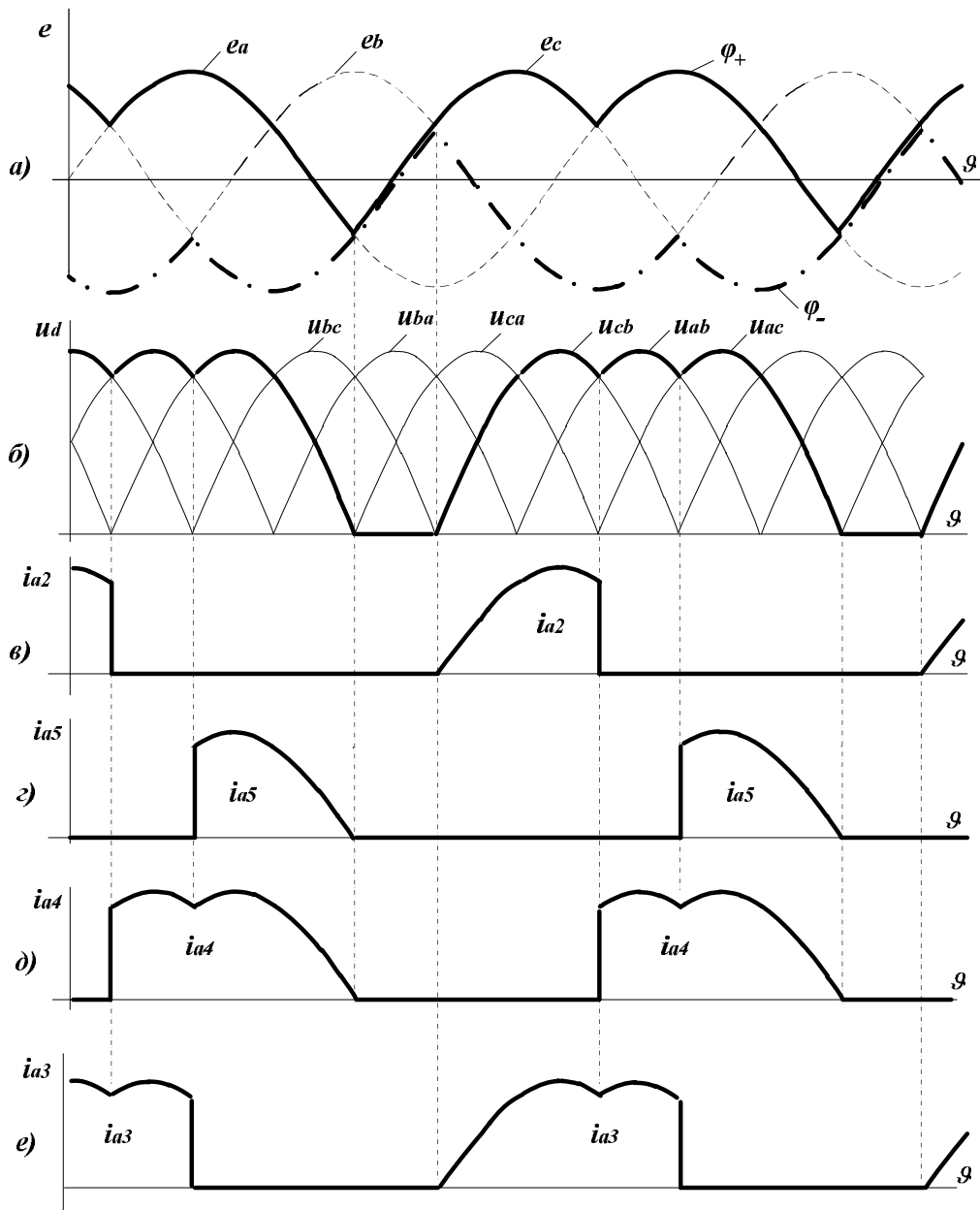


Рис 2. Форми струмів та напруг випрямляча з двома вилученими вентилями за суто активного характеру навантаження

Тривалість провідного стану п'ятого вентиля збільшилась, але менша за  $180^\circ$ . Струм другого вентиля складається з двох ділянок: перша відповідає режиму шунтування, а друга тривалістю у

120° створюється під час формування випрямленої напруги  $u_d$  за рахунок напруги  $u_{cb}$ . Нульове значення випрямленої напруги на інтервалі  $T = \pi/3$  підтримується за рахунок режиму шунтування зі струмом  $i_d \neq 0$  чи без нього  $i_d = 0$ .

