УДК 621.311.161

Лежнюк П.Д., Бевз С.В.
Вінницький державний технічний університет, кафедра ЕСС

СИСТЕМИ ВІДНОСНИХ ОДИНИЦЬ В ОПТИМАЛЬНОМУ КЕРУВАННІ НОРМАЛЬНИМИ РЕЖИМАМИ ЕЕС

Розглянуто особливості і переваги застосування систем відносних одиниць при автоматизації оптимального керування режимами ЕЕС.

Одним з резервів, який дає змогу суттєво знизити рівень втрат в електроенергетичній системі (ЕЕС) та підвищити ефективність використання трансформаторів та автотрансформаторів з РПН є автоматизація оптимального керування [1, 2]. Вона забезпечує також достатні умови практичної реалізації організаційних заходів з зменшення втрат електричної енергії, що не вимагають значних капіталовкладень. Для підвищення ефективності оптимізаційних заходів необхідно здійснювати корекцію нормального режиму (НР) ЕЕС в темпі процесу. При цьому треба враховувати надійність роботи трансформаторів з РПН та доцільність їх використання на визначеному етапі керування. З метою поширення результатів розрахунку на низку подібних явищ доцільно проводити обробку результатів дослідження в узагальненому вигляді. Ці та інші аспекти задач оптимального керування НР ЕЕС вимагають використання єдиної методологічної бази та системного підходу на всіх етапах розв’язання задачі оптимального керування, починаючи із формування математичної моделі і закінчуючи практичною реалізацією оптимальних рішень. Проте досить часто в оптимальному керуванні відсутня така уніфікація. Найбільш продуктивним виявляється застосування узагальнюючих методів теорії подібності і моделювання на всіх рівнях вирішення проблеми. Ці методи дозволяють визначити стійкі зв’язки в системі керування і подати їх у відносних одиницях у вигляді критеріальних співвідношень, яким властива достатня узагальненість [3]. За цих обставин деякі зміни розрахункових умов не вимагають багаторазових повторень розрахунків, що дає можливість суттєво зменшити час генерації керувальних впливів і є одним з визначальних чинників під час розв’язання задач оперативного керування, яке здійснюється в темпі процесу. Це особливо важливо для електроенергетичних систем, де вимагається підтримання миттєвого балансу потужності.

Одним з найбільш пристосованих до розв’язання такого типу задач і аналізу отриманих результатів є критеріальний метод (КМ) [4], який дозволяє вирішувати проблеми оптимального керування в одній з розроблених систем відносних одиниць (СВО). Засобами КМ не лише встановлюються оптимальні параметри об’єктів та процесів, а й виявляються аналітичні зв’язки між критерієм оптимальності й оптимізованими параметрами системи, які можна модифікувати дуже широко, зокрема і як закони оптимального керування. Важливо відзначити й те, що використовуючи СВО на ґрунті критеріального методу задача не формалізується, а розкриваються фізичні причини неоптимальності, що сприяє ефективному її розв’язанню. Специфічною особливістю КМ з огляду на процес оптимального керування виступає той доконаний факт, що КМ є штучно адаптованим до розв’язання вищезгаданих задач, його розвиток має об’єктивне підґрунтя і визначається послідовним аналізом нових проявів під час оптимального керування. Причинно-наслідкові конструкції методу формуються з використанням різних систем відносних одиниць. За базис завжди приймається оптимальний варіант.

Задача оптимального керування формулюється як задача визначення допустимого керування з квадратичним критерієм якості [5], розв’язок якої можна подати у вигляді закону оптимального керування [6, 7]:

$$u_*(t) = -\pi y_*(t), \tag{1}$$

за умов

$$u_*(t) \in 1 + \delta u_*, \tag{2}$$

де $u_*(t)$ – вектор керування у відносних одиницях; $y_*(t)$ – відносні значення вектора спостереження ЕЕС; π – матриця коефіцієнтів зворотного зв'язку, за своїм фізичним змістом – критеріїв подібності оптимальних режимів ЕЕС; δu_* – область нечутливості (оптимальності) параметрів керування, верхня u_*^+ та нижня u_*^- межі якої визначаються з аналізу критеріальних залежностей, що характеризують НР ЕЕС (рис.1,а).

