

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАРЯДНОГО КОЛА НАКОПИЧУВАЛЬНИХ КОНДЕНСАТОРІВ У СИСТЕМАХ ГРУПОВОГО ЖИВЛЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ

Вступ. Одним з перспективних і ефективних напрямів енергозбереження засобами промислового електропривода є застосування ємнісних накопичувачів енергії та загальних шин постійного струму з діодними або керованими випрямлячами в системах частотно-регульовального асинхронного приводу (рис. 1). У наведеній схемі накопичувальні конденсатори акумулюють надлишкову енергію рекуперативного гальмування одного або групи двигунів і по колу постійного струму (минаючи мережу й вхідний перетворювач) передають її іншим приводам рухового режиму. При цьому виключаються енергообмінні процеси між мережею й приводами й, отже, додаткові втрати в силових елементах на вході системи [1].

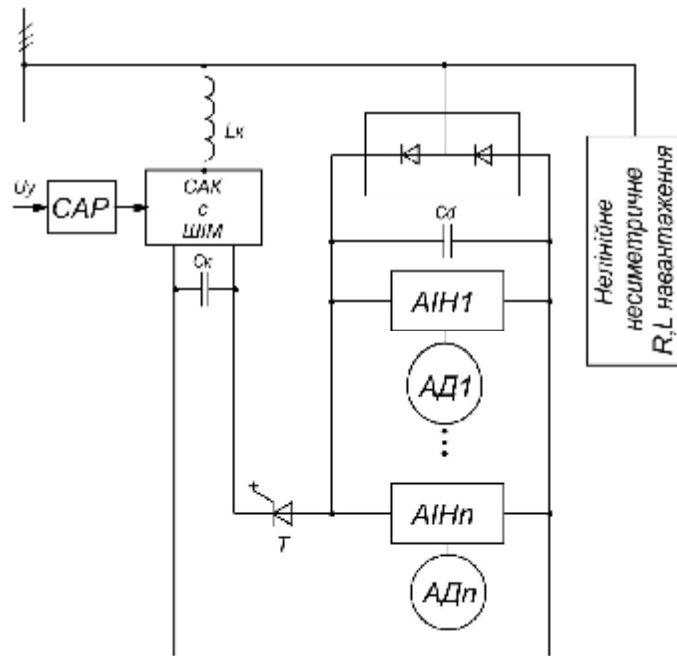


Рис. 1 Функціональна схема системи групового живлення електроприводів з ємнісним накопичувачем C_d , яка обладнана силовим активним компенсатором

Наявність силового активного компенсатора (САК) реактивної потужності на основі АІН із ШІМ, де керуючі параметри формуються на основі теорії I_d , I_q миттєвої потужності з використанням узагальнених (просторових) векторів напруг і струмів, дозволяє з високою точністю й швидкодією компенсувати неактивні складові повної потужності в схемах змішаного живлення [2]. Таким чином, запропонована система дозволяє реалізувати роздільне й незалежне керування приводами й якістю електроенергії.

Метою роботи є обґрунтування параметрів зарядного кола діодного випрямляча в режимі попередньої зарядки накопичувальних конденсаторів у системах групового живлення електроприводів, що обмежують напругу на конденсаторі на необхідному рівні й зарядний струм з умови припустимого струму вентилів, а також енергозберігаючого керованого способу зарядки зазначених накопичувачів.

Матеріали дослідження. У схемі на рис.1 реалізується попередня зарядка одночасно ємнісного накопичувача C_d і ємності C_k САК. Причому, при використанні діодного випрямляча з метою обмеження зарядного струму необхідно до кола зарядки попередньо приєднати додатковий опір R_d (на рисунку не наведений).