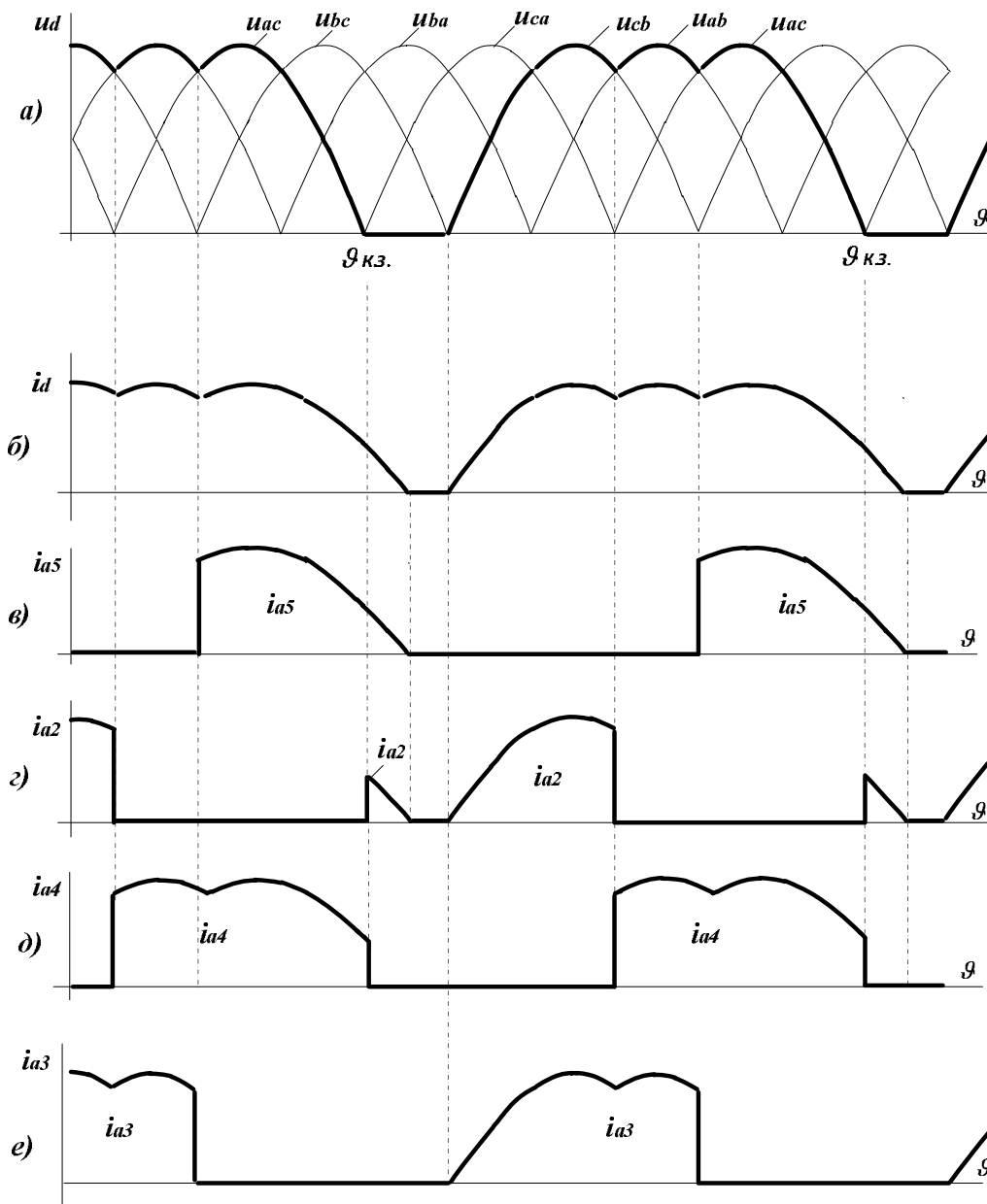


Рис. 3. Форми струмів та напруг новоутвореної схеми за активно-індуктивного навантаження (індуктивний опір  $x_d$  незначний)

За деякого значення індуктивності у колі навантаження випрямлений струм стане безперервним, а подальше її зростання веде до зменшення пульсацій випрямленого струму. Режим шунтування навантаження за умови безперервного струму триває  $T = \pi/3$ , відповідно випрямлена напруга  $u_d = 0$ . Тривалість провідного стану всіх вентилів новоутвореної схеми за умови безперервного струму стає однаковою і становить  $T = \pi$ . Процеси в схемі з врахуванням комутації вентилів та безмежно великої індуктивності в колі навантаження ( $x_d \rightarrow \infty$ ) зображено часовими діаграмами струмів та напруг на рис. 4, де криву зміни потенціалу від'ємного полюсу зображено дещо нижче за її природне положення.

