

**ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЦИФРОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ ШВИДКОСТІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА МЕТОДАМИ ПРОЕКТУВАННЯ НЕПЕРЕРВНИХ СИСТЕМ**

**Вступ.** У сучасних електроприводах системи керування реалізуються на мікропроцесорних контролерах, а підсилення потужності здійснюється за допомогою силових напівпровідникових перетворювачів електроенергії. Як мікропроцесорні контролери, так і перетворювачі є пристроями, що функціонують дискретно у часі. При цьому функціонування перетворювачів електроенергії, регулювання силового струму та регулювання швидкості електродвигунів, що живляться від перетворювачів, у загальному випадку може здійснюватися із суттєво різними інтервалами дискретності. Оскільки дискретні властивості перетворювачів електроенергії достатньо точно можна врахувати за допомогою ідеальних імпульсних елементів [1, 2], то аналіз і синтез таких систем електропривода можна здійснювати на основі теорії імпульсних систем [1, 3].

**Аналіз попередніх досліджень.** У більшості наукових розробок, що стосуються питань регулювання у системах електропривода, досліджувану систему вважають неперервною, а дискретні властивості перетворювачів ураховують включенням в систему регулювання фіктивних аперіодичних ланок [4, 5]. Але обґрунтування шляхів визначення сталих часу фіктивних ланок у цих публікаціях відсутнє. Між тим, ці сталі часу є базовими при розрахунку параметрів регулятора швидкості.

**Метою роботи** є з'ясування питання щодо можливості застосування результатів, отриманих із позицій теорії синтезу неперервних систем, при практичній реалізації дискретного регулювання у системах електропривода з прямим цифровим керуванням напівпровідниковими перетворювачами.

**Матеріал і результати дослідження.** Дискретні властивості досліджуваних систем електропривода можуть бути охарактеризовані структурною схемою, зображеною на рис. 1.

Визначальною дискретною ланкою в цих системах є силовий напівпровідниковий перетворювач. Як свідчить здійснений аналіз [1, 2], функціонування основних типів перетворювачів напруги та частоти у першому наближенні відображають послідовно з'єднані між собою ідеальний імпульсний елемент з періодом дискретності  $T_u$  та ланка затримки у часі на величину  $\gamma T_u$  з коефіцієнтом підсилення  $T_u k_u$ , в якому один з співмножників  $k_u$  є власно коефіцієнтом передачі силового перетворювача, а другий співмножник  $T_u$  компенсує коефіцієнт передачі імпульсного елемента  $1/T_u$ . На виході перетворювача формується імпульс ЕРС  $e_u$ .

Дискретно у часі здійснюється також регулювання моментоутворюючої складової струму статора двигунів змінного струму або струму якірного кола двигунів постійного струму. У структурі на рис. 1 цей факт враховує подання цифрового регулятора струму у вигляді послідовного з'єднання дискретної динамічної ланки з передавальною функцією  $R_i(z_i)$ , імпульсного елемента та екстраполятора нульового порядку (екстраполятор 1) з періодом дискретності  $T_i$ .

І нарешті, завдання на струм формує цифровий регулятор швидкості, що складається із дискретної динамічної ланки з передавальною функцією  $R_\omega(z_\omega)$ , імпульсного елемента та екстраполятора нульового порядку (екстраполятор 2) з періодом дискретності  $T_\omega$ .

В передавальних функціях регуляторів швидкості та струму враховано різницю в інтервалах дискретності на основі відповідних z-перетворень:  $z_\omega = \exp(pT_\omega)$ ,  $z_i = \exp(pT_i)$ .

