

# ЗАКОНОМІРНІСТЬ ЗМІНИ СТРУМУ ТА ВИПРЯМЛЕНОЇ НАПРУГИ У ТРИФАЗНОМУ ВИПРЯМЛЯЧІ З СЕРЕДНЬОЮ ТОЧКОЮ

Бойко В.С., д.т.н., проф., Шуляк А.А., ст. викл.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки

Ладиженський О.В., Погорєлова О.В., студенти

КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра приладів і систем неруйнівного контролю

**Вступ.** Базовою складовою аналізу електромагнітних процесів у будь-якому перетворювачі електричної енергії з виходом на постійному струмі є дослідження комутаційних процесів та закономірності зміни випрямленої напруги [1, 2]. Результати таких досліджень стосовно випрямляча, реалізованого за трифазною схемою з середньою точкою значною мірою відомі. Однак, проведення досліджень електромагнітних процесів, при яких би враховувалися величини активних опорів  $R$  контуру комутації, більших за його реактивний індуктивний опір, є недостатніми.

**Мета роботи.** Дослідити закономірність зміни струму вентилів перетворювача електричної енергії за трифазною схемою з нулевою точкою залежно від величини активних опорів контуру комутації та струму навантаження. Довести також вплив величин цих опорів на закономірність зміни випрямленої напруги.

**Результати досліджень.** В [3] показано, що у випадку спільної роботи діодів D1 та D3 перетворювача електричної енергії, реалізованого за трифазною схемою з нулевою точкою (рис. 1), випрямлена напруга змінюється відповідно до наведеного нижче співвідношення:

$$\dot{U}_{d(1)} = \frac{\dot{E}_1 / R + \dot{E}_3 / R}{1 / R + 1 / R_H + 1 / R} = \frac{-\dot{E}_2}{2 + R / R_H} . \quad (1)$$

При цьому вважається, що трифазна система напруг мережі живлення є симетричною і математично записується наступним чином:

$$e_1 = E_m \sin(\vartheta + \pi / 6); e_2 = E_m \sin(\vartheta - \pi / 2); e_3 = E_m \sin(\vartheta + 5\pi / 6) . \quad (2)$$

Відповідно вирази струмів діодів D1 та D3 в інтервалі їх спільної роботи у комплексній формі:

$$I_{(1)} = \frac{E_1 - U_d}{R} = \frac{E_1}{R} + \frac{E_2}{R(2 + R / R_H)} ; \quad (3)$$

$$I_{(3)} = \frac{E_3 - U_d}{R} = \frac{E_3}{R} + \frac{E_2}{R(2 + R / R_H)} . \quad (4)$$

Момент початку комутації діода D1 ( $\vartheta = \psi_n$ ) і початок його спільної роботи з діодом D3 розраховується за наступним співвідношенням:

$$\frac{\sin(\vartheta + 90^\circ)}{\sin(\vartheta + 30^\circ)} = 2 + R / R_H. \quad (5)$$

Момент припинення струму діода D3 ( $\vartheta = \psi_k$ ), тобто виходу його з роботи, розраховується наступним чином:

$$\frac{\sin(\vartheta + 90^\circ)}{\sin(\vartheta + 150^\circ)} = 2 + R / R_H. \quad (6)$$

У момент  $\vartheta = \psi_k$  спільна робота діодів D1 і D3 припиняється і в роботі залишається лише діод D1. З рівняння, складеного для схеми рис. 1 по контуру, що проходить через першу вітку і опір навантаження, отримуємо:

$$e_1 = i_{(1)}R + i_{(1)}R_H, \quad \text{або} \quad i_{(1)} = \frac{e_1}{R + R_H}. \quad (7)$$

Співвідношення (7) справедливе для інтервалу  $\psi_k \leq \vartheta \leq (2\pi / 3 + \psi_n)$ . На вказаному інтервалі миттєве значення випрямленої напруги запишеться так:

$$U_{d(2)} = \frac{e_1}{1 + R / R_H}. \quad (8)$$

Побудуємо криві випрямленої напруги, випрямленого струму та струмів діодів для режиму роботи, який характеризується наступними числовими даними:  $E_m = 120 \text{ В}$ ;  $R = 30 \text{ Ом}$ ;  $R_H = 50 \text{ Ом}$ .

За наведених даних відношення  $R/R_H = 0,6$ . При цьому  $\psi_n = -7,6^\circ$ .

Розрахуємо дані для побудови кривих:  $u_d(\vartheta)$ ;  $i_d(\vartheta)$ ;  $i_1(\vartheta)$ ;  $i_2(\vartheta)$ ;  $i_3(\vartheta)$ .