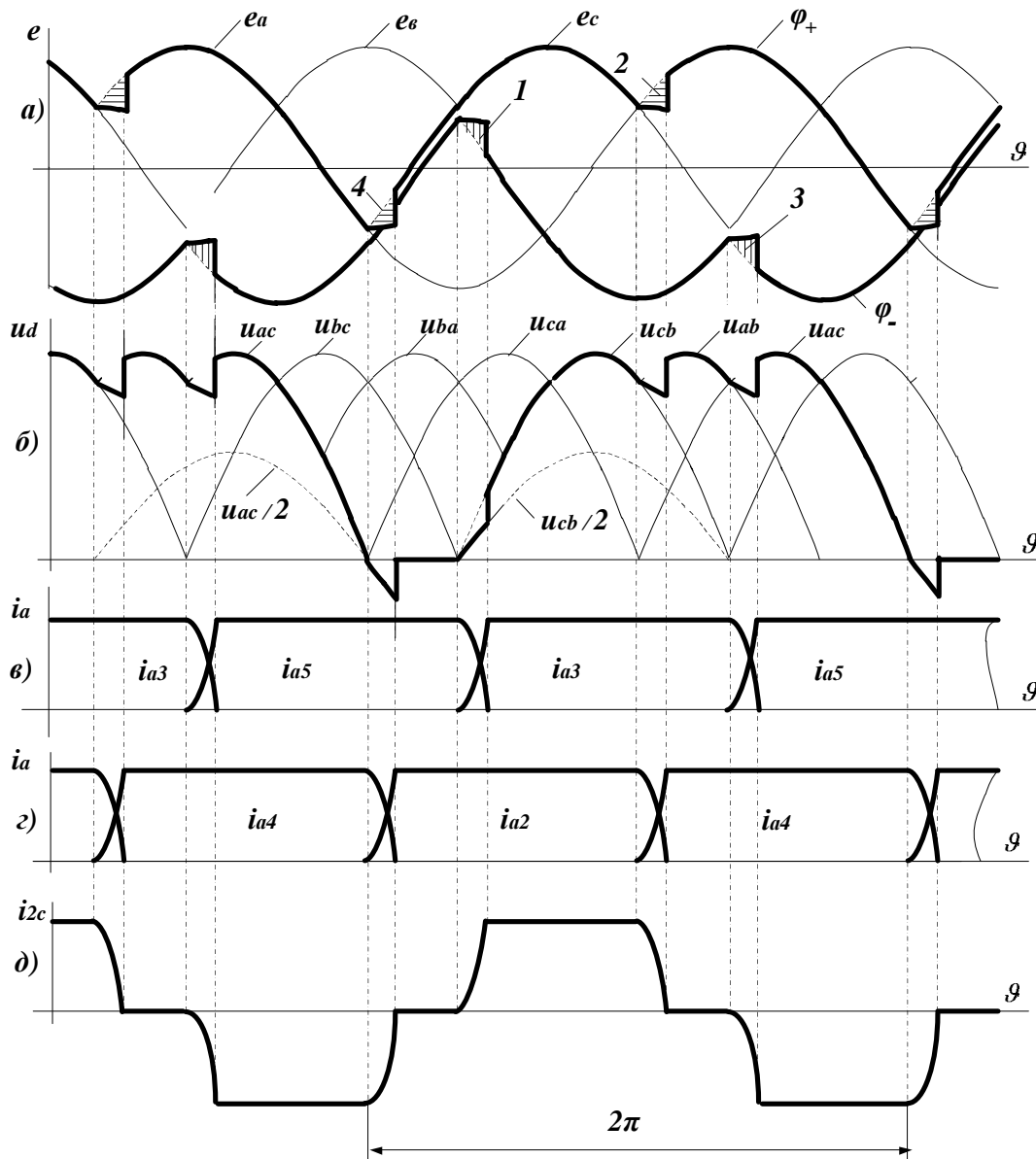


Рис. 4. Форми струмів та напруг новоутвореної схеми з врахуванням комутаційних процесів та за активно-індуктивного навантаження (індуктивний опір  $x_d \rightarrow \infty$ )