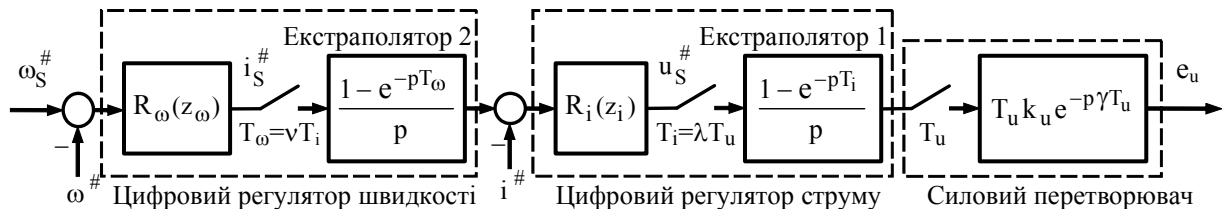


Рис. 1. Структурна схема цифрових регуляторів та силового перетворювача

З точки зору аналізу систем електропривода як дискретних систем регулювання важливо, що, як правило, всі імпульсні елементи починають працювати одночасно (без часового зсуву).

Дискретне регулювання струму різноманітних перетворювачів має багато нюансів у залежності від типу перетворювача електроенергії. Але виявляється доцільним звернути увагу на два основних варіанти: 1) тиристорні випрямлячі для електроприводів постійного струму; 2) перетворювачі з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ).

Для тиристорних випрямлячів, як свідчить аналіз функціонування серійних пристроїв, є характерним регулювання середнього струму з однаковими інтервалами дискретності випрямляча та регулятора струму,

тобто  $\lambda = T_i/T_u = 1$ . Параметр  $\gamma$  в імпульсній моделі випрямляча також дорівнює 1.

В перетворювачах з ШІМ зазвичай здійснюється регулювання миттєвого струму. Для імпульсної моделі перетворювача є характерним  $\gamma = 0,5$  [2]. Співвідношення інтервалів дискретності  $\lambda = T_i/T_u$  є цілим числом, як правило, більшим за 1.

Питання регулювання силового струму перетворювачів розглянуто детально в ряді попередніх публікацій, наприклад, в [3].

Для подальшого аналізу регулювання швидкості доцільно охарактеризувати динамічні властивості формування електромагнітного моменту двигуна в загальному вигляді. З достатньою точністю можна вважати, що при стрибкоподібній зміні вихідного сигналу регулятора швидкості момент змінюється за експоненціальним законом, як це показано на рис. 2.

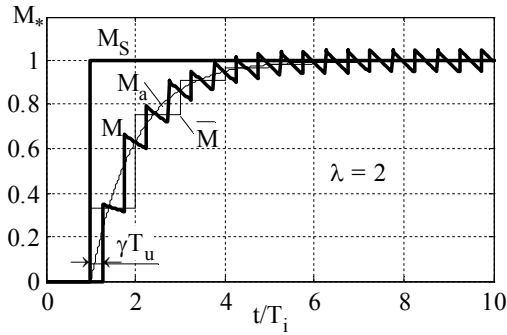


Рис. 2. Процес формування електромагнітного моменту двигуна

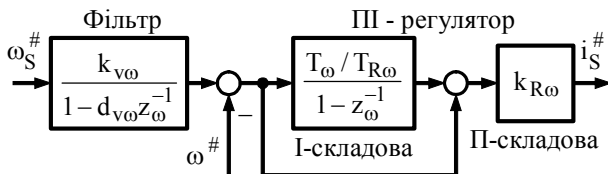


Рис. 3. Структурна схема регулятора швидкості

Регулювання швидкості у сучасному типовому електроприводі здійснюється за алгоритмом, який характеризує структурна схема, зображена на рис. 3. Схема відповідає пропорційно-інтегральному закону регулювання з фільтром по каналу завдання (далі відповідні процеси регулювання мають позначку "PIF"). При вимиканні фільтра та інтегральної (I-) складової регулятора він стає пропорційним (позначка "P" для процесів регулювання). У якості зворотного зв'язку може використовуватися як миттєве, так і середнє значення швидкості. В обох випадках параметри регулятора можуть бути визначені за модульним критерієм з урахуванням підходу, розглянутого, наприклад, в [3].

