**Возняк О.М.**

к.т.н., доцент

Полевода Ю.А.

к.т.н., доцент

Тихоненко С.В.

аспірант

Косаковський А.Ю.

аспірант

**Вінницький національний
аграрний університет****Vozniak O.**

Ph.D., Associate Professor

Polievoda Y.

Ph.D., Associate Professor

Tikhonenko S.

postgraduate student

Kosakovskiy A.

postgraduate student

**Vinnitsia National Agrarian
University****УДК 681.5.015:621.313****DOI: 10.37128/2306-8744-2025-4-11**

СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО КОНТУРА РЕГУЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

У статті детально розглянуто питання побудови сучасних цифрових систем керування електроприводами з урахуванням специфічного впливу часової дискретизації на роботу таких систем. Акцент зроблено на аналізі процесу перетворення неперервних динамічних систем у цифрову форму, оскільки саме цей етап є ключовим при переході від класичних аналогових методів керування до нових цифрових технологій. Важливим аспектом дослідження стало врахування впливу вибраного періоду дискретизації, адже він безпосередньо визначає рівень точності відтворення сигналів, впливає на ефективність роботи електропривода.

Для опису поведінки системи була створена математична модель цифрового керування, яка ґрунтується на використанні імпульсних передавальних функцій та апарату з-перетворень. На основі отриманої моделі розроблено методику синтезу цифрового регулятора, що враховує особливості конкретного об'єкта керування, технічні обмеження на реалізованість алгоритмів та необхідність досягнення заданих динамічних характеристик.

Запропонований підхід не обмежується лише теоретичними викладками, адже його ефективність підтверджена результатами комп'ютерного моделювання. Проведені дослідження показали, що синтезований регулятор забезпечує адекватність математичної моделі та відтворює бажану поведінку системи з високою точністю. Результати моделювання засвідчили, що застосування такої методики дозволяє підвищити надійність та якість роботи сучасних електроприводів, розширюючи можливості їх використання у різних сферах промисловості та автоматизованих комплексах. Отримані результати мають не лише теоретичне, а й практичне значення, оскільки вони відкривають перспективи для подальшого вдосконалення цифрових систем керування.

Ключові слова: цифрова система керування, електропривод, дискретизація, з-перетворення, імпульсна передавальна функція, цифровий регулятор, стійкість системи.

Вступ. У сучасних умовах інтенсивного розвитку автоматизованих систем керування, цифрові технології набувають особливого значення в галузі електроприводів. Цифрові системи керування електроприводами забезпечують підвищену точність регулювання, широку гнучкість, адаптивність до зовнішніх впливів та можливість реалізації складних алгоритмів у програмному середовищі. Вони є основою функціонування інтелектуальних

електромеханічних систем, що використовуються в промисловості, транспорті, енергетиці та побутових автоматизованих пристроях [1-3].

Актуальність дослідження обумовлена необхідністю підвищення ефективності та надійності цифрових систем керування електроприводами, особливо в умовах динамічної зміни навантажень, зовнішніх збурень та високих вимог до



енергоефективності. Зокрема, особливу увагу слід приділяти впливу дискретизації за часом, що зумовлена природою цифрової обробки сигналів, на динамічні властивості системи [4, 5]. Недооцінка ефектів квантування та затримок може призводити до втрати точності регулювання або навіть до нестійкості системи.

Метою цієї роботи є дослідження особливостей побудови цифрових систем керування електроприводами з урахуванням часової дискретизації, розробка математичних моделей таких систем, а також синтез цифрових регуляторів із заданими показниками якості.

Аналіз останніх досліджень.

Аналіз цифрових систем керування електроприводом. Цифрові системи керування електроприводом (ЦСК) являють собою сучасний підхід до реалізації функцій регулювання і керування, що базується на використанні цифрових елементів. Ці елементи виконують логічні, обчислювальні, перетворювальні та запам'ятовуючі функції, що забезпечує можливість реалізації складних алгоритмів у компактній і зручній формі. У структурі цифрової системи керування основними вузлами є цифровий задавальний пристрій, цифровий суматор, цифровий регулятор, аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі, а також керований перетворювач, що забезпечує взаємодію з електродвигуном. Завдяки цим складовим, ЦСК формує і реалізує необхідний закон керування для досягнення бажаних характеристик руху – положення, швидкості або прискорення [6-8].

Цифрові системи можуть реалізовуватись апаратно або програмно. В апаратному варіанті кожен функціональний блок виконується у вигляді окремого вузла, побудованого на мікросхемах, що забезпечує високу швидкодію, але обмежує гнучкість при зміні алгоритмів. У програмній реалізації всі функції виконуються програмним шляхом на базі мікропроцесора або мікро-ЕОМ, що дозволяє легко адаптувати систему до нових умов чи змін технологічного процесу, просто внесенням змін в програму [9, 10].