Отже, характер навантаження – суто активний чи активно-індуктивний – не впливає на форму випрямленої напруги у випадку вилучення двох вентилів різних груп та плеч. Її середнє значення без врахування комутаційних процесів визначається з виразу [1]

$$U_{dn} = \frac{6-n}{6} U_{d0}, \quad (1)$$

де  $n$  – кількість вилучених вентилів схеми,  $U_{d0}$  – середнє значення випрямленої напруги за умови роботи повновентильного трифазного мостового випрямляча.

За активно-індуктивного характеру навантаження ( $x_d \rightarrow \infty$ ) можливі чотири комутації за період повторюваності процесів: дві в анодній групі 1 та 3 і дві в катодній групі 4 та 2 (див. рис. 4, а). Відповідно середнє значення випрямленої напруги

$$U_{dn} = \frac{6-n}{6} U_{d0} - 4\Delta U_{dg}. \quad (2)$$

У новоутвореній схемі, як і в повновентильній схемі трифазного мостового випрямляча, комутації струмів вентилів відбуваються за дії міжфазних напруг, тому середнє значення однієї

комутаційної втрати напруги буде пропорційне добутку випрямленого струму  $I_d$  та індуктивного опору трансформатора  $x_a$  і обернено пропорційне періоду повторюваності процесів у схемі [8], а саме

$$\Delta U_{dg} = \frac{I_d x_a}{2p} \quad (3)$$

Окремо слід пояснити комутаційні процеси на ділянці режиму к.з. у схемі. Рівність додатного та від'ємного потенціалів на цій ділянці порушується. Зокрема під час комутації четвертого та другого вентилів (ділянка 4) потенціал додатного полюсу буде визначатися півсумою напруг фаз, що комутуються  $(u_a + u_c)/2$ , потенціал від'ємного полюсу – напругою фази  $u_c$ . Миттєве значення випрямленої напруги на цій ділянці визначатиметься з виразу  $u_d = \varphi_+ - \varphi_- = (u_a + u_c)/2 - u_c = (u_a - u_c)/2$ . На рис. 4, б цю напругу зображено штриховою лінією  $u_{ac}/2$ . Аналогічно можна показати, що миттєве значення випрямленої напруги на ділянці 1 визначатиметься за виразом  $u_d = u_{cb}/2$ .

Також зауважимо, що струм фази, яку під'єднано до неушкодженого плеча (у нашому випадку фаза С), такий самий, як і в повновентильному режимі трифазної мостової схеми випрямлення (рис. 4, д).

Склад та значення вищих гармонік кривої випрямленої напруги визначаємо за відомими формулами розкладу у ряд Фур'є [7]. Якщо змістити початок координат, то можна побачити, що крива випрямленої напруги (рис. 2, б) симетрична відносно осі ординат. У формулі розкладу таких кривих відсутні синусні складові, а наявні лише косинусні [7]. Значення коефіцієнтів ряду Фур'є з першого по вісімнадцятий наведено в табл. 1. У формулі ряду розкладу відсутні непарні вищі гармоніки, водночас наявна перша гармоніка та вищі гармоніки, кратні двом.

Таблиця 1

Коефіцієнти  $A_v$  ряду Фур'є кривої випрямленої напруги (рис. 2, б)

№ гармоніки $v$	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18
Значення коефіцієнту $A$	$\frac{1}{2}$	$-\frac{2}{3}$	$\frac{2}{15}$	$\frac{4}{35}$	$\frac{2}{63}$	$-\frac{2}{99}$	$-\frac{4}{99}$	$-\frac{2}{195}$	$\frac{2}{255}$	$\frac{4}{323}$

У випадку вилучення трьох вентилів новоутворену схему зображено на рис. 1, б. На полюсах такого випрямляча можуть з'явитися лише міжфазні напруги  $u_{ab}$  та  $u_{cb}$ , які й сформулюють випрямлену напругу  $u_d$ , форму якої за суто активного характеру навантаження наведено на рис. 5.

