

## СХЕМОТЕХНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У НУЛЬОВОМУ КОМПЕНСАЦІЙНОМУ ВИПРЯМЛЯЧІ

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

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра теоретичної електротехніки*

**Мудрик В.І., Паканич С.І., студенти**

*КПІ ім. Ігоря Сікорського, кафедра автоматизації енергосистем*

**Вступ.** Система схемотехнічного моделювання MICRO-CAP протягом багатьох років використовується спеціалістами у галузі енергетики, електротехніки та перетворювальної техніки для аналізу електромагнітних процесів в усталених і перехідних режимах. Робоче вікно системи є пустим простором, на якому створюється нова схема. Будь-яка розрахункова схема електричного кола чи пристрою створюється і редагується з використанням набору відповідних команд. Перед побудовою схеми на робоче поле виносяться панель найпростіших компонент (аналогових чи цифрових), які потім використовуються при створенні моделі будь-якого пристрою [1].

**Мета роботи.** Створити електричну модель шестипульсного нульового компенсаційного випрямляча і дослідити характер зміни напруги на вентилях  $u_{3в}$  у різних режимах його роботи та зробити висновки стосовно залежності її форми від параметрів елементів перетворювача.

**Результати досліджень.** Використаємо систему схемотехнічного моделювання для аналізу процесів у компенсаційному випрямлячі за схемою (рис. 1).

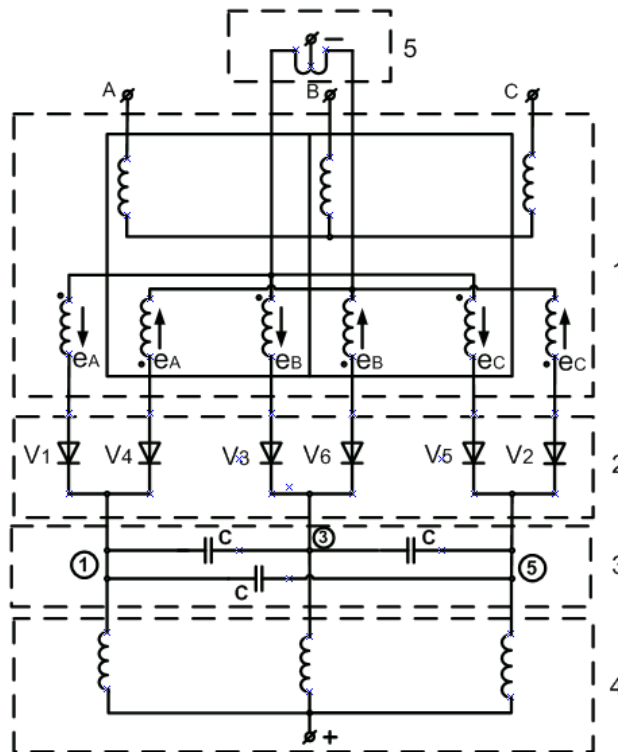


Рисунок 1 – Схема шестипульсного нульового компенсаційного випрямляча

Шестипульсний нульовий компенсаційний випрямляч конструктивно складається з наступних елементів, позначених на схемі 1.....5.

1 - перетворювальний трансформатор. Це трифазний трансформатор з первинною обмоткою, з'єднаною "зіркою" і двома трифазними вторинними обмотками. ЕРС першої вторинної обмотки, з'єднаної прямою "зіркою", до якої підімкнені діоди з непарною нумерацією, запишемо так:

$$\begin{aligned}e_A &= E_m \sin(\vartheta + \pi / 6 + \psi); \\e_B &= E_m \sin(\vartheta - \pi / 2 + \psi); \\e_C &= E_m \sin(\vartheta + 5\pi / 6 + \psi),\end{aligned}\tag{1}$$

де  $E_m$  - амплітуда вторинної фазної напруги перетворювального трансформатора;  $\vartheta$  - поточна змінна,  $\psi$  - початкова фаза напруги при включенні вентиля.