На зарядку накопичувальних конденсаторів великої ємності, з тривалістю, що перевищує період живильної напруги, великий вплив виявляють пульсації випрямленої напруги. Це обумовлене тим, що зарядка відбувається лише в ті моменти, коли прикладена пульсуюча випрямлена напруга U_d більше напруги на конденсаторі U_k . На відрізок часу, коли $U_k > U_d$ з'являються паузи, що затягують процес зарядки. Теоретично процес зарядки закінчується за умови $U_k = U_{d,max}$ (де $U_{d,max}$ – максимальне значення випрямленої напруги).

Процес зарядки можна поділити на два етапи. На першому етапі зарядка відбувається безупинно до того часу, поки $U_k < U_{d,\min}$ (де $U_{d,\min} = 0,955U_{d,0}$ – мінімальне значення пульсуючої випрямленої напруги; $U_{d,0} = 1,35U_{2\lambda} = 2,34U_{2\phi}$ – середнє значення випрямленої напруги). На другому етапі, коли $U_k > U_{d,\min}$, в зарядному струмі з'являються паузи, що сповільнюють зростання напруги U_k . Очевидно, що вирішальну роль при трифазній мостовій схемі випрямлення відіграє перший етап, протягом якого процес протікає так само, як і при вмиканні кола на постійну напругу. Тому, вважаючи, що включення зарядного кола реалізується на виході випрямляча, для розрахунків зарядного струму й напруги на конденсаторі можна використовувати схему заміщення, наведену на рис. 2, де позначене: $R_e = 2r_2 + 2k_e^2r_1 + 2r_d + R_D$ (для випадку, коли два вентиля одночасно проводять струм); $L_e = 2L_{2S} + 2k_e^2L_{1S}$ – відповідно результуючий активний опір і індуктивність кола зарядки; $r_2 + k_e^2r_1$, $L_{2S} + k_e^2L_{1S}$ – зведені до кола випрямленого струму активні опори й індуктивність розсіювання трансформатора; r_1 , r_2 , r_d , R_D – активний опір первинної та вторинної обмоток трансформатора, динамічний опір вентиля й додатковий опір, що приєднується до кола попереднього заряду; L_{1S} , L_{2S} – індуктивність розсіювання первинної й вторинної обмоток трансформатора; $k_e = W_2/W_1$ – коефіцієнт трансформації трансформатора; W_1 , W_2 – число витків первинної й вторинної обмоток.

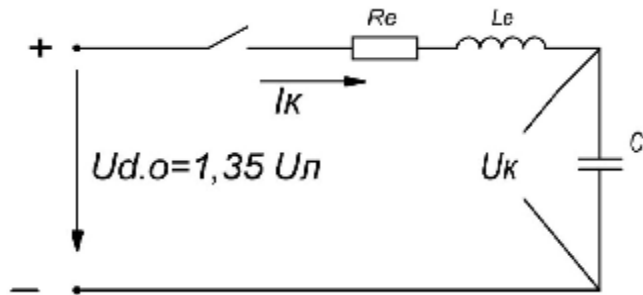


Рис. 2. Схема заміщення кола попередньої зарядки накопичувального конденсатора С

Відомо [3], якщо $R_e < 2\sqrt{L_e/C}$ то виникає коливальний режим зарядки, який відрізняється від аналогічного режиму в колі без випрямляча, що описується

$$i_k = \frac{U_{d,0}}{w_1 L_e} \sin w_1 t e^{-dt}; \quad (1)$$

$$u_k = U_{d,0} \left[1 - \frac{w_0}{w_1} \cos(w_1 t - b) \right] e^{-dt} \quad (2)$$

тим, що зарядка припиняється, коли зарядний струм внаслідок періодичного процесу перший раз повертається в нуль. У наведених рівняннях (1) і (2) позначене: $d = R_e/2L_e$; $w_1^2 = \frac{1}{L_e C_e} - \left(\frac{R_e}{2L_e} \right)^2 = w_0^2 - d^2$ – частота загасаючих власних коливань; $w_0 = 1/\sqrt{LC}$ – резонансна частота; $b = \arctg \frac{d}{w_1}$, причому $0 < b \leq \frac{\pi}{2}$.