За наявності найменшої індуктивності в колі навантаження форма випрямленої напруги змінюється (рис. 6). Це пояснюється так. **Індуктивність** в колі навантаження протидіє зміні випрямленого струму. Зростання та спадання випрямленого струму сповільнюються. Відповідно тривалість провідного стану вентиля  $i_{ad}$ , який завершує формування випрямленого струму, збільшуватиметься за рахунок накопиченої (акумуляованої) енергії в індуктивності навантаження, яка власне підтримує струм у навантаженні. Це призведе до появи у кривій випрямленої напруги ділянки з від'ємним значенням. Залежно від кількості цієї енергії (величини індуктивності) можливі три випадки: 1) четвертий вентиль перейде у закритий стан ще до створення умов вступу в роботу другого вентиля; 2) четвертий вентиль перейде у закритий стан після завершення комутації з другим вентилям, але накопиченої енергії в індуктивності не вистачить для підтримання у провідному стані другого вентиля до моменту появи додатних значень напруги  $u_{cb}$  (для створення безперервного випрямленого струму); 3) накопиченої в індуктивності енергії достатньо для підтримання у провідному стані другого вентиля аж до появи додатних значень напруги  $u_{cb}$ , тобто для створення безперервного випрямленого струму.

Криві струмів та напруг для першого випадку зображено на рис. 6. Випрямлений струм перервний, але має більшу тривалість за рахунок збільшення провідного стану тільки четвертого вентиля. Крива випрямленої напруги має від'ємні значення, що зменшує її середнє значення.

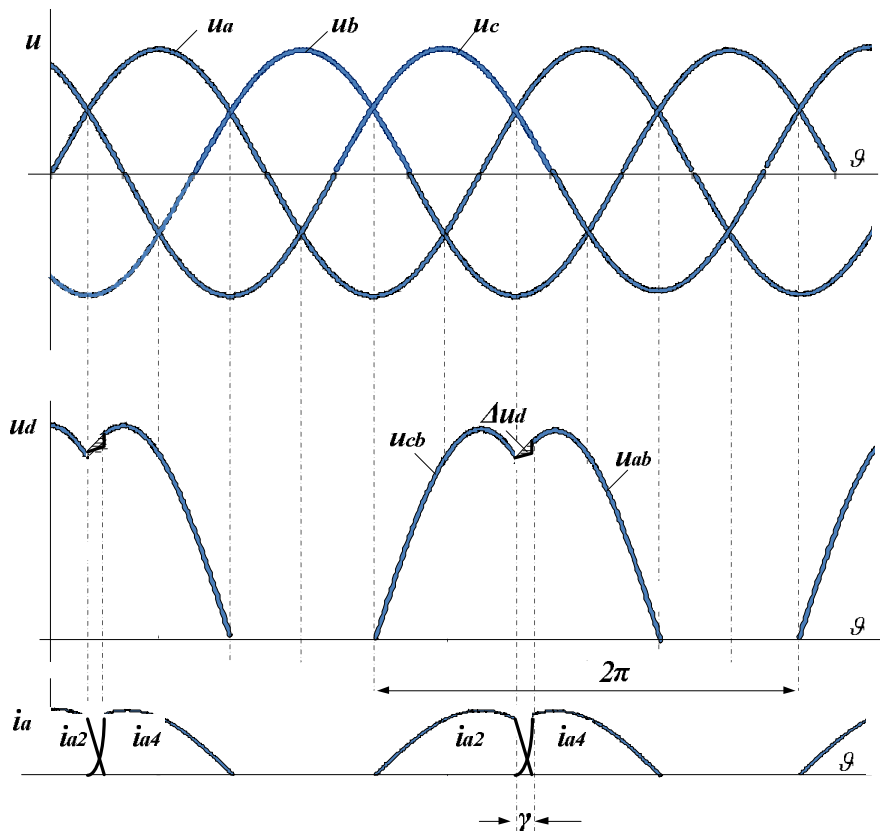


Рис. 5. Струми та напруга випрямляча з трьома вилученими вентилями (рис. 1,б) за умови суто активного навантаження