У цій моделі

$$u(t) = \begin{bmatrix} \dot{k}(t) \\ Q(t) \end{bmatrix}; \quad y(t) = \begin{bmatrix} \dot{S}_в(t) \\ \dot{I}_в(t) \\ \dot{U}(t) \end{bmatrix}, \tag{3}$$

де $\dot{k}(t)$ – вектор комплексних коефіцієнтів трансформації трансформаторів; $Q(t)$ – вектор навантаження джерел реактивної потужності (ДРП); $\dot{S}_в(t)$, $\dot{I}_в(t)$ – вектори потужностей і струмів у вітках ЕЕС; $\dot{U}(t)$ — вектор напруг у вузлах.

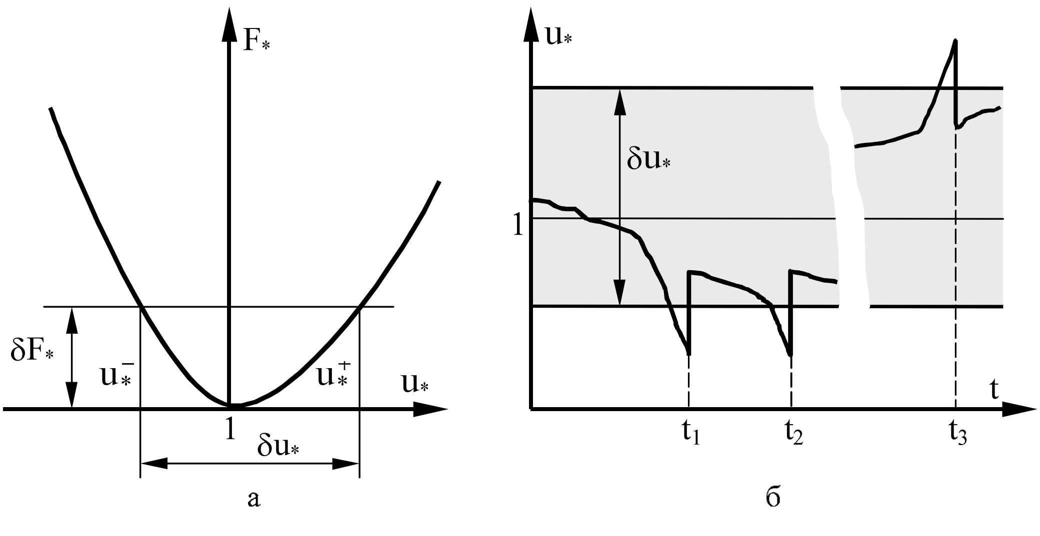

Рис.1. Оптимальне керування з використанням критеріальних залежностей.

Задача оптимального керування НР ЕС полягає в тому, щоб підтримувати значення критерію оптимальності F_* (рис.1,а) у встановленій області оптимальності δF_*. Для цього небхідно підтримувати значення складових вектора керування в зоні нечутливості δu_* . При виході з неї (на рис.1,б це моменти часу t_1, t_2, t_3) повинні здійснюватися керувальні впливи регулювальними пристроями (РП).

Детермінізація параметрів закону керування у критеріальній формі відбувається внаслідок переходу від часткових залежностей до узагальнених залежностей систем відносних одиниць. Це перетворення дозволяє порівнювати, синтезувати результати досліджень, поширювати їх на низку подібних випадків. Таке перетворення зумовлене тим, що кореляція основних фізичних ефектів, які визначають розвиток явища для групи подібних явищ однакова, а всі їх кількісні ознаки, виражені у відносній формі, тотожні.

Потрібно зауважити, що перехід до однієї із запропонованих СВО докорінно змінює характер дослідження: відмовляючись від початкових і обираючи нові безрозмірні величини, дослідник по-новому інтерпретує конкретне явище, розглядаючи його з позиції генералізації змінних, втрачаючи при цьому можливість фіксувати численні особливості конкретного процесу. На перший погляд узагальнені змінні – це досить прості вирази. Проте ця простота лише зовнішня. Адже в принцип їх побудови вкладена важлива ідея, яка полягає в угрупуванні величин, які утворюють узагальнені змінні.

Критерії подібності не є самостійними чинниками, оскільки вони об’єднують низку постійних і змінних параметрів, які визначають властивості процесу. Таке угрупування параметрів вносить важливі переваги [3]. Передусім – це зменшення кількості змінних і значне спрощення зв’язків між ними, що помітно полегшує обробку аналітичних та експериментальних досліджень. Крім того, критерії подібності акумулюють сукупність чинників-складників характеристики процесу, їх внутрішні зв’язки і впливи, які можуть самоскомпенсовуватися і видозмінюватися в межах одного комплексу. Існує багато способів отримання узагальнених критеріїв подібності, що відкриває широкі перспективи перед дослідником і дає змогу визначити парадигму різних випадків, об’єднаних загальними властивостями [3, 4].