Цифрові системи керування мають низку важливих переваг. Це висока завадостійкість, точність обробки сигналів, можливість реалізації складних алгоритмів регулювання, компактність та зниження вартості за рахунок високого рівня інтеграції цифрових мікросхем. Цифрове задання

режимів роботи забезпечує простоту в керуванні та автоматизації, особливо в системах, де часто змінюються параметри технологічного процесу. Завдяки високій гнучкості та можливості легкої адаптації цифрові системи стають незамінними в сучасних виробничих електроприводах [11, 12].

Цифрові системи керування електроприводом, на відміну від неперервних аналогових, характеризуються дискретною природою за часом та рівнями сигналів. Незважаючи на це, вони реалізують ті самі принципи керування – модальне, підпорядковане регулювання, послідовну та паралельну корекцію. Проте дискретність ЦСК може впливати на точність і динамічні характеристики електропривода, що вимагає врахування параметрів дискретизації при розробці системи. Водночас розвиток мікропроцесорної техніки сприяє значному зростанню ефективності цифрових систем, підвищенню їхньої надійності та зменшенню енергоспоживання, що робить їх провідною технологією в сфері автоматизованого електропривода.

ЦСК – це системи, побудовані на основі цифрових елементів (ЦЕ), які реалізують дискретні логічні, обчислювальні, перетворювальні та запам'ятовуючі функції. Вони є основою сучасних систем автоматизованого керування електроприводами, що забезпечують високу точність, гнучкість і адаптивність [13].

На прикладі схеми (рис. 1) можна виділити такі основні функціональні вузли:

- ЦЗП (цифровий задавальний пристрій): формує вихідні керуючі сигнали у цифровій формі.

- ЦС (цифровий суматор): здійснює обчислення відхилення між задавальним сигналом і сигналом зворотного зв'язку.

- ЦР (цифровий регулятор): реалізує регулювання згідно з обраним алгоритмом (наприклад, ПІ, ПІД, модальне керування).

- ЦАП (цифро-аналоговий перетворювач): перетворює цифровий сигнал у аналоговий для виконавчих пристроїв.

- АЦП (аналогово-цифровий перетворювач): забезпечує перетворення аналогового сигналу датчика у цифрову форму.

- КП-Д (керований перетворювач-двигун): виконавча частина, яка реалізує фізичне переміщення, зміну швидкості або моменту.

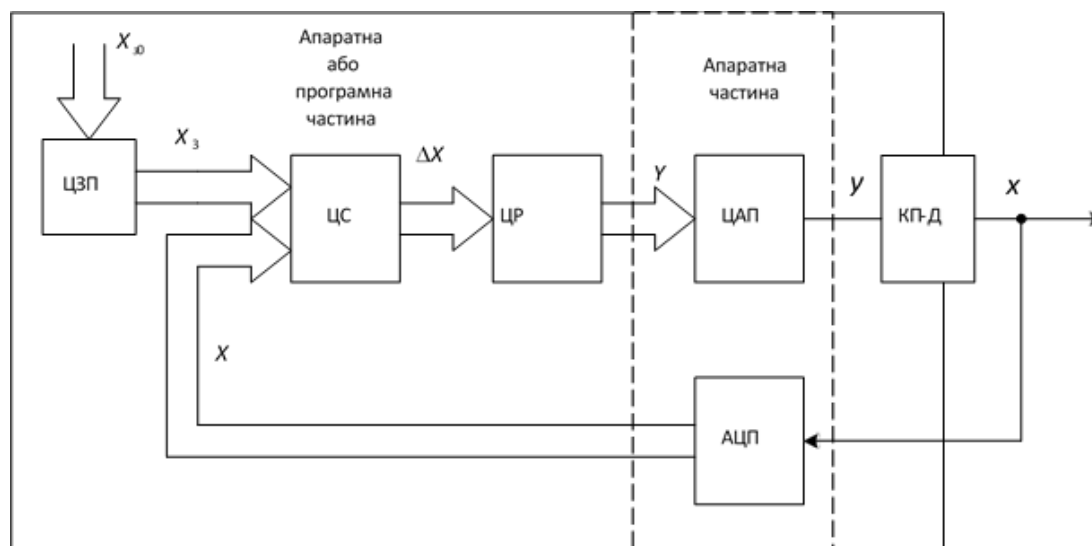
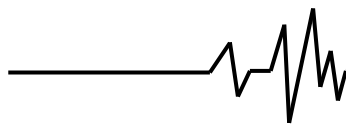


Рис. 1. Схема цифрової системи керування електропривода

Цифрові СКЕП на базі дискретних передатних функцій.

Цифрові системи керування електроприводом (ЦСКЕП) з програмним способом керування створюються на базі універсального керуючого пристрою – мікропроцесорної електронно-обчислювальної машини (мікро-ЕОМ). Така структура дозволяє реалізувати весь алгоритм керування у вигляді послідовного програмного циклу, що охоплює як формування задаючого сигналу x_3 , так і порівняння його з сигналом зворотного зв'язку, з подальшим обчисленням відхилення $\Delta x = x_3 - x$ та формуванням відповідного керуючого впливу. Ці дії відбуваються після попереднього завантаження початкових параметрів, таких як x_3^0 , які визначають цільову поведінку системи.