Наявність випрямляча в колі зарядки приводить до того, що в зазначеному коливальному режимі заряду конденсатор заряджається до напруги $U_{k,\max}$ значно більшої за $U_{d,\max} = 1,045U_{d,0}$. Причому при малих спаданнях ($w_1 \approx w_0$) найбільше значення зарядного струму близько до $U_{d,0}/w_0 L_e = U_{d,0}/\sqrt{L_e/C}$, а найбільше значення напруги близько до $2U_{d,0}$ [3].

За зазначеними причинами додатковий опір R_D , що приєднується до кола на час попередньої зарядки накопичувальних конденсаторів через діодний випрямляч має вибиратися за такими умовами.

По-перше, аперіодична зарядка реалізується, якщо $R_e/2L_e > w_0$ або $R_e > 2\sqrt{L_e/C}$.

Звідки з урахуванням наведених вище позначень

$$R_D > 2\sqrt{(2L_{2S} + 2k_e^2L_{1S})/C} - (2r_2 + 2k_e^2r_1 + 2r_d). \quad (3)$$

По-друге, додатковий опір має обмежувати зарядний струм на припустимому для вентиля рівні з урахуванням його короткочасної перевантажувальної здатності. Для цього можна виходити із втрат потужності від зарядного струму i_k .

$$\Delta P = i_{\kappa(t)}^2 R_e, \quad (4)$$

$$i_{\kappa(t)} = (U_{d.0} - u_{\kappa(t)}) / R_e, \quad (5)$$

де $i_{\kappa(t)}$ – струм аперіодичної зарядки конденсатора; $u_{\kappa(t)}$ – напруга на затискачах конденсатора.

Зі сумісного розв'язання (4) і (5) маємо:

$$\Delta P = (U_{d.0} - u_{\kappa(t)}) i_{\kappa(t)} \quad (6)$$

При цьому втрати енергії за час t_3 заряду конденсатора з урахуванням того, що $dt = C du_{\kappa} / i_{\kappa}$

$$\Delta A = \int_0^{t_3} \Delta P dt = C \int_0^{u_{d.0}} (U_{d.0} - u_{\kappa(t)}) du_{\kappa} = \frac{CU_{d.0}^2}{2}, \quad (7)$$

відповідають енергії, запасеній в конденсаторі за час заряду й, отже, половині енергії, споживаної із джерела. Відзначена умова, як відомо, не залежить від величини опору в колі зарядки.

Визначаючи час зарядки t_3 ємності, як відношення величини заряду $Q = CU_{d.0}$ до середнього за час t_3 зарядного струму $I_{\kappa.cp}$, отримуємо

$$t_3 = CU_{d.0} / I_{\kappa.cp}. \quad (8)$$

Виходячи із середнього значення зарядного струму $I_{\kappa.cp}$, можна на підставі (7) записати

$$\frac{CU_{d.0}^2}{2} = I_{\kappa.cp} R_e t_3. \quad (9)$$

Зі сумісного розв'язання (8) і (9) маємо

$$R_e = U_{d.0} / 2I_{\kappa.cp}. \quad (10)$$

Вважаючи зарядний струм близьким до синусоїди, для якої відношення $I_{\max} / I_{cp} = p/2$, можна вираз (10) записати у вигляді

$$R_e = pU_{d.0} / 4I_{\kappa.\max} = pU_{d.0} / 4I_e I_{н.в}, \quad (11)$$

де $I_{н.в}$, I_e – номінальний струм вентиля і його перевантажувальна здатність за струмом.

Остаточно приймається більше зі значень R_e , знайдених по (3) і (11).

Для випадку граничного аперіодичного режиму зарядки конденсатора час, протягом якого струм досягає максимального значення, $t_m = 1/d = 2L_e / R_e$. При цьому максимальне значення зарядного струму конденсатора визначається як [3]

$$I_{\kappa.\max} = \frac{U_{d.0}}{L_e} t_m e^{-dt_m} = \frac{2U_{d.0}}{eR_e}, \quad (12)$$

де e – основа натурального логарифма.