Специфічною особливістю процесу керування є кількісне вираження математичної моделі (подання закону керування як критеріального співвідношення). Звідси необхідність використання систем відносних одиниць критеріального моделювання на всіх рівнях вирішення проблеми оптимального керування НР ЕС. Причому на різних етапах вирішення цієї проблеми можна використовувати критеріальні моделі однієї чи декількох СВО. На рис.2 показана класифікація можливих СВО, показані їх особливості і сфери застосування. Розглянемо їх детальніше.

СВО розроблені стосовно задачі оптимального керування НР ЕС, яка у загальному випадку зводиться до поліноміальних функцій вигляду [8]

мінімізувати

$$F(u) = \sum_{i=1}^{m_1} a_i \prod_{j=1}^{n} u_j^{\alpha_{ji}} , \qquad (4)$$

за умов

$$g_k = \sum_{i=m_k+1}^{m_{k+1}} a_i \prod_{j=1}^{n} u_j^{\alpha_{ji}} \le 1, \quad k = \overline{1,p}, \quad u_j > 0, \quad j = \overline{1,n}, \tag{5}$$

де $F(u)$ – деякий узагальнений техніко-економічний показник; a_i, α_{ji} – сталі коефіцієнти, які визначаються властивостями системи; m_1 – кількість членів цільової функції моделі; n – кількість змінних; m – кількість членів математичної моделі; p – кількість обмежень у математичній моделі.