Усі ці функції реалізуються у межах одного програмного циклу мікро-ЕОМ, тривалість якого визначається періодом T_p . Протягом цього періоду мікропроцесор здійснює послідовне зчитування даних з вимірювальних датчиків, обчислення необхідних параметрів керування відповідно до заданого алгоритму, а також формування і видачу керуючого сигналу на виконавчу частину системи. Така реалізація керування забезпечує гнучкість, адаптивність і можливість оперативної модифікації алгоритмів, що особливо важливо в умовах змінних зовнішніх впливів або зміни режимів роботи привода.

Виконавча частина системи, тобто керований перетворювач (КП), що подає електричну енергію на двигун, може працювати як у неперервному, так і в дискретному режимі. У дискретному режимі керування діє з певним часовим інтервалом дискретності T_n , що характерно для таких пристроїв, як керовані випрямлячі на тиристорах або транзисторах, широтно-імпульсні перетворювачі тощо. У таких випадках у цифровій системі керування виникає

необхідність врахування двох окремих процесів квантування – одного, що визначається періодом обчислень T_p , і іншого, що пов'язаний з реалізацією силового впливу з інтервалом T_n .

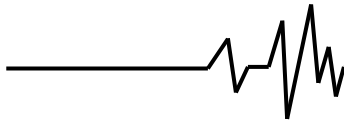
На принциповій схемі ці процеси квантування умовно позначаються ключами, які відкриваються або закриваються з кутовою частотою $2\pi/T_n$, що відповідає частоті оновлення керуючого сигналу на виході мікро-ЕОМ та електрорушійної сили керованого перетворювача (рис. 2). Оновлення керуючої дії відбувається у моменти закритого стану ключів, що синхронізує зміну значення керуючого сигналу з фазами роботи силового елемента системи.

Для забезпечення надійної та узгодженої роботи системи необхідна синхронізація роботи обчислювальної частини (мікро-ЕОМ) з виконавчою частиною (КП). Якщо періоди T_p і T_n є кратними між собою і між початковими імпульсами, які ініціюють ці процеси, відсутній часовий зсув Δt , тоді можливо спростити систему, розглядаючи її як одну єдину дискретну систему з узагальненим періодом. У такому випадку, замість двох незалежних процесів квантування, реалізується єдиний процес оновлення, що покращує узгодженість між алгоритмом керування та його фізичним втіленням у силовому блоці.

Отже, цифрові СКЕП, реалізовані на базі мікро-ЕОМ, є прикладом вискоєфективного підходу до побудови сучасних електроприводів з гнучким програмним керуванням, яке дозволяє досягати високої точності, стабільності та адаптивності в умовах змінного навантаження і технологічних вимог.

$$T = \max(T_p, T_n). \quad (1)$$

При $T_p = T_n$ $\Delta t_{\max} = T$. Оскільки надійну інформацію про конкретне значення змінної Δt_0



отримати важко, то в практичних розрахунках імпульсний сигнал $x_i = (nT)$ з амплітудно-імпульсною модуляцією при $T_i = \text{const}$, коли амплітуда дорівнює або пропорційна миттєвому значенню $x(t)$ на початку кожного періоду дискретності T (рис. 3). При $T_i = \text{const}$ імпульсний сигнал перетворюється в так звану решітчасту функцію $x[nT] = x[n]$, цілочисельний аргумент якої визначається номером такту n часової дискретності.

Відповідно до теорії автоматичного керування (ТАК) ЦСК з програмним способом керування без врахування квантування за рівнем, математично описується на основі теорії імпульсних систем. Неперервний сигнал $x(t)$ перетворюється в квантований за часом

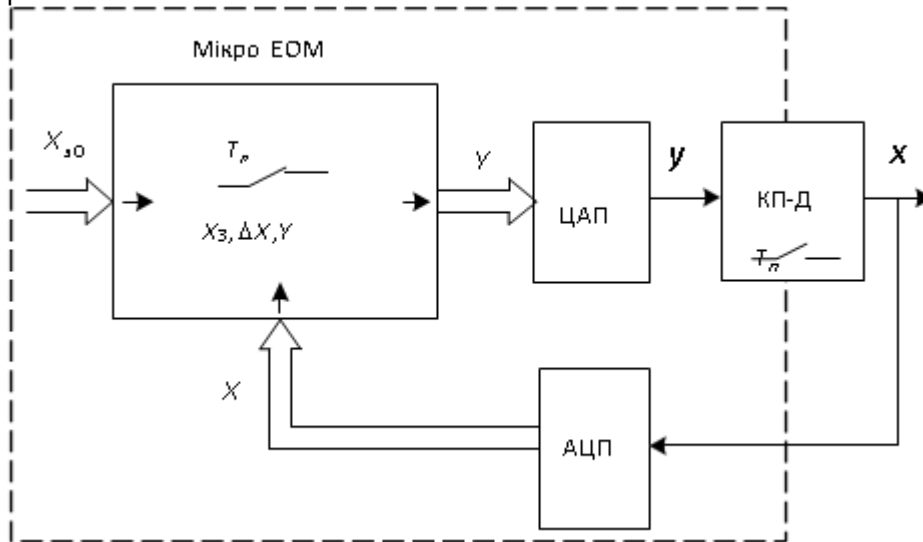


Рис. 2. Цифровий контур електропривода

Відповідно до теорії автоматичного керування (ТАК) ЦСК з програмним способом керування без врахування квантування за рівнем, математично описується на основі теорії імпульсних систем. Неперервний сигнал $x(t)$ перетворюється в квантований за часом імпульсний сигнал $x_i = (nT)$ з амплітудно-імпульсною модуляцією при $T_i = \text{const}$, коли