Із зіставлення (10) і (12) випливає, що для граничного аперіодичного режиму з енергетичних співвідношень відношення $I_{\kappa.\max} / I_{\kappa.cp} = 1,47$, є близьким до синусоїди. Отже, можна вважати зарядний струм у розглянутих режимах близьким до синусоїди.

При однозмінному режимі роботи приводів групового живлення від загальних шин постійного струму зниження втрат енергії від попередньої зарядки накопичувальних конденсаторів може бути досягнуте плавною зміною напруги. Для цього замість діодного випрямляча використовується керований, який додатково може виконувати ряд захисних функцій.

Для кількісної оцінки ступеня зниження втрат при керованій зарядці накопичувальних конденсато-

рів можна розглянути процес приєднання кола RC на змінну в часі напругу

$$TpU_{\kappa} + u_{\kappa} = u(t), \quad (13)$$

де $T=R_eC$ – електрична стала кола зарядки.

Найбільше просто керований заряд накопичувальних конденсаторів реалізується шляхом лінійного зростання напруги тиристорного перетворювача $u_{np} = \frac{U_{d.0}}{t_0}t = a_{np}t$ $0 \leq t \leq t_0$, де t_0 – час зростання напруги перетворювача до встановленого значення $U_{d.0}$; $a_{np} = U_{d.0}/t_0$ – темп наростання напруги перетворювача

З урахуванням цього вираз (13) приймає вигляд

$$Tpu_{\kappa} + u_{\kappa} = a_{np}t. \quad (14)$$

Оскільки характеристичне рівняння $Tp+1=0$ має один корінь, а права частина (14) є лінійною функцією часу, то рішення (14) записується у вигляді

$$u_{\kappa} = A_1e^{-t/T} + a_{np}t + A_2. \quad (15)$$

Визначаючи сталі інтегрування відомим способом, маємо

$$A_2 = -Ta_{np}; \quad A_1 = Ta_{np}.$$

При цьому маємо з (15)

$$u_{\kappa} = a_{np}t - Ta_{np}(1 - e^{-t/T}). \quad (16)$$

Звідки струм зарядки конденсатора

$$i_{\kappa} = C \frac{du_{\kappa}}{dt} = Ca_{np}(1 - e^{-t/T}). \quad (17)$$

На базі наведених виразів згідно з (6) втрати потужності при керованій зарядці конденсаторів

$$\Delta P_1 = i_{\kappa}(u_{np} - u_{\kappa}) = CTa_{np}^2(1 - e^{-t/T})^2 = CTa_{np}^2(1 - 2e^{-t/T} + e^{-2t/T})^2. \quad (18)$$

На підставі (18) втрати енергії за час t_0 лінійного наростання напруги від нуля до $U_{d.0}$

$$\Delta A_1 = \int_0^{t_0} \Delta P dt = CT \frac{U_{d.0}^2}{t_{np}^2} \int_0^{t_0} (1 - 2e^{-t/T} + e^{-2t/T}) dt = \frac{CU_{d.0}^2}{2} \frac{2T}{t_0} \left(1 - \frac{3}{2} \frac{T}{t_0} + \frac{2T}{t_0} e^{-t_0/T} - \frac{T}{2t_0} e^{-2t_0/T}\right). \quad (19)$$

У випадку $t_0 \gg T$ маємо

$$\Delta A_1 = \frac{CU_{d.0}^2}{2} \frac{2T}{t_0} \left(1 - \frac{3T}{2t_0}\right). \quad (20)$$