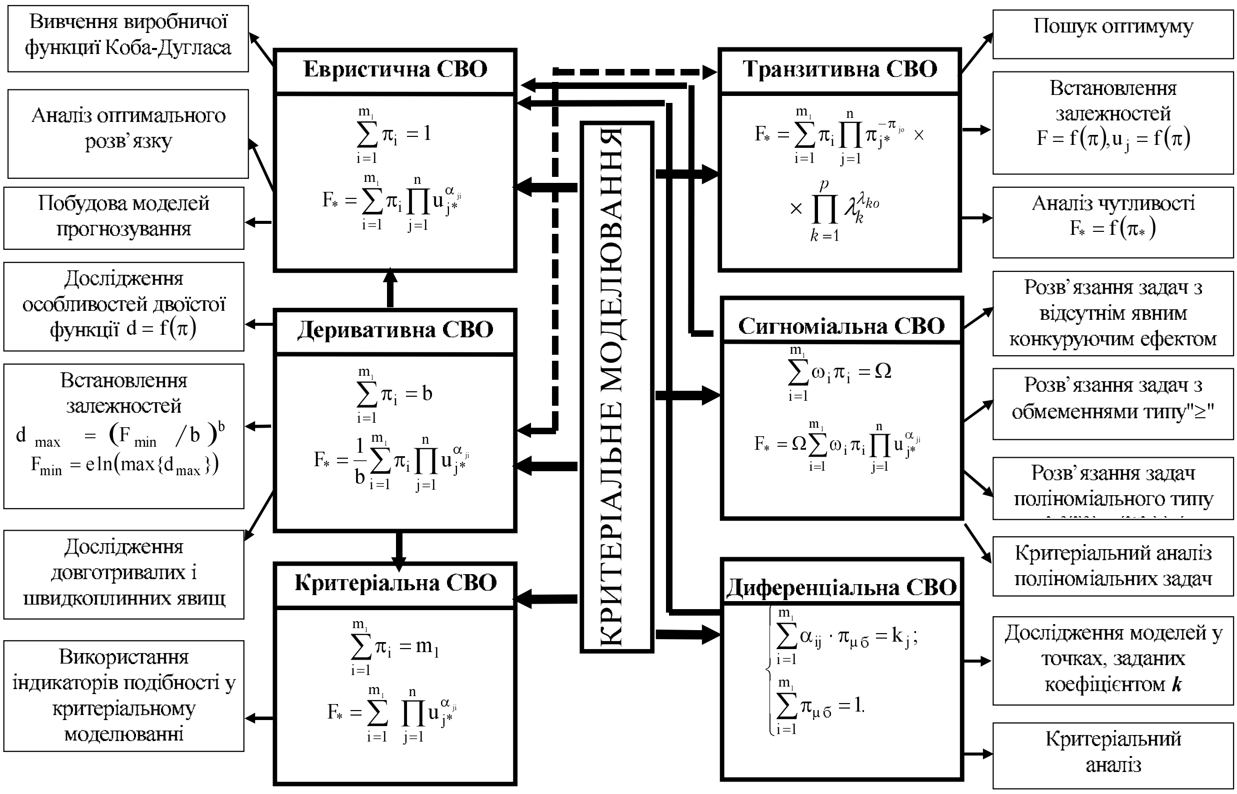

Рис.2. Системи відносних одиниць.

Залежно від особливості сформульованої задачі для її розв'язання можна послуговуватись тією чи іншою СВО, що передбачає перехід до безрозмірної форми запису. Тому розділивши рівняння (4) на базисне значення і ввівши позначення безрозмірних відношень базисних величин через критерії подібності

$$\pi_{iб} = \frac{a_i}{F_б} \prod_{j=1}^{n} u_{jб}^{\alpha_{ji}},$$

отримаємо критеріальне рівняння евристичної СВО

$$F_* = \sum_{i=1}^{m_1} \pi_{iб} \prod_{j=1}^{n} u_{j*}^{\alpha_{ji}}, \tag{6}$$

$$\sum_{i=1}^{m_1} \pi_{iб} = 1, \tag{7}$$

де $F_* = F/F_б$, $u_{j*} = u_j/u_{jб}$ – відношення керувальних параметрів до їх базових значень.

За допомогою (6) визначається відносна зміна F при відхиленні параметрів u_j від базису. За базис можна прийняти точку оптимуму чи будь-яку іншу. Тобто в цій точці може бути досліджена чутливість. З метою підвищення ефективності керування доцільно формувати керувальні впливи, враховуючи інформацію про динаміку процесу. Для потреб оптимального керування, використовуючи критеріальні моделі евристичної СВО, розроблено метод критеріального прогнозування [9]. Він уможливлює побудову багато- та одночинникових моделей прогнозування. Отже, евристична СВО дозволяє розв'язувати задачі оптимізації, проводити критеріальний аналіз отриманих розв'язків на чутливість, а також здійснювати побудову моделей прогнозування.

Для дослідження особливості сформульованої задачі на рівні її математичних моделей, а саме двоїстої задачі оптимізації [4] можна використовувати деривативну СВО, яка є узагальненням евристичної і зумовлена введенням коефіцієнта b до умови нормування

$$\sum_{i=1}^{m_1} \pi_i = b .$$

Ці критерії подібності відрізняються від критеріїв евристичної системи і їх визначають з виразу

$$\pi_i = \frac{b \cdot a_i}{F_{min}} \prod_{j=1}^{n} u_j^{\alpha_{ji}} .$$

Домноження критеріїв подібності на сталий коефіцієнт уможливлюється завдяки властивостям критеріїв подібності [3], які для будь-якого значення $\pi_i = idem$ передбачають $b \cdot \pi_i = idem$.

Вибір значення коефіцієнта нормування може бути засобом впливу на темп розвитку керування. Так, швидкоплинне явище завдяки введенню коефіцієнта b можна відтворити при моделюванні в уповільненому темпі, що дає можливість здійснити докладне спостереження. Інакше такий підхід дозволяє прискорити проходження змодельованого явища у потрібну кількість разів.

Як бачимо, на вибір коефіцієнта b не накладається практично ніяких обмежень; для кожного конкретного випадку його значення визначається метою дослідження. Залежно від вибраного значення нормуючого коефіцієнта розглядається та чи інша СВО (див. рис.2). Так, наприклад, коли $b=1$ користуються евристичною СВО, при $b=m_1$ – критеріальною, а при $b=\pm1$ — сигноміальною системами. У деривативній СВО критеріальні залежності подані у загальній формі.