амплітуда дорівнює або пропорційна миттєвому значенню $x(t)$ на початку кожного періоду дискретності T (рис. 3). При $T_i \rightarrow 0$ імпульсний сигнал перетворюється в так звану решітчасту функцію $x[nT] = x[n]$, цілочисельний аргумент якої визначається номером такту n часової дискретності.

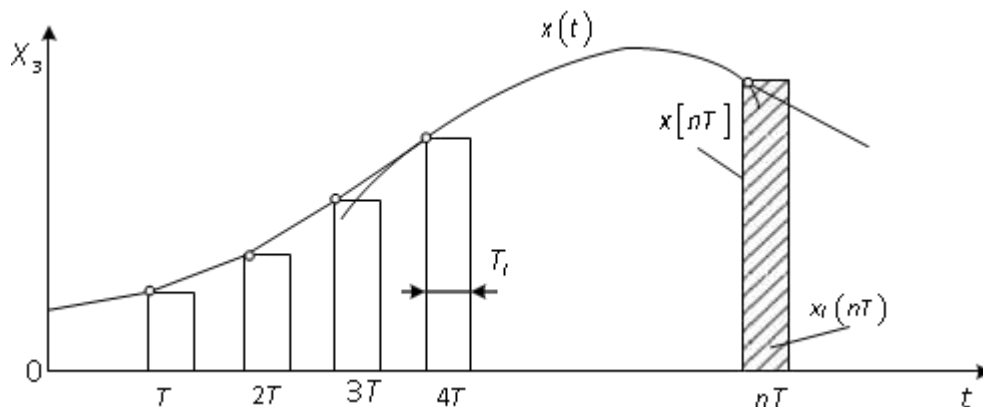


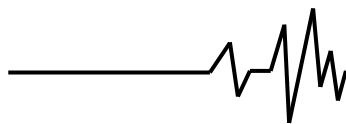
Рис. 3. Неперервний і квантований за часом сигнали ЦСК

Основні результати дослідження.

Аналіз і синтез імпульсних систем оснований на дискретному перетворенні Лапласа в формах:

$$D(p) = \sum_{n=0}^{\infty} f[nT] e^{-pnT} \quad (2)$$

або z-перетворення:



$$F(z) = \sum_{n=0}^{\infty} f[n] z^{-n} \quad (3)$$

де $f[nT]$ – решітчаста функція (оригінал), $f[nT] = f[n]$; $D(p)$ та $F(z)$ – зображення решітчастої функції $z = e^{pT}$.

Неперервною ланкою в даній схемі (рис. 4) є об'єкт керування з передавальною

функцією $W_{ок}(p)$, вихідною координатою у якого може бути, наприклад, струм чи момент, швидкість, положення (кут повороту) електропривода. До НЛ приєднані всі ланки розімкнутого в точці Р контуру з неперервною передавальною функцією.

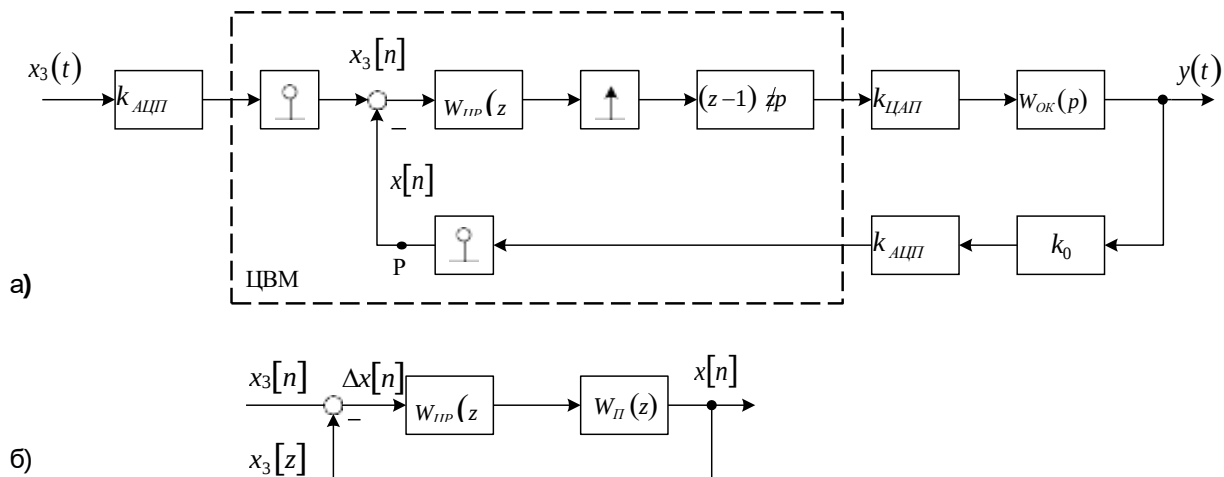


Рис. 4. Розгорнута (а) і згорнута (б) структурні схеми цифрового контуру регулювання

Методика синтезу цифрового контуру регулювання.