Таблиця 1 – Розрахункові дані для побудови кривих  $u_{d(1)}(\vartheta)$ ;  $i_{d(1)}(\vartheta)$

$\vartheta$	$-7,6^\circ$	$-5^\circ$	$-2,5^\circ$	$0^\circ$	$2,5^\circ$	$5^\circ$	$7,6^\circ$
$U_{d(1)}(B)$	45,75	45,99	46,11	46,15	46,11	45,99	45,75
$i_{d(1)}(A)$	0,915	0,920	0,922	0,923	0,922	0,920	0,915

Таблиця 2 – Розрахункові дані для побудови кривих  $u_{d(2)}(\vartheta)$ ;  $i_{d(2)}(\vartheta)$

$\vartheta$	$7,6^\circ$	$30^\circ$	$60^\circ$	$90^\circ$	$112,4^\circ$
$U_{d(2)}(B)$	45,75	64,95	75,00	64,95	45,75
$i_{d(2)}(A)$	0,915	1,30	1,50	1,30	0,915

Таблиця 3 – Розрахункові дані для побудови кривих  $i_{(1)}(\vartheta)$ ;  $i_{(3)}(\vartheta)$

$\vartheta$	$-7,6^0$	$-5^0$	$-2,5^0$	$0^0$	$2,5^0$	$5^0$	$7,6^0$
$i_{(1)}(B)$	0	0,158	0,310	0,4615	0,612	0,762	0,915
$i_{(3)}(A)$	0,915	0,762	0,612	0,4615	0,310	0,158	0

Побудовані за даними табл. (1 – 3) основні криві електромагнітного процесу (наведені для половини періоду) зображені на рис. 2.

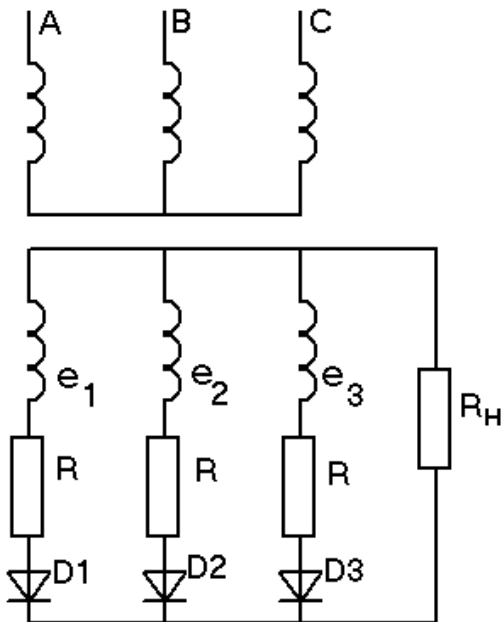


Рисунок 1 – Схема трифазного випрямляча з середньою точкою

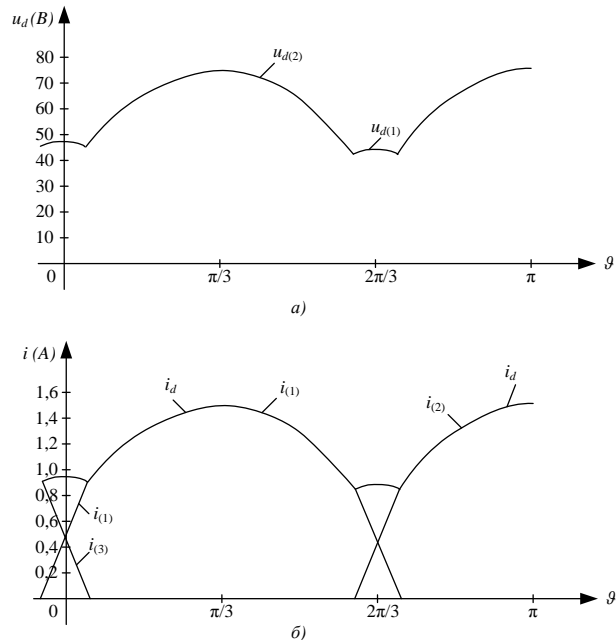


Рисунок 2 – Криві електромагнітного процесу за розрахунком: а) випрямлена напруга  $u_d$ ; б) випрямлений струм  $i_d$  та струм діодів  $i_{(1)}$ ,  $i_{(2)}$

Перевірку результатів аналітичного дослідження електромагнітних процесів у перетворювачі, реалізованому за трифазною схемою з середньою точкою, здійснено з застосуванням системи схмотехнічного моделювання.

Електрична модель перетворювача електричної енергії, реалізована у системі схмотехнічного моделювання Micro-Cap 9, наведена на рис. 3, а деякі результати моделювання – на рис. 4.