Розкладаючи в (20) експонентні функції в ряд і обмежуючись двома членами ряду (що еквівалентно нехтуванню нелінійною початковою ділянкою зміни напруги на конденсаторі) маємо

$$\Delta A_1 = \frac{CU_{d.0}^2}{2} \frac{2T}{t_0}. \quad (21)$$

Другий етап зарядки накопичувального конденсатора при $t > t_0$ (рис. 3) відбувається тоді, коли напруга перетворювача досягає усталеного значення $U_{d.0}$. Для цієї ділянки, уводячи новий відлік часу від моменту $t=t_0$, маємо

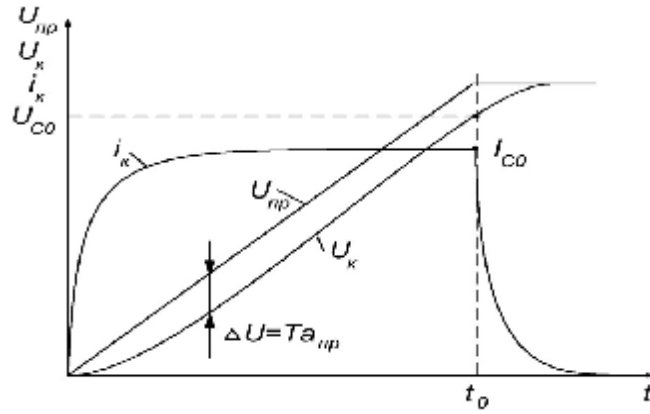


Рис. 3. Графік зміни напруг перетворювача U_{np} , заряду конденсатора U_k і зарядного струму i_k

$$U_k' = U_{d.0} (1 - e^{-t/T}) + U_{C.0} e^{-t/T}; \quad (22)$$

$$i_k' = I_{C.0} e^{-t/T} = C a_{np} e^{-t/T}. \quad (23)$$

На базі наведених виразів втрати потужності ΔP_2 на другому етапі зарядки конденсатора

$$\Delta P_2 = i_k' (U_{d.0} - U_k') = C a_{np} e^{-t/T} [U_{d.0} - U_{d.0} (1 - e^{-t/T}) - U_{C.0} e^{-t/T}] = C a_{np}^2 e^{-2t/T}. \quad (24)$$

При цьому втрати енергії на цьому етапі заряду конденсатора

$$\Delta A_2 = \int_0^{\infty} \Delta P_2 dt = C a_{np}^2 T \int_0^{\infty} e^{-2t/T} dt = \frac{C U_{d.0}^2 T^2}{2 t_0^2}. \quad (25)$$

Сумарні втрати енергії

$$\Delta A_{\Sigma} = \Delta A_1 + \Delta A_2 = \frac{C U_{d.0}^2}{2} \left(\frac{2T}{t_0} + \frac{T^2}{t_0^2} \right) \quad (26)$$

суттєво зменшуються зі зменшенням темпу зростання напруги перетворювача (збільшення t_0). При нескінченно повільному зростанні напруги перетворювача втрати енергії прямують до нуля при будь-якому кінцевому значенні опору в колі зарядки.

Для побудови САР, що забезпечує необхідний характер зміни напруги перетворювача запишемо рівняння напруг кола зарядки з урахуванням позначень рис. 2

$$U_d - U_k = i_k R_e + L_e \frac{di_k}{dt} \quad (27)$$

Рівнянню (27) з урахуванням $U_k = \frac{1}{C} \int i_k dt$ відповідає структурна схема кола зарядки, представлена на рис. 4.

Для побудови САР з використанням принципів підлеглого регулювання потрібно використовувати два регулятори: регулятор струму (РС) у внутрішньому контурі й регулятор напруги (РН) у зовнішньому контурі. При цьому структурна схема САР з урахуванням передатної функції тиристорного перетворювача у вигляді аперіодичної ланки $W_{np} = \frac{k_{np}}{T_{np} p + 1}$ наведена на рис. 5.