При формуванні закону оптимального керування нормальними режимами ЕС САК використовують транзитивну СВО, яка акумулює досить широкі можливості стосовно практичної реалізації оптимального розв'язку [10]. Це, зокрема, безпосередній зв'язок між керувальними параметрами та матрицею критеріїв подібності π_j, яка виступає як матриця зворотного зв'язку в законі оптимального керування [4]

$$F=\sum_{i=1}^{m}\pi_i\times\prod_{j=1}^{m}\left(\frac{\pi_j}{a_j}\right)^{-\pi_{0j}}\prod_{k=1}^{p}\left(\sum_{i=m_k+1}^{m_{k+1}}\pi_i\right)^{-\sum\limits_{i=m_k+1}^{m_{k+1}}\beta_{n+1,i}}=\sum_{i=1}^{m_1}\pi_i\prod_{j=1}^{m}\left(\frac{\pi_i}{a_i}\right)^{-\pi_{io}}\prod_{k=1}^{p}\left(\lambda_k\right)^{\lambda_{ko}}.$$

де β_{ji} – елементи оберненої матриці показників α; $\lambda_k=\sum\limits_{\mu=m_k+1}^{m_{k+1}}\pi_{i0}, k=\overline{1,p}$ — нормовані множники Лагранжа.

Використання транзитивної СВО розкриває характерні властивості моделі, що полегшує проведення аналізу чутливості та визначення допустимої області оптимальних рішень, яка адекватна точності й повноті вихідної інформації.

Під час розв'язання задач оптимального керування НР ЕЕС досить часто трапляються випадки, коли до матриці критеріїв подібності входять від'ємні критерії. У цьому разі послуговуються сигноміальною СВО, яка використовується для дослідження задач поліноміального типу та задач з відсутнім у явному вигляді конкуруючим ефектом за однією чи декількома змінними.

Поліноміальна задача формулюється аналогічно (4)–(5) з урахуванням знакових функцій сигноміальної СВО ω_i, $i=\overline{1,m}$, Ω, Ω_k, $k=\overline{1,p}$, які доповнюють сформовані в термінах критеріального програмування умови нормування

$$\sum_{i=1}^{m_1}\omega_i\pi_i=\Omega$$

і ортогональності

$$\sum_{i=1}^{m}\omega_i\alpha_{ji}\pi_i=0,\ j=\overline{1,n},$$

де $\omega_i=\pm1$, $\Omega_i=\pm1$ – сигноми-функції, значення яких визначаються відповідно з умови та під час розв'язання задачі.

З урахуванням оптимальних значень критеріїв подібності для цільової функції

$$\pi_{io}=\frac{a_i\prod\limits_{j=1}^{n}u_j^{\alpha_{ji}}}{\Omega\cdot F_{min}}$$

формується критеріальна програма сигноміальної СВО (рис.2).

При створенні критеріальної системи відносних одиниць з множини базових значень виділяють незалежні та залежні значення. Кількість незалежних базисних одиниць і вигляд функціонального зв'язку виявляється на підставі аналізу індикаторів подібності [3]. Вираз (4) у критеріальній СВО запишеться

$$F_б=\sum_{i=1}^{m_1}\prod_{j=1}^{n}u_{jб}^{\alpha_{ij}}$$

Умова нормування матиме вигляд

$$\sum_{i=1}^{m_1} \pi_{iб} = m_1.$$

Застосування критеріальної СВО суттєво зменшує складність математичного апарату дослідження, а також зменшує кількість змінних.

У випадках, коли доводиться досліджувати математичну модель у точках, координати яких відрізняються на відоме значення від координат стаціонарної точки доцільно використовувати диференційну СВО. Диференційну СВО можна побудувати відповідно до першої похідної цільової функції. В інженерній практиці досить часто виникає необхідність дослідження моделі в інших характерних точках. У таких випадках СВО необхідно будувати, виходячи з другої і третьої похідних.

Залежно від формулювання задачі оптимального керування, вимог до форми отримання оптимального розв’язку використовується одна із запропонованих СВО. Так, наприклад, для створення математичних моделей можна використовувати евристичну, сигноміальну та транзитивну СВО; для їх дослідження – критеріальну і деривативну; для визначення меж області допустимого розв’язку та пошуку оптимуму – евристичну, сигноміальну і транзитивну СВО; для прогнозування – евристичну СВО; аналізу отриманого розв’язку – евристичну, критеріальну, диференціальну, транзитивну та сигноміальну СВО. Для визначення критеріїв подібності в законі оптимального керування (1)–(2) найчастіше використовується евристична, сигноміальна і транзитивна СВО.