Метою синтезу цифрового регулятора є забезпечення необхідної якості регулювання електропривода – як у статичних режимах (точність підтримання заданої величини), так і в динамічних (швидкість реагування на зміну завдання). Цей підхід передбачає визначення структури і параметрів цифрового регулятора, що забезпечуватиме бажані характеристики системи.

Цифровий контур керування (у згорнутому вигляді) складається з двох основних частин:

1. Цифрового регулятора (ЦР) – частини, яка підлягає синтезу.

2. Зведеної неперервної частини (об'єкта керування із виконавчим механізмом та елементами перетворення сигналів) – ця частина вважається незмінною.

Об'єктом безпосереднього синтезу є саме цифровий регулятор. Процес синтезу полягає у підборі його дискретної передавальної функції (ДПФ), яка забезпечить виконання заданих динамічних вимог.

На першому етапі синтезу задається бажана динаміка замкнутого контуру, зазвичай у вигляді неперервної перехідної характеристики (наприклад, $h_{баж}(t)$). Потім цю функцію переводять у дискретну форму ($h_{баж}[n]$), відповідно до періоду квантування T .

За допомогою перетворення Z отримують дискретну передавальну функцію замкнутого контуру:

$$W_{баж}(z) = \frac{Z\{h_{баж}[n]\}(z-1)}{z} \quad (4)$$

Ця функція використовується для подальшого розрахунку необхідної ДПФ цифрового регулятора.

Визначення ДПФ регулятора.

Бажана передавальна функція відкритого контуру визначається як:

$$W_{баж}^0(z) = \frac{W_{баж}(z)}{1 - W_{баж}(z)} \quad (5)$$

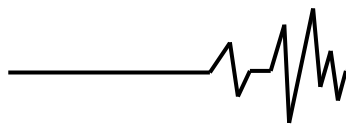
Далі, знаючи передавальну функцію об'єкта керування ($W_{П}(z)$), обчислюють передавальну функцію цифрового регулятора:

$$W_{ЦР}(z) = \frac{W_{баж}^0(z)}{W_{П}(z)} \quad (6)$$

Синтез можливий лише за дотримання певних умов, які гарантують фізичну і практичну реалізованість регулятора:

- Фізична реалізованість: передавальна функція замкнутого контуру повинна бути правильним дробом: порядок чисельника має бути меншим за порядок знаменника. Якщо в об'єкті є затримка, вона повинна бути врахована і в бажаній функції.

- Жорсткість системи: невеликі зміни параметрів регулятора не повинні суттєво



змінювати якість процесу керування. Для цього система повинна бути стійкою, а всі нулі поліномів передавальних функцій мати від'ємні значення (тобто бути мінімально фазовою).

- Точність у часі (усередині періоду дискретності):

щоб отримати бажаний вихід не лише в дискретні моменти часу, але й впродовж всього періоду, необхідно, щоб чисельник бажаної передавальної функції містив усі нулі чисельника функції об'єкта. Для цього:

$$B(z) = P(z) M(z), \quad (7)$$

де $P(z)$ – чисельник об'єкта, $M(z)$ – додатковий поліном, який визначають у процесі синтезу.

- Забезпечення заданого порядку астатизму: якщо потрібно, щоб система точно слідувала за постійним чи лінійно змінним сигналом, необхідно забезпечити певний порядок астатизму. Для цього:

$$1 - W_{\text{баж}}(z) = \frac{(z-1)^v N(z)}{D_{\text{баж}}(z)}, \quad (8)$$

де v – порядок астатизму, $N(z)$ – поліном, який визначається в процесі розв'язання рівняння реалізованості.

Щоб знайти параметри цифрового регулятора, складається так зване рівняння реалізованості:

$$P(z)M(z) + (z-1)^v N(z) = D_{\text{баж}}(z) \quad (9)$$

Це рівняння дозволяє розділити бажану динаміку між об'єктом і регулятором так, щоб загальна система вела себе відповідно до заданих вимог.

Розв'язання цього рівняння (наприклад, методом порівняння коефіцієнтів) дозволяє знайти поліноми $M(z)$ і $N(z)$. В результаті отримують ДПФ цифрового регулятора:

$$W_{\text{ЦР}}(z) = \frac{M(z)Q(z)}{(z-1)^{v-v_{\text{П}}} N(z)}, \quad (10)$$

де $Q(z)$ – знаменник ДПФ об'єкта, $v_{\text{П}}$ – порядок астатизму об'єкта.

