

УДК 621.314

**ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНОМУ ДВИГУНІ НА ПЕРЕНАПРУГИ В АВТОНОМНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧАХ ПІСЛЯ РАПТОВОГО ЗАКРИВАННЯ КЛЮЧІВ ТА ЄМНІСТЬ СИЛОВОГО ФІЛЬТРА**

*Казачковський М.М., к.т.н., проф., Савченко С.Б., Якунов Д.В., асистенти  
Національний гірничий університет, м. Дніпропетровськ  
49005, м. Дніпропетровськ, пр-т. К. Маркса, 19  
E-mail: dimka\_u@ukr.net, kolakol@ukr.net*

В статті рассмотрені електромагнітні процеси в системі преобразователь-двигатель и их влияние на уровень перенапряжения участка постоянного тока автономных преобразователей после внезапного закрытия силовых ключей. Предложены выражения для расчета емкости силового фильтра преобразователя.

**Ключевые слова:** емкость, фильтр, преобразователь, инвертор.

Electromagnetic processes in a converter-motor system and their effect on DC link overvoltage range of the autonomous converter after sudden power keys closing is considered. Equations for DC power filter capacitance calculation are given.

**Key words:** capacity, filter, converter, inverter.

**Вступ.** Автономні перетворювачі (широкоімпульсні перетворювачі, інвертори напруги) у більшості випадків живляться від некерованих випрямлячів із паралельним ємнісним фільтром (рис. 1). Головне призначення цих фільтрів – стабілізація вхідної напруги перетворювача та обмеження перенапруг на його силових ключах. Причиною виникнення перенапруг може бути електромагнітна енергія, накопичена в індуктивних елементах навантаження. Одним із найбільш небезпечних режимів, коли вивільнення цієї енергії призводить до збільшення напруги на конденсаторі, є раптове аварійне закривання силових ключів (наприклад, після спрацювання захисту). Оскільки ключі закриті, процес обміну енергією є некерованим.

**Перенапруги в мостовому ШП.** Розглянемо процеси в широкоімпульсному перетворювачі (ШП) за схемою рис. 1 у зазначеному режимі. У складі навантаження ШП – індуктивність та проти-ЕРС. Активним опором навантаження знехтуємо. Напруга на конденсаторі на момент закривання ключів дорівнює  $U_0$ , струм навантаження та проти-ЕРС мають величини відповідно  $I_0$  та  $E$  і напрямки, позначені на рис. 1. Останнє означає, що двигун працює в рушійному режимі. Вважатимемо, що проти-ЕРС внаслідок механічної інерції двигуна незмінна. Після закривання ключів струм навантаження під впливом ЕРС самоіндукції протікатиме коливним контуром “навантаження – VD3 – ємнісний фільтр – VD2”, підзаряджаючи ємність та збільшуючи напругу на ній. Частина енергії буде спожита джерелом проти-ЕРС. Джерелом живлення ШП (випрямлячем) струм текти не зможе внаслідок односторонньої провідності його діодів. Процеси в колі протікання струму описуються системою диференціальних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} -L \frac{di}{dt} &= u_C + E + iR \approx u_C + E \\ i &= C \frac{du_C}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Розв’язок шукатимемо у вигляді:

$$u_C = -E + A \sin(\Omega t + \varphi); \quad (2)$$

$$i = B \cos(\Omega t + \varphi), \quad (3)$$

де відлік часу починається з моменту закривання ключів,  $A$ ,  $B$  та  $\varphi$  – поки ще невідомі константи, а  $\Omega = 1/\sqrt{LC}$  – резонансна частота кола перезаряду.