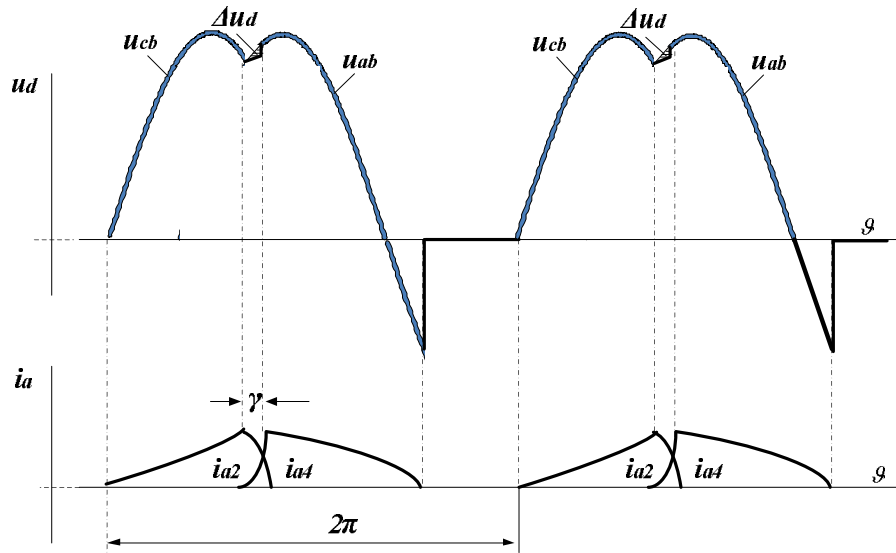


Рис. 6. Струми та напруга випрямляча з трьома вилученими вентилями за умови активно-індуктивного навантаження (індуктивний опір незначний  $x_{d1}$ )

**Збільшення індуктивності** кола навантаження збільшує тривалість провідного стану четвертого вентиля. Нагадуємо, що четвертий вентиль знаходиться у провідному стані завдяки накопиченій енергії в індуктивності. Водночас наближається умова вступу в роботу другого вентиля. За відсутності шостого вентиля (у вихідній мостовій схемі) умови вступу другого змінюються, він вступає в роботу, коли  $u_{ca} > 0$  або  $u_{cb} > 0$ . Другий вентиль вступить у роботу,

якщо тривалість провідного стану четвертого вентиля досягне значення  $T=\pi$ . У цей момент напруга  $u_{ca}$  стає більшою від нуля. Настає чергова комутація вентилів: четвертий виходить з роботи, а другий вступає в роботу. Після завершення процесу комутації струм у навантаженні (він же струм другого вентиля) і надалі підтримується накопиченою енергією індуктивності. До навантаження буде прикладено напругу  $u_{cb}$ , яка ще від'ємна. Другий вентиль вийде з роботи, щойно всю енергію буде витрачено і вступить повторно в роботу, коли напруга  $u_{cb}$  стане додатною. Надалі процеси в схемі повторюються. Випрямлений струм залишається перервним. Вказане зображено кривими струмів та напруг (рис. 7).

