

**Я. Ю. Марущак**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,  
yaroslav.y.marushchak@lpnu.ua,

**В. П. Павліш**

Національний університет “Львівська політехніка”,  
кафедра електромехатроніки та комп’ютеризованих електромеханічних систем,  
vasil.pavlish@i.ua

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИСТЕМ ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НАПРУГИ – АСИНХРОННИЙ ДВИГУН ІЗ ПОСЛІДОВНИМ ТА ПАРАЛЕЛЬНИМ КОРИГУВАННЯМ

<http://doi.org/10.23939/sepes2021.01.061>

© Марущак Я. Ю., Павліш В. П., 2021

Здійснено порівняльний аналіз впливу координатних та параметричних збурень на динамічні характеристики систем підпорядкованого (послідовне коригування) та модального (паралельне коригування) регулювання стосовно електроприводу тиристорний перетворювач напруги – асинхронний двигун. Для цього забезпечено однаковість умов їх функціонування. Це насамперед синтез обох систем відповідно до однакових стандартних (біноміальних) форм, а також дія однакових параметричних та координатних збурень на системи.

Синтезовано двоконтурну систему підпорядкованого та модального регулювання для електроприводу тиристорний перетворювач напруги – асинхронний двигун на основі біноміальної стандартної форми розподілу коренів характеристичного полінома. Для реалізації стандартної біноміальної форми в системі підпорядкованого регулювання використано метод узагальненого характеристичного полінома синтезу відповідних регуляторів. Здійснено симуляційні дослідження за умови дії керуючих впливів, а також наявності координатних і параметричних збурень в обох системах. Як координатні збурення розглянуто дію моменту статичного навантаження, а як параметричні збурення – відхилення параметрів регуляторів та моменту інерції від розрахункових значень у межах  $\pm 20$  %.

Електромеханічні системи з використанням асинхронних двигунів мають особливість, яка полягає у тому, що момент двигуна під час запуску не може перевищити значення критичного моменту. Оскільки синтез систем здійснено для лінеаризованої моделі, де не передбачено обмеження моменту, виконано перевірку динамічних процесів у реальній системі з обмеженням моменту за умови використання синтезованих регуляторів. Встановлено, що для швидкості двигуна стандартну біноміальну форму збережено для налаштувань на різну швидкодію. За результатами симуляційних досліджень синтезованих систем встановлено, що система модального регулювання має перевагу над системою підпорядкованого регулювання стосовно значення статичної похибки за умови дії параметричних збурень регуляторів. За всіма іншими динамічними показниками ці дві системи однакові.

**Ключові слова:** *тиристорний перетворювач напруги; асинхронний двигун; підпорядковане регулювання; модальне регулювання.*

### **Постановка проблеми**

Стосовно електромеханічних систем (ЕМС) найчастіше доводиться стикатися зі структурно-параметричними методами синтезу. Вагомі успіхи в проектуванні ЕМС були пов'язані з використанням систем із послідовним коригуванням (систем підпорядкованого регулювання (СПР)), які запропонував Кеслер. Спочатку їх будували на основі двигунів постійного струму з паралельним збудженням. У таких системах реалізовано принцип послідовного коригування завдяки каскадному ввімкненню регуляторів кожної координати регулювання [1–8]. Динамічні та статичні характеристики таких систем різні залежно від застосування симетричного (Symmetrisches) чи модульного (Betragsoptimum) критеріїв оптимізації для синтезу відповідних регуляторів.

Інший принцип побудови ЕМС оснований на паралельному коригуванні, що відповідає системам модального регулювання (СМР).

У промислових механізмах та технологічних комплексах широко використовуються електроприводи тиристорний перетворювач напруги – асинхронний двигун (ТПН-АД), для яких застосовують обидва принципи коригування. Тоді виникає проблема з аргументованим вибором принципу побудови системи. Ця проблема полягає в тому, що синтез СПР і СМР відбувається на різних засадах. Для модульного оптимуму в СПР кожен оптимізований контур описують стандартною формою Баттерворта другого порядку. У випадку симетричного оптимуму оптимізована передавальна функція має третій порядок з одним нулем у її чисельнику. Для СМР синтез передбачає забезпечення динамічних властивостей відповідно до будь-якої стандартної форми бажаної швидкодії, не обмежуючись, наприклад, формою Баттерворта другого порядку в разі використання модульного оптимуму. Тому для реалізації порівняльного аналізу СПР і СМР стосовно ТПН-АД необхідно розширити процедуру синтезу СПР для отримання довільних стандартних форм. Тому динамічні характеристики обох систем будуть однаковими, але їхня реакція на дію параметричних та координатних збурень може бути різною. Саме після такого аналізу можна зробити висновок про переваги та недоліки СПР і СМР для ТПН-АД. Зрозуміло, необхідно дотримуватись вимог щодо однакових умов експлуатації з погляду дії координатних та параметричних збурень.

### **Актуальність дослідження**

Наявність основних двох принципів створення поширених ЕМС на основі ТПН-АД, а саме побудованих за принципом послідовного та паралельного коригування, зумовлює необхідність порівняльного аналізу їхніх динамічних властивостей. Тим самим ще на стадії проектування можна вирішити, якій системі надати перевагу. ЕМС в умовах реальної експлуатації завжди піддаються впливу координатних та параметричних збурень. Тоді за умови однаковості динамічних характеристик за результатом синтезу СПР і СМР саме реакція системи на збурення може слугувати вирішальним аргументом на користь її вибору. Тому встановлення пріоритету вибору СПР чи СМР за результатом порівняльного аналізу їхньої реакції на дію збурень з погляду динамічних характеристик є актуальним.