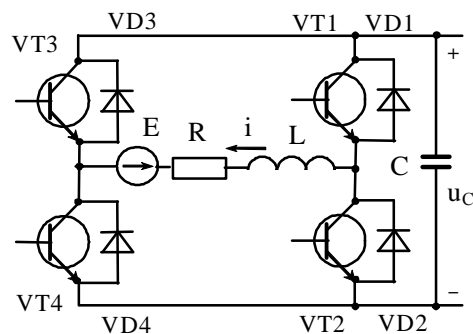


Рисунок 1 – Схема мостового ШП

На момент часу  $t = 0$

$$u_C = -E + A \sin \varphi = U_0; \quad (4)$$

$$i = B \cos \varphi = I_0; \quad (5)$$

$$\frac{du_C}{dt} = A\Omega \cos \varphi = \frac{I_0}{C}. \quad (6)$$

З виразів (4) та (6) знайдемо

$$A = \sqrt{\frac{I_0^2}{\Omega^2 C^2} + (U_0 + E)^2} = \sqrt{\frac{I_0^2 L}{C} + (U_0 + E)^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{(U_0 + E)\sqrt{C}}{I_0 \sqrt{L}},$$

а з виразів (5) та (6)

$$B = \frac{I_0}{\cos \varphi} = A\Omega C = \sqrt{I_0^2 + \frac{(U_0 + E)^2 C}{L}}$$

Перехідні процеси для випадку, коли двигун працює у рушійному режимі, зображені на рис. 2, а). Як видно, напруга коливається навколо рівня  $-E$ , а струм – навколо нуля. У реальній схемі завдяки діодам струм не зможе змінити знак, і в момент часу

$$t_1 = \frac{\pi/2 - \varphi}{\Omega} = \left(\frac{\pi}{2} - \varphi\right)\sqrt{LC}, \quad (7)$$

по досягненні напругою рівня  $U_m$ , енергообмінні процеси припиняться (суцільні лінії на рис. 2). Уся енергія, накопичена до того в індуктивності навантаження, перейде до конденсатора та джерела проти-ЕРС. Величина максимальної напруги згідно рівнянню (2):

$$U_m = -E + A = \sqrt{\frac{I_0^2 L}{C} + (U_0 + E)^2} - E. \quad (8)$$

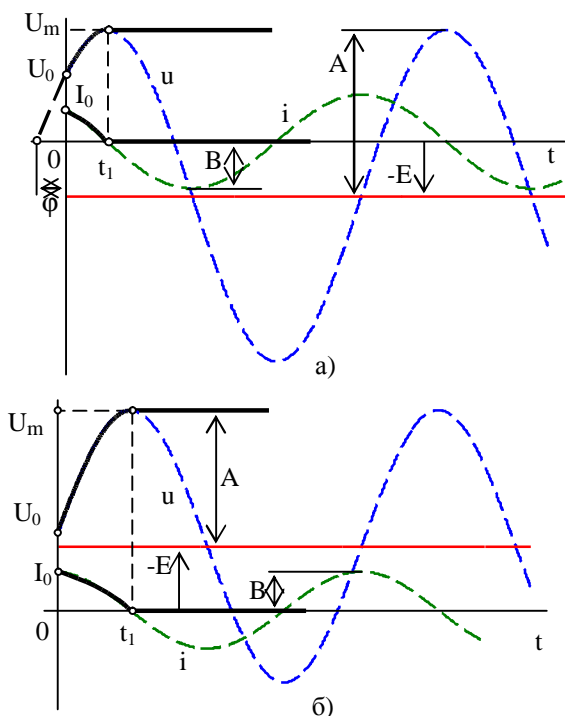


Рисунок 2 – Перехідні процеси в ШПП:  
а) двигун у рушійному режимі;  
б) двигун у рекуперативному режимі

Аналіз останнього виразу доводить, що максимальна напруга зі зменшенням проти-ЕРС монотонно зростає. Найбільшою ж вона буде, якщо двигун перед закриванням ключів працював у рекуперативному режимі (рис. 2, б). У цьому випадку до конденсатора потрапить також рекуперована за час  $t_1$  енергія з джерела проти-ЕРС. Для розрахунку параметрів перехідних процесів у цьому режимі необхідно у всіх рівняннях змінити знак проти-ЕРС. Початковий струм  $I_0$  доцільно обирати на рівні максимально припустимого струму перетворювача (для сучасних транзисторних перетворювачів він сягає 150...200% номінального).

Приріст напруги  $\Delta U = U_m - U_0$  буде найбільшим, якщо будуть найбільшими початковий струм та індуктивність навантаження і найменшими – початкова напруга та ємність фільтру. У рекуперативному режимі двигуна до найгірших наслідків призведе закривання ключів на найбільшій швидкості, якщо ж передбачений лише рушійний режим, найважчою буде ситуація на нульовій швидкості ( $E=0$ ).