При регулюванні миттєвої швидкості параметри регулятора відповідають виразам:

$$k_{R\omega} = \frac{k_i(1-d_m^v)^2}{C_M k_J k_\omega [v_1(1+d_m^v) + v_2(3-d_m^v)]}; \quad T_{R\omega} = \frac{d_1(1+3d_m^v) + d_2(5-d_m^v)}{(1-d_m^v) \cdot (v_1 + v_2)} \cdot T_\omega; \quad k_J = T_i / J, \quad (2)$$

де  $J$  – сумарний момент інерції електропривода;  $k_\omega$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за швидкістю;  $v = T_\omega/T_i$  – кратність інтервалів дискретності.

$$k_{v\omega} = \frac{T_\omega}{T_\omega + T_{R\omega}}; \quad d_{v\omega} = \frac{T_{R\omega}}{T_\omega + T_{R\omega}}; \quad v_1 = v(d_1 + d_2) - (d_1 d_m + d_2) \cdot \frac{1-d_m^v}{1-d_m}; \quad v_2 = (d_1 d_m + d_2) \cdot \frac{1-d_m^v}{1-d_m} - v d_m^v (d_1 + d_2).$$

Регулювання середньої швидкості забезпечує регулятор з параметрами:

$$k_{R\omega} = \frac{2k_i v (1-d_m^v)^2}{C_M k_J k_\omega V_\omega}; \quad T_{R\omega} = \left[ \frac{V_\omega}{v^2 (d_1 + d_2) \cdot (1-d_m^v)^2} - 1 \right] \cdot T_\omega; \quad V_\omega = w_1(1+d_m^v) + w_2(3-d_m^v) + w_3(5-3d_m^v), \quad (3)$$

де  $w_1 = v^2(d_1 + d_2) + (d_1 d_m + d_2) \cdot [(1-d_m^v) \cdot (1+d_m) - 2v(1-d_m)] / (1-d_m)^2$ ;  
 $w_2 = v^2(d_1 + d_2) \cdot (1-d_m^v) + 2(d_1 d_m + d_2) \cdot [v(1-d_m) \cdot (1+d_m^v) - (1+d_m) \cdot (1-d_m^v)] / (1-d_m)^2$ ;  
 $w_3 = \{(1-d_m^v) \cdot (1+d_m) \cdot (d_1 d_m + d_2) - v(1-d_m) \cdot d_m^v \cdot [2 \cdot (d_1 d_m + d_2) + v(d_1 + d_2) \cdot (1-d_m)]\} / (1-d_m)^2$ .

В неперервних системах підпорядкованого регулювання процес регулювання струму та формування моменту

Такий процес описує дискретна передавальна функція відносно середнього значення моменту  $\bar{M}$

$$\frac{\bar{M}(z_i)}{i_S^\#(z_i)} = \frac{(1-d_m)z_i^{-1}}{k_i(1-d_m z_i^{-1})} \cdot (d_1 + d_2 z_i^{-1}) \cdot C_M, \quad (1)$$

де  $i_S^\# = M_S k_i / C_M$  – завдання від регулятора швидкості електропривода на моментоутворюючу складову струму;

$k_i$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом;

$C_M$  – конструктивний параметр електродвигуна, що характеризує зв'язок моменту зі струмом;

$d_m = \exp(-T_i/T_m)$  – параметр, що характеризує динаміку формування моменту;

$T_m$  – стала часу експоненціального формування моменту;

$d_1, d_2$  – коефіцієнти, що характеризують перехід до середнього значення струму;

$$d_1 = \frac{1}{1-d_e^\lambda} - \frac{d_e^{1-\gamma}}{\lambda(1-d_e)}, \quad d_2 = \frac{d_e^{1-\gamma}}{\lambda(1-d_e)} - \frac{d_e^\lambda}{1-d_e^\lambda};$$

$T_e$  – електромагнітна стала часу силового кола;

$d_e = \exp(-T_u/T_e)$ .