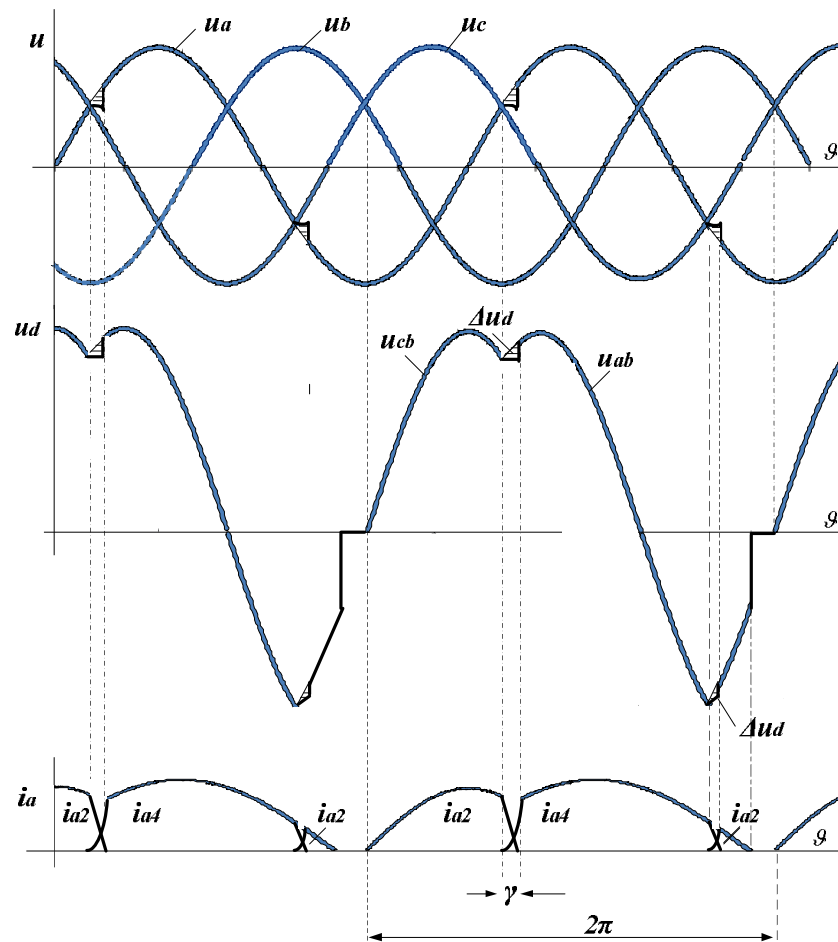


Рис. 7. Струми та напруга випрямляча у схемі рис. 1, б за активно-індуктивного навантаження ( $x_{d2} > x_{d1}$ )

За безмежно великого індуктивного опору ( $x_d \rightarrow \infty$ ) в колі навантаження випрямлений струм стає неперервним (рис. 8), другий та четвертий вентиля комутують кожних півперіоду, тривалість ділянок комутації стає однаковою, тривалість провідного стану вентилів також однакова і становить  $T= \pi$ . Випрямлена напруга стає симетричною. Середнє значення (без врахування комутаційних втрат) визначається за виразом

$$U_d = \frac{1}{2p} \left[ \int_{-p}^0 \sqrt{2}\sqrt{3}U_2 \cos\left(J + \frac{p}{6}\right) + \int_0^p \sqrt{2}\sqrt{3}U_2 \cos\left(J - \frac{p}{6}\right) \right]$$

та становить

$$U_d = \frac{\sqrt{2}\sqrt{3}}{p} U_2. \quad (4)$$



Якщо ж отриманий результат звести до вигляду формули (1), то отримаємо

$$U_d = \frac{3\sqrt{2}\sqrt{3}}{3p} U_2 = \frac{1}{3} U_{d0},$$

тобто за числовим значенням це еквівалентно вилученню чотирьох вентилів зі схеми трифазного мостового випрямляча.

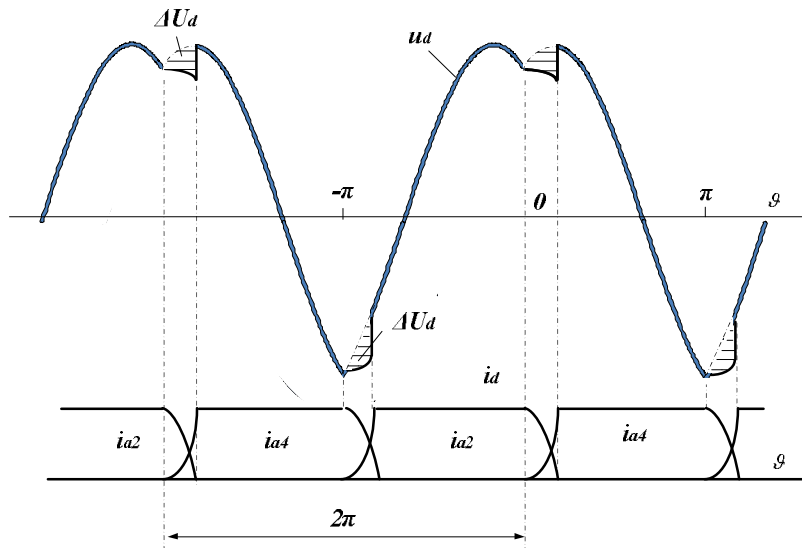


Рис. 8. Струми та випрямлена напруга випрямляча з трьома вилученими вентилями за умови активно-індуктивного навантаження ( $x_d \rightarrow \infty$ )

На інтервалі повторюваності процесів, подібно як в однофазній схемі з виводом нульової точки трансформатора, відбуваються дві комутації вентилів, тому повний аналітичний вираз для визначення середнього значення випрямленої напруги (без виведення) можна записати у вигляді

$$U_{dn} = \frac{6-n}{6} U_{d0} - \frac{I_d x_a}{p}. \quad (5)$$

Криві випрямленої напруги для суто активного (рис. 5) та активно-індуктивного (рис. 8) характеру навантаження без врахування комутаційних процесів досліджено за допомогою рядів Фур'є. Значення коефіцієнтів ряду Фур'є від першого до вісімнадцятого наведено в табл. 2. У формулі ряду розкладу наявна перша гармоніка та вищі гармоніки, кратні трьом, для випадку суто активного характеру навантаження (другий рядок). У випадку активно-індуктивного характеру навантаження склад вищих гармонік змінюється: відсутні гармоніки, кратні трьом (третья, дев'ята, п'ятнадцята ...), водночас наявна перша гармоніка та всі вищі, кратні двом (третій рядок).