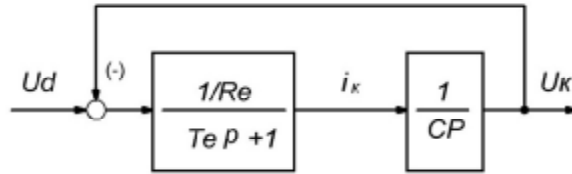


Рис. 4. Структурна схема кола зарядки ($T_e=L_e/R_e$)

Без урахування впливу внутрішнього негативного зворотного зв'язку за напругою на ємності U_k , який може бути скомпенсований подачею на вхід перетворювача позитивного зворотного зв'язку, рівного $U_{oc}=U_k/k_{np}$ передатні функції регуляторів:

$$\text{регулятор струму } W_{p.c} = \frac{T_e p + 1}{a_c T_{np} k_{np} k_c (1/R_e) p};$$

$$\text{регулятор напруги } W_{p.n} = \frac{C k_n}{a_n a_c T_{np} k_n}.$$

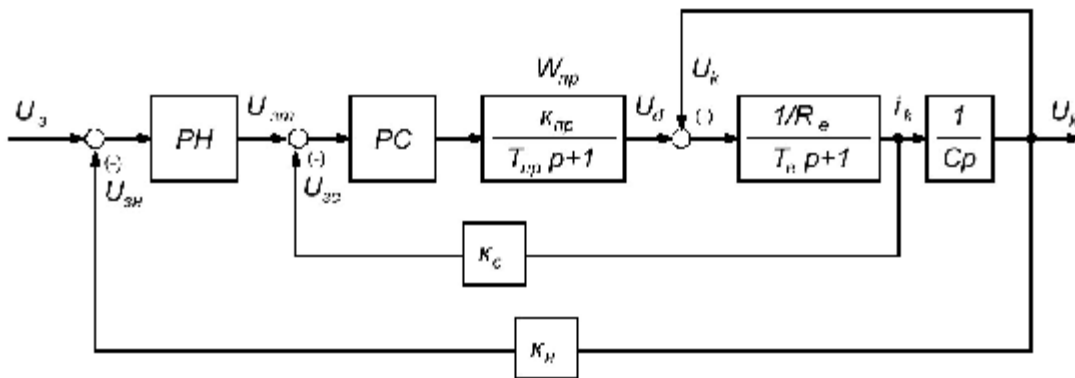


Рис. 5. Структурна схема керованого заряду накопичувального конденсатора системи групового живлення приводів

У наведених виразах позначено: a_c, a_n – коефіцієнти налаштувань контурів струму і напруги, прийняті при налаштуванні на технічний оптимум $a_c=a_n=2$; k_c, k_n – коефіцієнти зворотних зв'язків за струмом і напругою.

Для регулювання темпу зростання напруги перетворювача й, отже, втрат енергії від зарядного струму на вхід РН приєднується задавач інтенсивності.

Висновки.

Розроблено методику визначення параметрів зарядного кола накопичувальних конденсаторів у системах групового живлення електроприводів, що обмежують напругу в колі постійного струму на заданому рівні і зарядний струм на припустимому рівні з урахуванням перевантажувальної здатності вентилів за струмом.

Наведено енергетичні співвідношення і запропоновано енергозберігаючу керовану зарядку накопичувальних конденсаторів і САР для реалізації цього способу.

Список літератури

1. Колб, А.А. Групповое питание электроприводов с общим накопителем энергии как новое направление энергосбережения [Текст] / А.А. Колб, А.А. Воробьев // Вісн. Нац. техн. ун-ту "Харківський політехнічний інститут". – 2003. – № 10. – т. 1. – С. 224–228.
2. Колб, А.А. Силовые активные компенсаторы в системах группового питания электроприводов [Текст] / А.А. Колб // Вісн. Кременчуцького держ. політехн. ун-ту ім. М. Остроградського. – 2007. – Вип. 3/2007 (44) ч.2. – С. 44–48.
3. Бессонов, Л.А. Теоретические основы электротехники [Текст] / Л.А. Бессонов. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк. – 1973. – 752 с.

Рекомендовано до друку: проф. Івановим О.Б.