двигуна часто характеризують аперіодичною ланкою з передавальною функцією  $1/(T_T p + 1)$ . При цьому параметри неперервного регулятора швидкості  $R_{\omega}^H(p)$  визначаються загальновідомими виразами:

$$R_{\omega}^H(p) = k_{R_{\omega}}^H \cdot \frac{T_{R_{\omega}}^H p + 1}{T_{R_{\omega}}^H p} ; k_{R_{\omega}}^H = \frac{k_i}{C_M J} \cdot \frac{1}{2 T_T} ; T_{R_{\omega}}^H = 4 T_T . \quad (4)$$

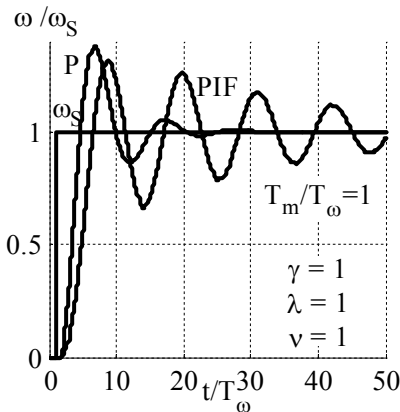


Рис. 4. Перехідні функції контуру швидкості при некоректних параметрах регулятора

Зрозуміло, що без врахування дискретності функціонування цифрової системи регулювання, тобто при виборі  $T_T = T_m$ , при розрахунках параметрів дискретного регулятора швидкості за формулами (4) процеси регулювання не будуть відповідати бажаним (рис. 4). Приблизно врахувати вплив екстраполятора 2 (рис. 1), затримки в часі  $\gamma T_u$  та усереднення при вимірюванні швидкості електропривода з позицій теорії автоматичного регулювання [6] можливо за рахунок додаткових складових при розрахунку сталої  $T_T$ :

$$T_T = T_m + T_E + T_3 + T_Y ; T_E = T_{\omega} / 2 ; T_3 = \gamma T_u / 2 ; T_Y = T_{\omega} / 2 , \quad (5)$$

де  $T_E$ ,  $T_3$ ,  $T_Y$  – параметри, які враховують відповідно вплив екстраполятора, затримки при регулюванні струму та усереднення при вимірюванні швидкості.

Відхилення значень параметрів регулятора, розрахованих за формулами (4) з урахуванням (5), від бажаних значень параметрів, визначених на підставі формул (2) та (3), охарактеризовано відносною похибкою  $\delta$ , значення якої при варіаціях величин  $T_m$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$  та  $\nu$  надано на рис. 5 та рис. 6.

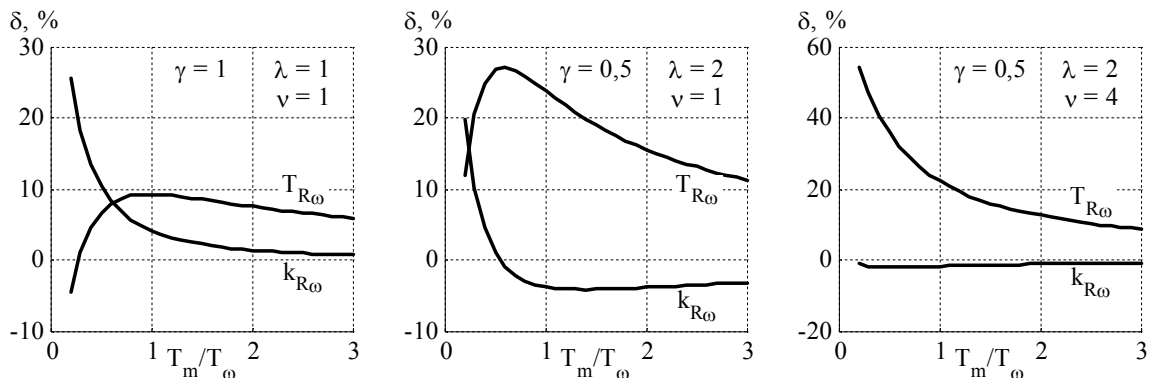


Рис. 5. Графіки залежності відносної похибки приблизного визначення параметрів регулятора миттєвої швидкості від швидкодії формування моменту електропривода