Оптимальність за швидкодією.

Якщо бажану ДПФ замкнутого контуру записати у спеціальній формі, яка обмежує перехідний процес у часі (наприклад, такий, що завершується за l такт), то система забезпечить мінімальний можливий час перехідного процесу:

$$t_{\text{п.п.}}^{\text{min}} = l \cdot T \quad (11)$$

де l – порядок характеристичного полінома системи, T – період дискретності.

Синтез цифрового регулятора виконується за наступним загальним алгоритмом:

1. Визначається бажана динаміка замкнутого контуру.

2. Переводиться у дискретну форму.

3. Розраховується передавальна

функція відкритого контуру.

4. На основі передавальної функції об'єкта вираховується ДПФ цифрового регулятора.

5. Перевіряються і виконуються умови реалізованості.

6. Розв'язується рівняння реалізованості, отримуються поліноми $M(z)$ і $N(z)$.

7. Формується ДПФ регулятора.

Ця методика дозволяє формально й ефективно створити цифровий контур керування, що забезпечує задану якість керування електроприводом.

Алгоритм синтезу цифрового регулятора (рис. 5).

1. Введення бажаних динамічних характеристик (наприклад, бажана перехідна характеристика замкнутого контуру).

2. Перетворення $h_{\text{баж}}(t)$ у $h_{\text{баж}}(n)$ (оцифровування перехідної характеристики з урахуванням періоду дискретизації T).

3. Обчислення Z-перетворення бажаної $h_{\text{баж}}(n)$.

4. Отримання $W_{\text{баж}}(z)$.

5. Визначення бажаної передавальної функції розімкнутого контуру $W_{\text{обаж}}(z)$.

$W_{\text{обаж}}(z) = W_{\text{баж}}(z) / W_{\text{П}}(z)$ ($W_{\text{П}}(z)$ — передавальна функція зведеної неперервної ланки).

6. Розрахунок передавальної функції цифрового регулятора $W_{\text{ЦР}}(z) = W_{\text{обаж}}(z)$.

7. Перевірка реалізованості бажаної динаміки: чи правильний дріб $W_{\text{баж}}(z)$? Чи стійка система? Чи має $W_{\text{баж}}(z)$ усі нулі $P(z)$?

Чи забезпечується бажаний порядок астатизму?

Виконання умови реалізованості:

- знаходження поліномів $M(z)$ та $N(z)$ (порівняння коефіцієнтів лівої і правої частини рівняння).

- Визначення $W_{\text{ЦР}}(z)$.

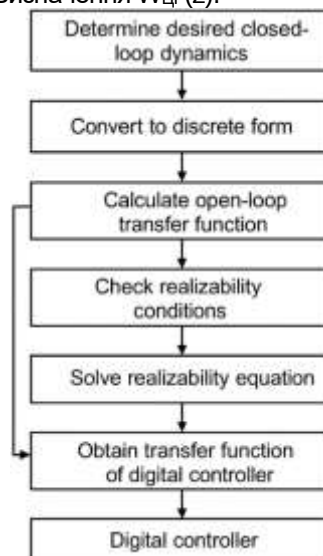
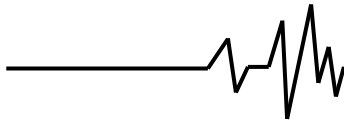


Рис. 5. Алгоритм синтезу цифрового регулятора



Висновки. Цифрові системи керування електроприводами становлять невід'ємну частину сучасних автоматизованих електромеханічних комплексів. Їхня архітектура базується на використанні цифрових елементів, здатних виконувати широкий спектр обчислювальних, логічних та перетворювальних операцій. До складу таких систем, як правило, входять цифрові задавальні пристрої, суматори, регулятори, аналого-цифрові та цифро-аналогові перетворювачі, а також виконавчий механізм, що представлений силовим перетворювачем та електродвигуном.

Завдяки впровадженню мікропроцесорної техніки цифрові системи забезпечують реалізацію складних алгоритмів керування у програмному середовищі, що істотно розширює їх функціональні можливості, підвищує точність і забезпечує адаптивність до змін зовнішніх умов. Високий ступінь завадостійкості, структурна гнучкість і можливість інтеграції в системи вищого рівня керування визначають широке застосування цифрових систем у промисловості, транспорті, енергетиці та робототехніці.

Дискретна природа цифрових систем потребує врахування ефектів квантування як за рівнем, так і за часом. Важливим аспектом є правильний вибір періодів дискретизації обчислювального та силового каналів, а також їх синхронізація, що безпосередньо впливає на точність, стійкість та швидкість системи керування. За умови рівності періодів дискретизації та відсутності затримок між обчисленням і реалізацією керувального впливу забезпечується максимальна ефективність функціонування цифрової системи.