Отже, введення відносних одиниць у теорію оптимального керування дає змогу зробити рівняння зв’язку між фізичними величинами загальним для всієї групи подібних явищ. При переході від абсолютних характеристик до відносних отримуємо рівняння, яке представлене залежністю між безрозмірними параметрами – критеріями подібності. Воно дозволяє розв’язати вузлову задачу автоматизації оптимального керування НР ЕЕС – виділення області оптимальності і врахувати чинники, що визначають ефективність оптимізації режимів. Закон оптимального керування НР ЕЕС у відносних одиницях досить просто реалізується сучасними засобами обчислювальної техніки.

1. Железко Ю.С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: Руководство для практических расчетов. М., 1989. 2. Воротницкий В.Э., Лежнюк П.Д., Серова И.А. Методика и программа оценки эффективности применения РПН и АРПН в замкнутых электрических сетях // Электрические станции. 1992. № 1. С.60–66. 3. Веников В.А., Веников Г.В. Теория подобия и моделирования. М., 1984. 4. Лежнюк П.Д., Бевз С.В. Методи оптимізації в електроенергетиці. Критеріальний метод: Навч. посібник. Вінниця, 1999. 5. Острем К., Виттенмарк Б. Системы управления с ЭВМ / Пер. с англ. М., 1987. 6. Мокін Б.І., Лежнюк П.Д., Лук'яненко Ю.В. Імітаційне моделювання в оптимальному керуванні нормальними режимами електричної системи // Вісн. ВПІ. 1995. № 3. С.5–9. 7. Лук’яненко Ю.В., Гайдамака В.М., Рамзі Хаддад. Оптимальне керування потоками потужності в ЕЕС на підставі критеріальних залежностей та результатів аналізу їх на чутливість // Вісн. ДУ “Львівська політехніка”. 1999. № 372. С.100–107. 8. Астахов Ю.Н., Лежнюк П.Д. Применение теории подобия в задачах управления нормальными режимами электроэнергетических систем // Изв. АН СССР. Энерге-

тика и транспорт. 1990. № 5. С.3–11. 9. Бевз С.В., Бурбело С.М. Критеріальне моделювання в задачах прогнозування // Наукові вісті НТУУ "Київський політехнічний інститут". 1998. № 3. С.39–42. 10. Лежнюк П.Д., Бевз С.В. Транзитивна система відносних одиниць у критеріальному моделюванні // Вісн. ДУ "Львівська політехніка". 1999. № 372. С.91–97.

УДК 621.34

Лозинський О.Ю., Бойчук Б.Г.
ДУ "Львівська політехніка", кафедра ЕАП

ПРО ВИКОРИСТАННЯ ПЕРЕДАТНИХ ФУНКЦІЙ З НУЛЯМИ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ОПТИМАЛЬНИХ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ

Для налаштування систем автоматичного керування на "модульний оптимум" пропонується застосувати передатні функції з нулями. Виведені формули для визначення їх коефіцієнтів. Наводяться графіки перехідних функцій, які забезпечують вказаний критерій.

У сучасних електроприводах широко застосовують стандартні налаштування контурів регулювання, найпоширенішим з яких є налаштування на "модульний оптимум". Вважається, що він забезпечується, якщо структурна схема і відповідна їй передатна функція утворюються як ряд послідовно вкладених один в одного контурів, першим з яких є інтегральна ланка із сталою часу T_μ, охоплена від'ємним зворотним зв'язком. Другий контур утворюється ввімкненням послідовно з першим інтегральної ланки із сталою часу, в два рази більшою, та охопленням їх знову від'ямним зворотним зв'язком. Аналогічно формуються і наступні контури. Запис передатної функції такої системи можна представити у вигляді

$$W_н(s) = \frac{M(s)}{N(s)} = \frac{1}{\ldots(8T_\mu s(4T_\mu s(2T_\mu s(T_\mu s+1)+1)+1)+1)+1\ldots}. \qquad (1)$$

Раніше виведені* співвідношення між коефіцієнтами передатної функції, за яких забезпечується умова "модульного оптимуму", причому ця функція може мати і нулі. Перевіримо спочатку дотримання цих співвідношень в передатних функціях вигляду (1), тобто без нулів. Виявляється, що вони дотримані для систем другого і третього порядків, але для систем четвертого порядку вони порушуються. Справді, для цього випадку маємо

$$N_4(s) = 64T_\mu^4 s^4 + 64\,T_\mu^3 s^3 + 32\,T_\mu^2 s^2 + 8\,T_\mu s + 1. \qquad (2)$$

* *Коцегуб П.Х. Синтез вентильних приводів постійного струму. К., 1997.*