ЕРС другої вторинної обмотки, з'єднаної зворотною "зіркою", до якої підімкнені діоди з парною нумерацією, мають зсув відносно ЕРС відповідних фаз першої вторинної обмотки на  $180^\circ$ .

Конструктивно вторинні обмотки перетворювального трансформатора вмотані одна в одну і мають потужний взаємоіндуктивний зв'язок з відносним значення коефіцієнта індуктивного зв'язку близьким до 1.0

2 - вентиляльний блок. Він складається з двох однакових трифазних груп діодів, номінальні дані яких щодо припустимого робочого струму і величини зворотної напруги задовільняють вимоги технологічного процесу та забезпечують відповідний рівень надійності.

3 - батарея комутуючих конденсаторів. Як видно з рис. 1, ця трифазна батарея з'єднана за схемою "трикутника". Функціонально вона виконує роль додаткової напруги у контурі комутації, яка призводить до більш ранньої комутації струму вентилями, порівняно зі схемами без конденсаторів.

4 - трифазний зрівноважувальний реактор. Конструктивно цей елемент перетворювальної системи складається з трифазного магнітопроводу, на кожному стрижні якого розташовані по дві однакові обмотки. З'єднання обмоток різних фаз між собою здійснене таким чином, щоб взаємоіндуктивний зв'язок обмоток однієї фази був неузгодженим, а відносне значення коефіцієнта індуктивного зв'язку близьким до 1.0.

Це дозволяє забезпечити рівномірний розподіл струмів по фазам трифазного зрівноважувального реактора, і, тим самим, створює умови для перезаряду комутуючих конденсаторів струмами навантаження.

5 - двофазний зрівноважувальний реактор. Цей елемент перетворювальної системи містить прямокутний магнітопровід, на кожному стрижні якого розташовані по дві однакові обмотки. Як і в трифазному зрівноважувальному реакторі, з'єднання обмоток різних фаз між собою здійснене таким чином, щоб взаємоіндуктивний зв'язок обмоток однієї фази був неузгодженим з відносним значення коефіцієнта індуктивного зв'язку близьким до 1.0.

Це дозволяє забезпечити рівномірний розподіл струмів між половинами випрямляча, які живляться від окремих трифазних вторинних обмоток перетворювального трансформатора.

Запишемо рівняння для контуру комутації шестипульсного нульового компенсаційного випрямляча (рис. 1):

$$2x_\gamma \frac{di_k}{d\vartheta} - u_c = \sqrt{3}E_m \sin(\vartheta + \psi) \quad (2)$$

де  $i_k$  - миттєве значення струму комутації.

Напруга комутуючих конденсаторів  $u_c$  створюється сукупністю струмів навантаження і комутації і розраховується як різниця між третиною струму навантаження  $I_d$  і двох третин струму комутації [2]:

$$i_c = \frac{1}{3}I_d - \frac{2}{3}i_k \quad (3)$$

Для трифазної батареї комутуючих конденсаторів, з'єднаної за схемою "трикутника"

$$u_c = \frac{1}{\omega C} \int_0^\vartheta i_c d\vartheta + u_c(0) \quad (4)$$

Враховавши (3) і (4), рівняння для контуру комутації запишемо наступним чином

$$2x_\gamma \frac{di_k}{d\vartheta} + \frac{1}{\omega C} \int_0^\vartheta \left( \frac{2}{3}i_k - \frac{1}{3}I_d \right) - u_c(0) = \sqrt{3}E_m \sin(\vartheta + \psi).$$

Продиференціюємо останнє, при цьому отримаємо:

$$2\omega L_\gamma \frac{d^2i_k}{d\vartheta^2} + \frac{2i_k}{3\omega C} = \sqrt{3}E_m \cos(\vartheta + \psi) + \frac{I_d}{3\omega C} \quad (5)$$

Розв'язок цього неоднорідного лінійного диференціального рівняння відносно закономірності зміни струму комутації складається з вимушеної і вільної складової.