Таблиця 2

Коефіцієнти ряду Фур'є кривої випрямленої напруги (рис. 5 та рис. 8)

№ $v$ -ї гармоніки	1	2	3	4*	6	8	9	10	12	14	15	16	18
Значення $A_n (R_d \neq 0, X_d = 0)$	$\frac{\sqrt{3}}{3}$	-	$-\frac{3}{8}$	-	$-\frac{3}{35}$	-	$-\frac{3}{80}$	-	$-\frac{3}{143}$	-	$-\frac{3}{224}$	-	$-\frac{3}{323}$
Значення $A_n (R_d \neq 0, X_d \rightarrow \infty)$	$\frac{\sqrt{3}}{2}$	$-\frac{2}{3}$	-	$-\frac{2}{15}$	$-\frac{2}{35}$	$-\frac{2}{63}$	-	$-\frac{2}{99}$	$-\frac{2}{143}$	$-\frac{2}{195}$	-	$-\frac{2}{255}$	$-\frac{2}{323}$

\*Відсутність відповідного номера в першому рядку означає те, що такої гармоніки немає в обох рядах розкладу

## Висновки

У випадку вилучення двох вентилів різних плеч зі схеми трифазного мостового випрямляча характер навантаження не впливає на форму випрямленої напруги завдяки виникненню режиму шунтування навантаження. У формулі розкладу кривої випрямленої напруги наявна перша гармоніка та гармоніки, кратні двом, непарні гармоніки відсутні.

У новоутвореній схемі, яка виникає під час вилучення трьох вентилів, форма кривої випрямленої напруги залежить від характеру навантаження. Індуктивність у колі навантаження зменшує її середнє значення. Склад та значення вищих гармонік також залежать від характеру навантаження.

Отримані значення коефіцієнтів розкладу в ряди Фур'є дають змогу вибрати склад та розрахувати параметри фільтрів вищих гармонік випрямленої напруги новоутворених схем випрямлення.

1. [http://uapatents.com/4 – 72050 – spocib – diskretnogo – regulyuvannya – naprugi – voltododatnimi – transformatorami.html](http://uapatents.com/4-72050-spocib-diskretnogo-regulyuvannya-naprugi-voltododatnimi-transformatorami.html) target="\_blank" rel="follow" title="База патентів України">Спосіб дискретного регулювання напруги вольтододатними трансформаторами</a>
2. Климук П. П., Олійник М. Й., Федішин В. Г. Глибоке дискретне регулювання напруги випрямляча з некерованими вентилями // Вісн. Нац. у-ту «Львівська політехніка». – 2007. – № 587. С. 27–31.
3. Олійник Ю. С. Аналіз спектру вищих гармонік в системі «випрямляч – інвертор» / Ю.С. Олійник // Збірник наукових праць Харківського університету Повітряних Сил. – Х., 2015. – Вип. 2(43). – С. 93.
4. Резцов В. Ф. Аналіз розповсюдження гармонійних складових напруг і струмів у кабельних лініях фотоелектричних станцій та засобів їх впливу на оточуюче середовище / В. Ф. Резцов, Т. В. Суржик, М. С. Теймузарян // Відновлювана енергетика. – 2014. – № 1. – С. 36–40.
5. Паранчук Я. С. Аналіз гармонік струму магнітно-тиристорного перетворювача напруги у несиметричних режимах / Я. С. Паранчук, О. Г. Плахтина, В. І. Мороз, Д. В. Уханська // Вісн. у-ту «Львівська політехніка». – 2002. – № 582. – С. 151–159.
6. Олійник Ю.С. Аналіз методик розрахунку вищих гармонійних складових / Ю. С. Олійник // Системи озброєння і військова техніка. – 2015. – № 4(44). – С. 88–99.
7. Перхач В. С. Теоретична електротехніка. Лінійні кола. – К.: Вища шк., 1992. – 439 с.
8. Шальовкін О. О., Наливайченко О. М. Перетворювальна техніка: навч. посіб. – Краматорськ: Донбаське ДМА, 2008. – 328 с.