Ємність, необхідна для обмеження напруги на виході ШПП на допустимому рівні  $U_d$ :

$$C \geq \frac{I_0^2 L}{(U_d + E)^2 - (U_0 + E)^2}. \quad (9)$$

Урахування активного опору силового кола призведе до певного зменшення потрібної ємності (тим менш помітного, чим більшою за модулем буде проти-ЕРС).

Отримані результати можуть бути розповсюджені на будь-яку схему ШПП (одноквADRANTну, двоквADRANTну півмостову, чотириквADRANTну зі спільною точкою тощо).

**Перенапруги в однофазному мостовому інверторі.** Однофазний мостовий автономний інвертор напруги (АІН) має таку ж саму схему, як і ШПП (рис. 1) і відрізняється лише алгоритмом перемикання ключів та формою проти-ЕРС навантаження. Для випадку, коли навантаженням АІН є фазна обмотка двигуна змінного струму, форма проти-ЕРС внаслідок значної індуктивності намагнічування двигуна буде синусоїдальною, а її амплітуда та частота змінюватимуться пропорційно ( $E_m/\omega = \text{const}$ ).

Тому електромагнітні процеси після раптового закривання ключів АІН описуватимуться тією ж самою системою рівнянь (1), що й для ШПП, за однією лише відмінню: проти-ЕРС є функцією часу

$$E = E_m \sin(\omega t + \vartheta),$$

де  $E_m$  – амплітуда проти-ЕРС;  $\omega$  – її частота та  $\vartheta$  – фаза на момент закривання ключів.

Хоча аналітичний розв'язок системи (1) з урахуванням синусоїдальної зміни проти-ЕРС існує, аналітично знайти максимум напруги неможливо, оскільки це потребує розв'язання трансцендентного рівняння відносно часу.

Проте характер процесів (особливо на початку) багато в чому подібний до щойно розглянутих процесів у ШПП. Звичайно, що, як і раніше, найгіршим буде випадок, коли на момент закривання ключів миттєва проти-ЕРС направлена (як і на рис. 1) згідно зі струмом. Якщо резонансна частота  $\Omega \gg \omega$ , можна вважати, що протягом часу  $0 \dots t_1$  проти-ЕРС змінитися не встигає. У цьому випадку амплітуда перенапруги  $U_m$  буде найбільшою, якщо фаза проти-ЕРС  $\vartheta = 270^\circ$  (глибокий рекуперативний режим двигуна), а для її розрахунку можна використовувати вираз (8) за умови, що  $E = E_m$ , а струм  $I_0$  дорівнює амплітуді максимально припустимого вихідного струму інвертора.

Якщо ж частоти  $\Omega$  та  $\omega$  порівняні (як на рис. 3), темпи зміни проти-ЕРС та напруги близькі, і зменшення проти-ЕРС відбуватиметься на тлі зменшення струму. Тому потужність, яка передається від джерела проти-ЕРС до конденсатора, інтенсивно зни-

жуватиметься у часі і на амплітуду напруги мало впливатиме.

**Перенапруги в трифазному інверторі.** У трифазному АІН (рис. 4) процеси багато в чому подібні до таких в однофазній схемі. Розглянемо ситуацію, коли на момент закривання ключів струми фаз протікали так, як показано на рис. 4, а двигун, як і раніше, працював у рекуперативному режимі. Струми і надалі тектимуть так само, проте іншим шляхом, ніж раніше: діодами VD1, VD3 та VD6. Оскільки фази А та В навантаження паралельні одна одній, а разом увімкнені послідовно з фазою С, після перетворень отримаємо еквівалентні параметри навантаження, зведені до ланки постійного струму:

$$L = 1,5L_{\phi} ; R = 1,5R_{\phi} ;$$

$$E = e_c - \frac{e_a + e_b}{2} = E_m \sin(\omega t + \vartheta),$$

де  $E_m = 1,5E_{\phi m}$  та  $E_{\phi m}$  – амплітуди проти-ЕРС, зведеної до ланки постійного струму, та фазної ЕРС навантаження.