Корені характеристичного рівняння визначимо з наступного виразу

$$2\omega L_\gamma p^2 + \frac{2}{3\omega C} = 0, \text{ звідки } p^2 = -\frac{1}{3\omega^2 L_\gamma C}.$$

$$\text{Таким чином } p_{1,2} = \pm j \sqrt{\frac{1}{3\omega^2 L_\gamma C}} = \pm j \frac{\omega_0}{\omega} = \pm j\omega_{0*}, \quad (6)$$

де  $\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{3L_\gamma C}}$  - власна частота контуру комутації. Її відносне значення позначене як  $\omega_{0*}$

Проведені дослідження показують, що шестипульсний компенсаційний перетворювач за нульовою схемою здатний працювати при відносних значеннях власної частоти контуру комутації  $\omega_{0*} = 1.5 \dots 5.0$  [3]. Тож створюючи електричну модель перетворювача, слід орієнтуватися якраз на такі значення.

Схема електричної моделі нульового шестипульсного компенсаційного випрямляча наведена на рис. 2. Моделі складових елементів перетворювача мають такі ж позначення, як і на схемі рис. 1.

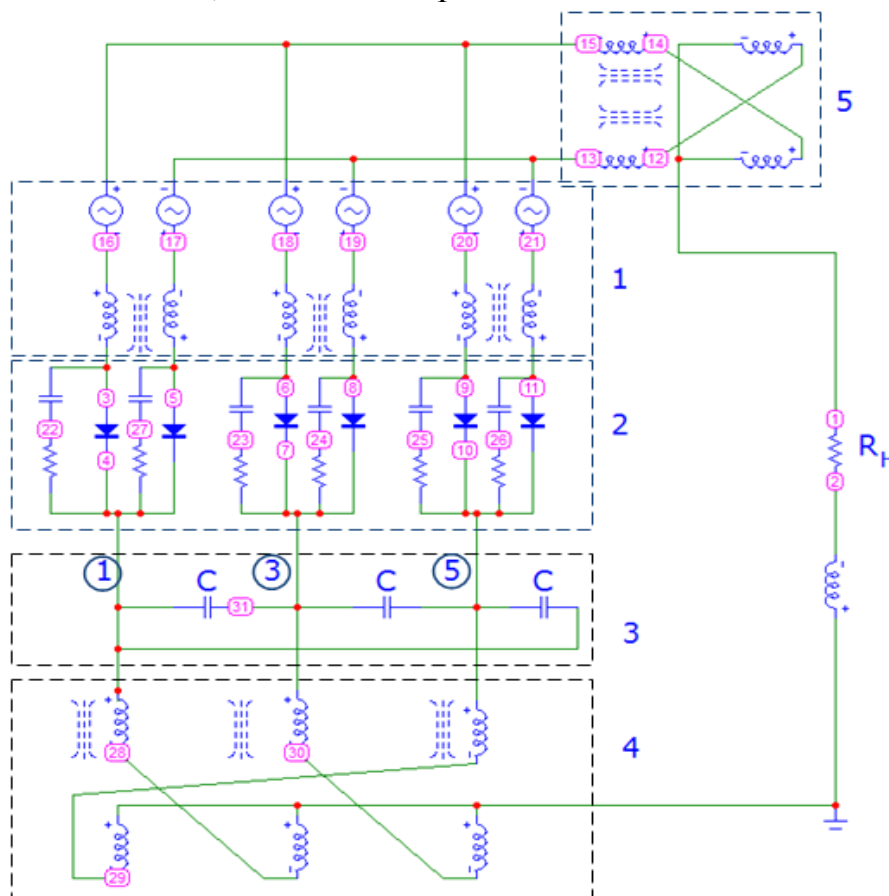


Рисунок 2 – Схема електричної моделі шестипульсного нульового компенсаційного випрямляча

1 - модель перетворювального трансформатора. На схемі рис. 2 зображені лише дві трифазні вторинні обмотки. Наявність первинної обмотки і коефіцієнт трансформації інтегрально враховано джерелами синусоїдної ЕРС, які мають амплітуду фазної напруги  $E_m = 100 \text{ В}$ , частоту промислової мережі живлення  $f = 50 \text{ Гц}$  і зсув за фазою відповідно до (1).