Звернімо увагу, що параметри елементів електричної моделі такі ж, як і при аналітичному розрахунку, результати якого наведені вище: амплітудне значення синусоїдних джерел ЕРС складає  $E_m = 120 \text{ В}$ ; їх зсув за фазою відповідає співвідношенням (2); активний опір віток  $R = 30 \text{ Ом}$ ; усі індуктивні елементи мають нульову індуктивність; опір навантаження  $R_H = 50 \text{ Ом}$ .

Порівнявши результати схмотехнічного моделювання з результатами аналітичного розрахунку доходимо висновку щодо адекватності електричного моделювання, оскільки їх результати практично збігаються з результатами аналітичного розрахунку. Деяке розходження у (1...2)% пояснюється тим, що при аналітичному розрахунку діод вважається ідеальним ключем, а у схмотехнічній моделі він задається реальною характеристикою.

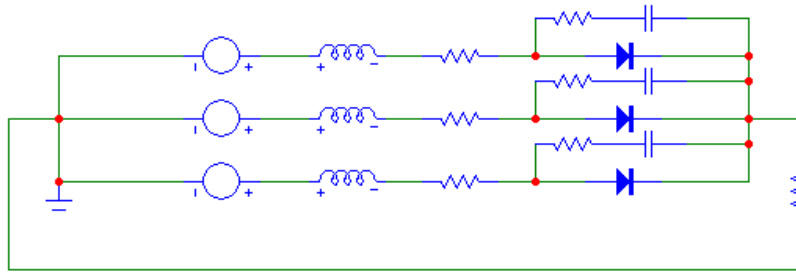


Рисунок 3 – Схема електричної моделі перетворювача у системі схемотехнічного моделювання

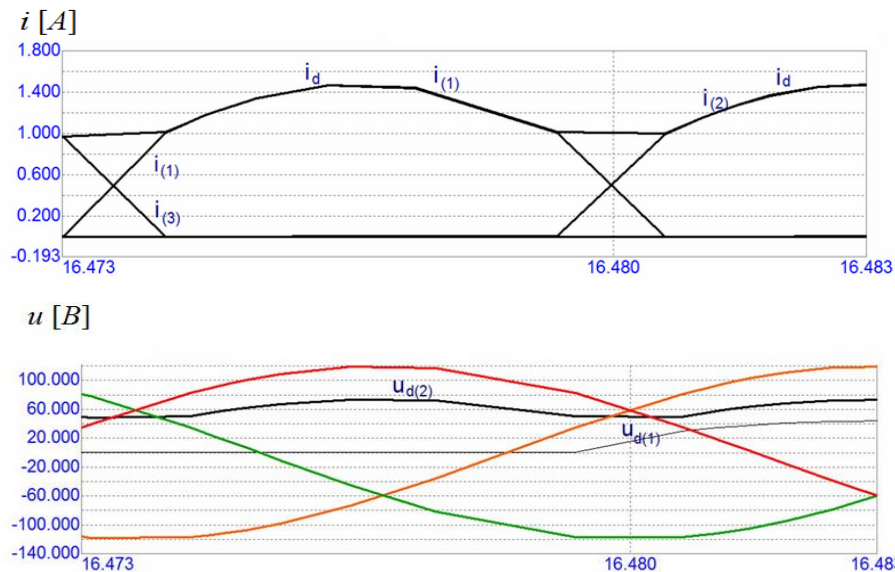


Рисунок 4 – Основні криві електромагнітного процесу за Результатами схемотехнічного моделювання

### Висновки.

1. Результати аналітичних досліджень основних кривих електромагнітного процесу у перетворювачі електричної енергії, реалізованому за трифазною схемою з середньою точкою, збігаються з результатами схемотехнічного моделювання.

2. В інтервалі спільної роботи діодів сусідніх фаз перетворювача закономірність зміни струму близька до лінійної, не зважаючи на те, що аналітичний вираз цієї закономірності є функцією синуса. Останнє пояснюється формою синусоїди у діапазоні кутів від -10 до +10 градусів.

3. За умови нехтування індуктивностями фаз перетворювача електричної енергії, крива випрямленої напруги має таку ж форму, що і крива випрямленого струму.

### Перелік посилань

1. Размадзе Ш.М. Преобразовательные схемы и системы/ Ш.М. Размадзе, - М.: Изд-во "Высшая школа", 1987. - 527 с.
2. Руденко В.С. Основы преобразовательной техники/ В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко - М.: Изд-во "Высшая школа", 1980. - 423 с.
3. Сотник М.І. Енергетичні процеси в електромеханічних системах мереж водопостачання: Автореф.дис. ...докт. наук: ІЕД НАНУ. - К., 2015.- 36 с.