Процес синтезу цифрових регуляторів базується на побудові бажаної передавальної функції замкненої системи та подальшому визначенні передавальної функції регулятора шляхом поділу цієї функції на передавальну функцію об'єкта. При цьому необхідно дотримуватися умов реалізованості: забезпечити правильність дробу, включити в чисельник нулі об'єкта, а також враховувати вимоги щодо фазових властивостей регулятора. Такий підхід дозволяє формувати системи з наперед заданими показниками якості регулювання.

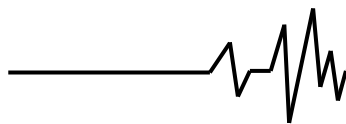
Математичне моделювання цифрових систем керування ґрунтується на методах імпульсної теорії та z-перетворень, які дозволяють адекватно описувати динаміку дискретних процесів у часовій області. Практична реалізація синтезованих регуляторів вимагає узгодження між обчислювальними характеристиками та фізичними властивостями об'єкта керування, що забезпечує досягнення

заданих динамічних показників.

Цифрові системи керування електроприводами відкривають нові можливості для побудови високоефективних автоматизованих систем із розширеними функціональними характеристиками, що відповідають сучасним вимогам до енергозбереження, надійності та точності регулювання у складних технологічних процесах.

Список використаних джерел

1. Возняк О. М., Ярошенко Л. В., Луц П. М., Тихоненко С. В. Аналітичний огляд методів та засобів керування електроприводами електромеханічних систем АПК. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2024. № 3 (114). С. 34–45. DOI: 10.37128/2306-8744-2024-3-5.
2. Солоня О., Возняк О., Замрій М., Тихонова С. ШІМ-керування електроприводом у мехатронних модулях за принципом просторововекторної модуляції. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2023. № 2(109). С. 53–61. DOI: 10.37128/2306-8744-2023-2-7.
3. Возняк О. М., Штуць А. А. Керування асинхронним електродвигуном змінного струму за принципом постійності V/F і звичайного ШІМ-керування. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2022. № 4 (119). С. 102–109. DOI: 10.37128/2520-6168-2022-2-16.
4. Іванов О. В. Цифрові системи автоматичного керування. Київ: Наукова думка, 2019. 280 с.
5. Шевченко В. М., Чернишов В. О. Теорія автоматичного керування електроприводами. Харків: ХНУ, 2018. 314 с.
6. Дьяков А. В. Моделювання і синтез цифрових регуляторів в електроприводах. Дніпропетровськ: Дніпропетровський національний університет, 2020. 245 с.
7. Сидоренко С. І., Литвиненко М. І. Методи і засоби цифрового керування в енергетичних системах. Житомир: Житомирський технологічний університет, 2021. 192 с.
8. Борисенко А. О., Мельник В. К. Основи електроприводів та систем керування електричними машинами. Київ: Вища школа, 2017. 330 с.
9. Бабич І. В. Квантування і дискретизація в цифрових системах керування. Запоріжжя: Запорізький національний університет, 2016. 250 с.
10. Луценко О. В., Гриценко Р. С. Цифрове управління системами з обмеженою дискретизацією. Київ: Наукова думка, 2020. 220 с.
11. Лабунський О. С., Петренко О. Г. Електроприводи та автоматичне керування електричними машинами. Львів: ЛНУ, 2015. 290 с.
12. Курилович М. Б., Павленко І. Ю. Аналіз цифрових регуляторів в електроприводних



системах. Житомир: Житомирський державний університет, 2019. 310 с.

13. Клепач С. І., Протас Ю. В. Дискретні системи та їх застосування в управлінні електроприводами. Черкаси: Черкаський національний університет, 2018. 180 с.

References

1. Vozniak, O. M., Yaroshenko, L. V., Luts, P. M., Tykhonenko, S. V. (2024). Analitichnyi ohliad metodiv ta zasobiv keruvannia elektropryvodamy elektromekhanichnykh system APK. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. № 3 (114), S. 34–45. [in Ukrainian].

2. Solona, O., Vozniak, O., Zamrii, M., Tykhonova, S. Shim-keruvannia elektropryvodom u mekhatronnykh moduliakh za pryntsyom prostorovovektornoj moduliatsii. *Vibratsii v tekhnitsi ta tekhnolohiiakh*. № 2 (109). S. 53–61. [in Ukrainian].

3. Vozniak, O. M., Shtuts, A. A. (2022). Keruvannia asynkronnym elektrodyhunom zminnoho strumu za pryntsyom postiinosti V/F i zvychainoho ShIM-keruvannia. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. № 4 (119). S. 102–109. [in Ukrainian].

4. Ivanov, O. V. (2019). Tsyfrovii systemy avtomatychnoho keruvannia. Kyiv: Naukova dumka. 280 s. [in Ukrainian].

5. Shevchenko, V. M., Chernyshov, V. O. (2018). Teoriia avtomatychnoho keruvannia elektropryvodamy. Kharkiv: KhNU, 314 s. [in Ukrainian].

6. Diakov, A. V. (2020). Modeliuvannia i syntez tsyfrovyykh rehulatoriv v elektropryvodakh. Dnipropetrovsk: Dnipropetrovskyi natsionalnyi universytet, 245 s. [in Ukrainian].