Кожна обмотка моделі фази трансформатора має індуктивність  $L_\gamma = 0.02 \text{ Гн}$ , а коефіцієнт індуктивного зв'язку складає 0.99. Активним опором обмоток трансформатора знехтувано, як і при аналітичних дослідженнях.

2 - модель вентиляного блоку. Вона складається з двох однакових трифазних груп діодів, вибраних із бібліотеки пристроїв пакету MICRO-CAP з урахуванням величини напруги джерел ЕРС моделі і величини її струму навантаження у досліджуваних режимах.

3 - модель батареї комутуючих конденсаторів. Як і у вихідній схемі випрямляча (рис. 1), батарея з'єднана за схемою "трикутника", кожна фаз має ємність  $C = 0.00002 \text{ Ф}$ .

4 - модель трифазного зрівноважувального реактора. У електричній моделі застосовна така ж схема з'єднання обмоток різних фаз між собою, як і у реальному трифазному зрівноважувальному реакторі випрямляча. Коефіцієнт індуктивного зв'язку між обмотками складає 0.99.

5 - модель двофазного зрівноважувального реактора. У електричній моделі застосовна така ж схема з'єднання обмоток різних фаз між собою, як і у реальному двофазному зрівноважувальному реакторі випрямляча. Коефіцієнт індуктивного зв'язку між обмотками складає 0.99.

Якщо врахувати наведені вище параметри елементів електричної моделі шестипульсного нульового компенсаційного випрямляча, то згідно з формулою (6), модель відповідає реальному перетворювачу електричної енергії з відносною частотою контуру комутації  $\omega_{0*} = 2.9$ .

Маючи електричну модель, можна досліджувати будь-який режим роботи перетворювача, отримувати дані щодо умов роботи кожного його елемента. Метою даної публікації є дослідження умов роботи вентилів (діодів) перетворювача.

На рис. 3 зображена отримана з використанням електричної моделі крива напруги на ємності  $u_C$  і напруга на діоді  $u$  в критичному режимі роботи випрямляча.

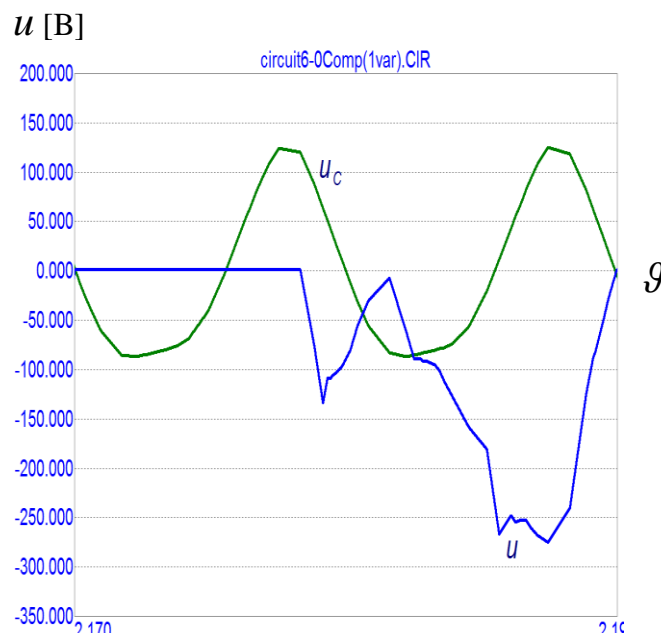


Рисунок 3 – Напруга на діоді в критичному режимі роботи

Критичним для компенсаційного випрямляча вважається такий режим його роботи, після якого починається режим повторної роботи вентилів. У критичному режимі випрямляч має найкращі енергетичні характеристики, а в кривій зворотної напруги діодів її миттєве значення наближається до нуля.