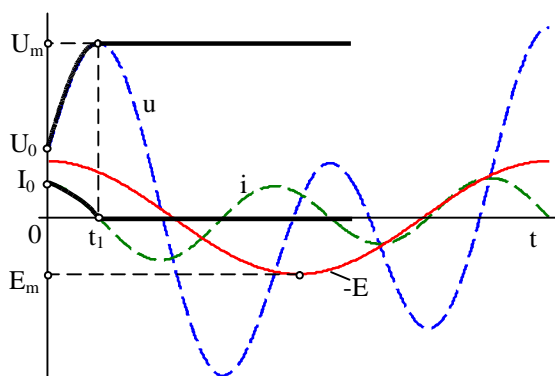


Рисунок 3 – Перехідні процеси в однофазному АІН ( $\Omega/\omega = 2,25$ )

Як видно, для обчислення перенапруги та потрібної ємності трифазного інвертора також можна використовувати вирази (8), (9), однак індуктивність та амплітуду проти-ЕРС слід збільшити в півтори рази порівняно з фазними.

Для перевірки припустимості зроблених припущень було здійснено розрахунки перенапруги в схемі трифазного АІН за таких умов: живлення інвер-

тора від мережі 0,4 кВ (початкова напруга ланки постійного струму  $U_0 = 500$  В), навантаження – асинхронні двигуни серії 4А потужністю від 1,1 до 315 кВт [1]. Ємність обиралась такою, щоб перенапруга  $U_m$  приблизно дорівнювала 15% від початкового значення напруги. Параметри навантаження, зведені до ланки постійного струму, та результати розрахунків подані у табл. 1. У ній наведено два результати: отримані за формулою (8) та шляхом числового розв'язання системи диференціальних рівнянь (1) з урахуванням активного опору навантаження та реальної форми проти-ЕРС.

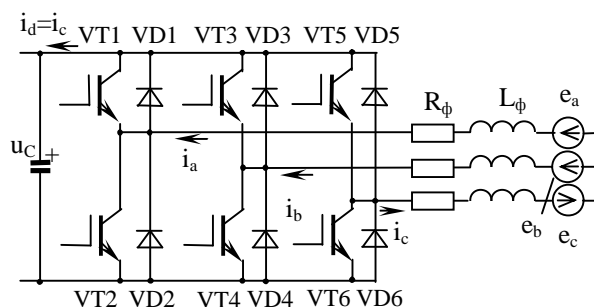


Рисунок 4 - Схема трифазного АІН

З табл. 1 видно, що похибка, обумовлена нехтуванням активним опором навантаження та зміною миттєвої проти-ЕРС, цілком прийнятна.

**Висновки.** Запропоновано метод розрахунку перенапруг в автономних перетворювачах (широкоімпульсних перетворювачах, інверторах напруги) із ємнісним фільтром на вході після аварійного закривання керованих ключів. Вихідними даними для розрахунку є параметри навантаження та початкові значення струму навантаження та напруги на конденсаторі. Показано, що найбільшого рівня перенапруги сягають, коли двигун перед аварією працював у рекуперативному режимі. Шляхом моделювання доведено, що нехтування активним опором та зміною миттєвої проти-ЕРС навантаження несуттєво впливає на точність розрахунків.

Таблиця 1 – Результати розрахунків ємності фільтра

Тип двигуна	P <sub>н</sub> , кВт	I <sub>0</sub> , А	L, мГн	R, Ом	E <sub>m</sub> , В	C, мкФ	U <sub>m</sub> , В		
							реальна	за (8)	Похибка, %
4A80A4	1,1	7,76	29,8	0,18	400	82,5	576,7	578,2	0,26
4A132M4	11	61,93	4,08	0,0645	430,4	850	577,5	581,5	0,69
4A250S4	75	364,4	0,653	0,0375	440,8	5000	577,2	581,3	0,71
4A355M4	315	1553	0,1895	0,018	445,3	23625	579,8	594,7	2,6

БІБЛІОГРАФІЧНІ ДАНІ

1. Кравчик А.Э., Шлаф М.М., Афонин В.И., Оболенская Е.А. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. – М.: Энергоиздат, 1982. – 504 с.

Стаття надійшла 21.04.2007 р.  
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.  
Родькіним Д.Й.