7. Sydorenko, S. I., Lytvynenko, M. I. (2021). Metody i zasoby tsyfrovoho keruvannia v enerhetychnykh systemakh. Zhytomyr: Zhytomyrskyi tekhnolohichnyi universytet, 192 s. [in Ukrainian].

8. Borysenko, A. O., Melnyk, V. K. (2017). Osnovy elektropryvodiv ta system keruvannia elektrychnymy mashynamy. Kyiv: Vyshcha shkola, 330 s. [in Ukrainian].

9. Babych, I. V. (2016). Kvantuvannia i dyskretyzatsiia v tsyfrovyykh systemakh keruvannia. Zaporizhzhia: Zaporizkyi natsionalnyi universytet, 250 s. [in Ukrainian].

10. Lutsenko, O. V., Hrytsenko, R. S. (2020). Tsyfrove upravlinnia systemamy z obmezhenoiu dyskretyzatsiieiu. Kyiv: Naukova dumka, 220 s. [in Ukrainian].

11. Labunskyi, O. S., Petrenko, O. H. (2015). Elektropryvody ta avtomatychno keruvannia elektrychnymy mashynamy. Lviv: LNU, 290 s. [in

Ukrainian].

12. Kurylovych, M. B., Pavlenko, I. Yu. (2019). Analiz tsyfrovyykh rehulatoriv v elektropryvodnykh systemakh. Zhytomyr: Zhytomyrskyi derzhavnyi universytet, 310 s. [in Ukrainian].

13. Klepach, S. I., Protas, Yu. V. (2018). Dyskretni systemy ta yikh zastosuvannia v upravlinni elektropryvodamy. Cherkasy: Cherkaskyi natsionalnyi universytet, 180 s. [in Ukrainian].

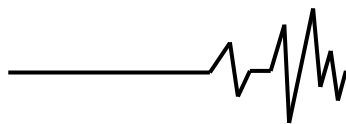
SYNTHESIS OF THE DIGITAL CONTOUR OF ELECTRICAL ACTUATOR

The article discusses in detail the issue of building modern digital control systems of electric drives, taking into account the specific impact of temporal sampling on the operation of such systems. The emphasis is on the analysis of the process of transformation of continuous dynamic systems into digital form, since this stage is the key to the transition from classic analog control methods to new digital technologies. An important aspect of the study was to take into account the impact of the selected sampling period, because it directly determines the level of accuracy of signal reproduction, affects the efficiency of the actuator.

To describe the behavior of the system, a mathematical model of digital control was created, which is based on the use of impulse transmitting functions and Z-translating apparatus. On the basis of the resulting model, a method of synthesis of a digital regulator was developed, which takes into account the features of a specific control object, technical restrictions on the implementation of algorithms and the need to achieve the given dynamic characteristics.

The proposed approach is not limited to theoretical layout, since its effectiveness is confirmed by the results of computer simulation. Studies have shown that the synthesized regulator provides adequacy of the mathematical model and reproduces the desired behavior of the system with high accuracy. The results of the modeling showed that the use of such a technique allows to improve the reliability and quality of operation of modern electric drives, expanding the possibilities of their use in various fields of industry and automated complexes. The results obtained are not only theoretical but also practical, as they open up prospects for further improvement of digital control systems.

Keywords: digital control system, electric drive, sampling, Z-transforming, impulse transmitting function, digital regulator, system stability.

**Відомості про авторів**

Возняк Олександр Миколайович – кандидат технічних наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, Україна, 21008, e-mail: voznyak@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0986-6869>).

Полевода Юрій Алікович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри біоінженерії, біо- та харчових технологій факультету технології виробництва, переробки та робототехніки у тваринництві Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).

Тихоненко Сергій Володимирович – здобувач третього освітньо-наукового рівня Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: galtuh@gmail.com).

Косаковський Артем Юрійович – здобувач третього освітньо-наукового рівня Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, <https://orcid.org/0009-0003-5028-251X>).

Vozniak Oleksandr – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Electric Power Engineering, Electrical Engineering, and Electromechanics, Vinnytsia National Agrarian University (3 Sonyachna St., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008; e-mail: voznyak@vsau.vin.ua, <https://orcid.org/0000-0002-0986-6869>).

Polievoda Yurii – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Bioengineering, Bio- and Food Technologies Faculty of Production Technology, Processing and Robotics in Animal Husbandry of the Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: vinyura36@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2485-0611>).

Tikhonenko Serhii – Recipient of the Third Educational and Scientific Level, Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008; e-mail: galtuh@gmail.com)

Kosakovskiy Artem – Recipient of the Third Educational and Scientific Level, Vinnytsia National Agrarian University (Sonyachna St., 3, Vinnytsia, Ukraine, 21008, <https://orcid.org/0009-0003-5028-251X>).

Стаття надійшла 07.09.2025

Стаття прийнята 20.09.2025

Опубліковано 25.12.2025.