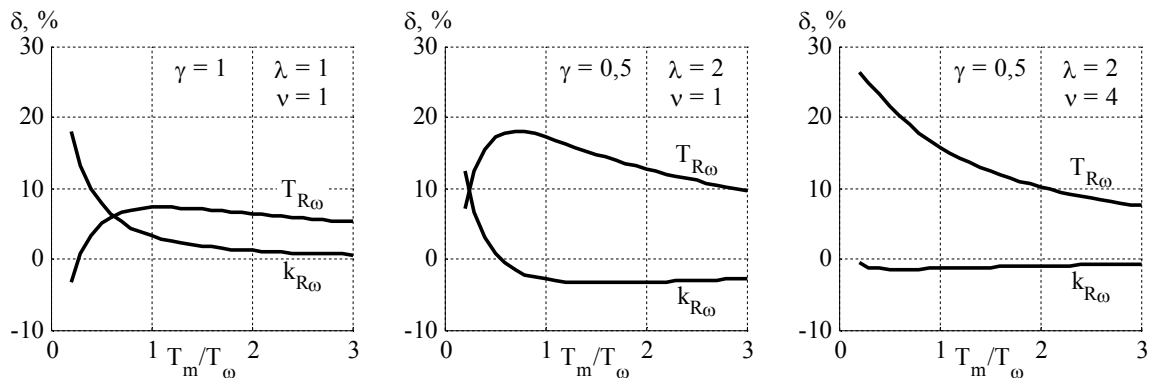
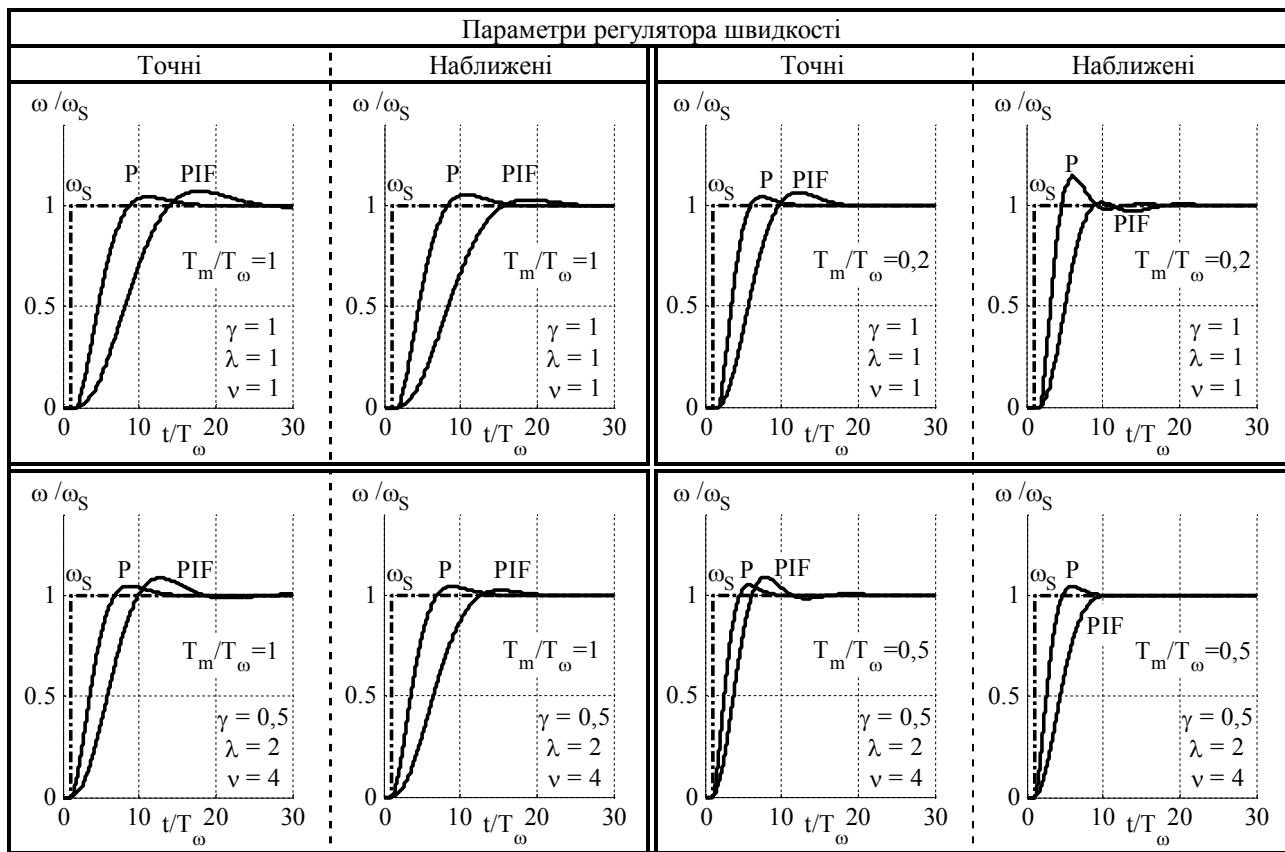