На рис. 4 наведені криві напруги на ємності і напруга на діоді в режимі роботи випрямляча з недовантаженням (а) і перевантаженням (б).

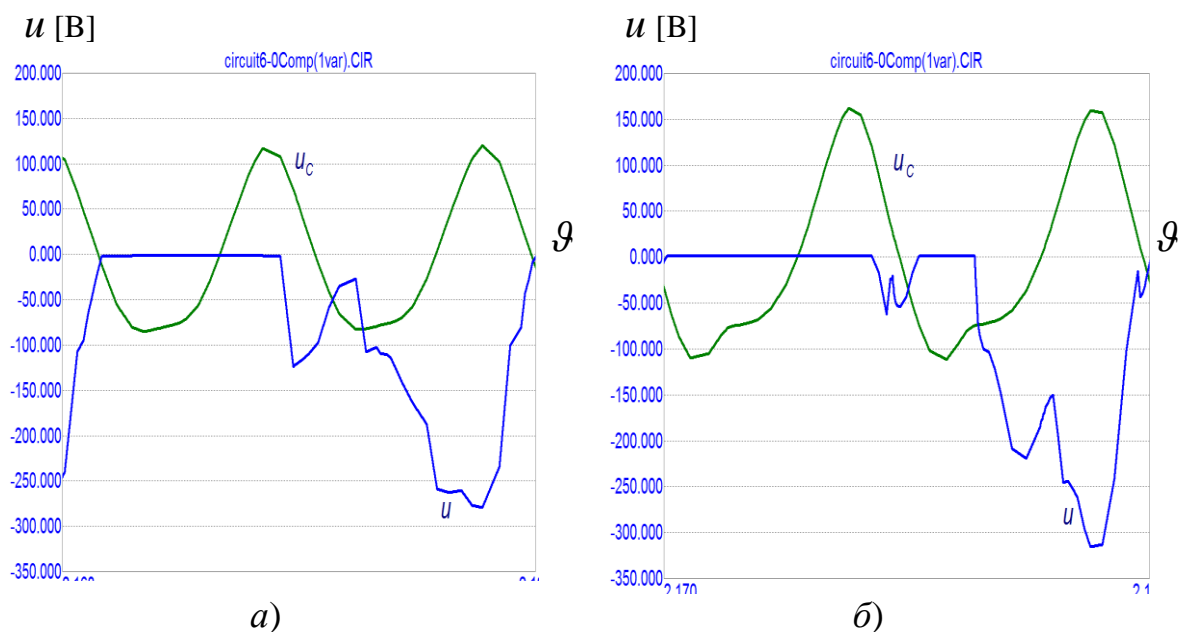


Рисунок 4 – Напруга на елементах випрямляча в різних режимах роботи

**Висновки.** 1. Створення електричної моделі перетворювального пристрою у системі схемотехнічного моделювання MICRO-CAP є досить простим і не потребує спеціальної підготовки.

2. Адекватність моделювання доводиться порівнянням отриманого на моделі результату з результатом аналітичного розрахунку одного з можливих робочих режимів, які досліджуються.

3. Модель дозволяє отримати форму кривих струмів і напруг будь-якого елемента випрямляча та їх кількісну характеристику.

#### Перелік посилань

1. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования Micro-Cap 6 / В.Д. Разевиг. – М.: Горячая линия – Телеком, 2001. – 344 с.
2. Бойко В.С. Преобразовательные системы с одноступенчатой емкостной коммутацией: Автореф. дис. ... докт.наук: / ИЭД НАНУ. – К., 1993. – 38 с.
3. Бойко В.С., Гладкий В.Н., Потяженко И.А., Сотник Н.И., Бойко В.В. Расчет углов регулирования и коммутации в сложных компенсационных преобразовательных системах // Техн. электродинамика. - 2001. - №3. - с. 33-38.