Рис. 6. Графіки залежності відносної похибки приблизного визначення параметрів регулятора середньої швидкості від швидкодії формування моменту електропривода

Аналіз залежностей (рис. 5 та рис. 6) дозволяє прогнозувати, що процеси регулювання швидкості наближаються до бажаних при зменшенні швидкодії формування моменту електропривода. Більш суттєве відхилення параметрів регулятора швидкості має місце при великій швидкодії формування моменту. При цьому відносне збільшення коефіцієнта  $k_{R_{\omega}}$  призведе до зростання перерегулювання у випадку пропорційного регулятора швидкості, а на підставі відносного збільшення сталої інтегрування  $T_{R_{\omega}}$  можна очікувати зменшення швидкодії регулювання при пропорційно-інтегральному регуляторі швидкості. Крім того, порівняння рис. 5 та рис. 6 показує, що вплив приблизного розрахунку параметрів менший при регулюванні середнього значення

швидкості. Зроблені висновки підтверджують результати моделювання систем регулювання, частку яких надано в табл. 1.

Таблиця 1 - Порівняння процесів регулювання миттєвої швидкості



### Висновки.

1). При цифровому регулюванні швидкості електропривода можливо використовувати результати, отримані методами проектування неперервних систем, враховуючи в еквівалентній сталій часу динамічні властивості формування електромагнітного моменту двигуна, часові дискретності функціонування регулятора швидкості електропривода та силового перетворювача електроенергії, а також особливості реалізації зворотного зв'язку за швидкістю, якщо внутрішній контур (струму або моменту) має швидкодію зі сталою часу, що приблизно дорівнює або більша інтервалу дискретності регулювання швидкості.

2). При наближенні до максимально можливої швидкодії формування електромагнітного моменту двигуна використання приблизних розрахунків для пропорційно-інтегрального регулятора швидкості може призвести до суттєвого зниження швидкодії регулювання, а для пропорційного – до підвищення перерегулювання. У цьому разі краще застосовувати методи параметричного синтезу, основані на теорії імпульсних систем.

### Література.

1. Старостін С.С. Урахування дискретних властивостей силових перетворювачів електроенергії при синтезі електромехатронних систем // Вісник Національного технічного університету “Харківський політехнічний інститут”. Сер. “Електротехніка, електроніка та електропривод”. Тем. випуск 45 “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія та практика”. - Харків, НТУ ХПІ, 2005. - С.348 - 351.
2. Старостін С.С. Обґрунтування імпульсної моделі широтно-імпульсних перетворювачів електроенергії // Технічна електродинаміка. Тем. випуск “Силова електроніка та енергоефективність”. Частина 3. - 2006. - С.114-117.
3. Старостин С.С. Оптимизация цифровых систем регулирования электроприводов с широтно-импульсными преобразователями // Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвідомчий наук.-техн. збірник. - Київ: Техніка, 2001. - Вип.56. - С.3 - 9.
4. Riefenstahl U. Elektrische Antriebssysteme. - Wiesbaden: Teubner, 2006. - 443 S.
5. Толочко О.І. Аналіз та синтез електромеханічних систем зі спостерігачами стану. - Донецьк: Норд-Прес, 2004. - 298 с.
6. Микропроцессорные автоматические системы регулирования / Под ред. В.В.Солодовникова. - М.: Высшая школа, 1991. - 255 с.