### **Формулювання мети та завдань статті**

Мета цієї статті – аналіз переваг і недоліків динамічних властивостей ЕМС змінного струму на основі ТПН-АД, в яких реалізовано принцип СПР або принцип СМР. Проведений аналіз стосується динамічних показників обох систем, синтезованих за умови отримання однакових перехідних функцій, якщо дія координатних та параметричних збурень однакова.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Синтезувати двоконтурну СПР для системи ТПН-АД на основі якоїсь стандартної форми розподілу коренів характеристичного полінома, наприклад: стандартної біноміальної форми. Дослідити на симуляційних моделях динамічні процеси в синтезованій СПР за умови дії керуючих впливів, а також координатних і параметричних збурень.

2. Синтезувати СМР для системи ТПН-АД з урахуванням тих самих координат регулювання, що й для побудови СПР, якщо вибрана та сама стандартна біноміальна форма. Дослідити на симуляційних моделях динамічні процеси в синтезованій СМР за тих самих умов, які були під час дослідження СПР.

3. Виконати порівняльний аналіз показників динамічних процесів у обох системах і встановити пріоритети використання СПР та СМР для ТПН-АД.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

З розвитком ЕМС на основі двигунів змінного струму, зокрема, асинхронних двигунів (АД) почав розвиватись синтез СПР для таких систем. Це пояснюється значним поширенням систем з такими двигунами в різних сферах народного господарства. Так, для системи ТПЧ-АД було синтезовано [9–11] відповідні регулятори та проаналізовано динамічні властивості таких систем та показано алгоритм їх побудови та налаштування. Крім систем ТПЧ-АД, у промисловості широко використовують електроприводи ТПН-АД (тиристорний перетворювач напруги – асинхронний двигун). Основні засади синтезу СПР для таких ЕМС розглянуто в роботах [12–14].

Водночас треба відзначити, що ці ЕМС можуть бути побудовані за іншим принципом реалізації коригування, який ґрунтується на методі простору станів [14–15]. Серед різних напрямів синтезу ЕМС, основаної на методі простору станів, можна виділити два, які стали найпоширенішими в інженерній практиці. Один з них утворено методами оптимізації системи зведенням до мінімуму деякого функціонала (зазвичай інтеграла від будь-якої квадратичної форми), що характеризує якість регулювання.

Надалі розглядатимемо інший напрям застосування методу простору станів. Він пов'язаний з методами модального керування, тобто методами формування зворотних зв'язків, які надають замкненій системі заздалегідь вибраний розподіл коренів, тобто йдеться про СМР. Якщо всі складові вектора стану об'єкта  $X$  можна виміряти (повна інформація про вектор стану), то забезпечення заданого розташування полюсів замкненої системи не викликає проблем. Важливо визначити бажане розташування полюсів, до якого слід прагнути. Це питання вирішують з урахуванням властивостей конкретного об'єкта.

Саме такі дві системи (СПР та СМР) дуже часто використовують в ЕМС, що експлуатуються в різноманітних виробничих механізмах і тому саме їхні динамічні характеристики аналізуватимемо.

Для систем ТПН-АД в [16–21] розглянуто різноманітні аспекти їх функціонування за умови реалізації модального керування, подібно до того, як це зроблено в [12–14] стосовно СПР.

Потрібно мати на увазі, що вигляд перехідного процесу визначається не тільки полюсами, але й нулями передавальної функції замкненої системи. Якщо передавальна функція замкненої системи не має нулів, то, вибираючи її характеристичний поліном, можна керуватися стандартними формами. Якщо ж система має і полюси, і нулі, то синтез таких систем відповідно до вибраної бажаної стандартної форми можна здійснити методом узагальненого характеристичного полінома [8, 10, 14], забезпечуючи однакові перехідні функції і для СПР, і для СМР. За результатами проведених досліджень не здійснено порівняльний аналіз динамічних властивостей синтезованих СПР та СМР. Це зумовлено тим, що синтез обох систем здійснено за різною методологією, а тому в результаті отримано перехідні функції відповідно до різних стандартних форм. Тому немає сенсу використовувати результати здійснених у цих роботах досліджень для порівняльного аналізу динамічних властивостей систем за умови дії параметричних та координатних збурень.

### Виклад основного матеріалу

Для проведення порівняльного аналізу впливу координатних та параметричних збурень на динамічні характеристики СПР та СМР необхідно забезпечити однаковість умов відпрацювання керуючих та збурювальних впливів. Тільки тоді можна об'єктивно оцінити дію на обидві системи. Тому по черзі синтезуємо СПР та СМР для системи ТПН-АД, зважаючи на умови забезпечення якоїсь стандартної форми тієї самої швидкодії, наприклад: стандартної біноміальної форми.

### Синтез двоконтурної СПР стосовно ТПН-АД.

Для досягнення динамічних характеристик відпрацювання керуючих впливів у СПР відповідно до якоїсь стандартної форми, а не тільки за критерієм МО або СО, застосуємо метод узагальненого характеристичного полінома (УХП) [8, 10, 14].

Переважає більшість стандартних форм представляється поліномом  $H_{cm}(p)$ , записаним у нормованому вигляді через середньгеометричний корінь  $w_0$ . У таких випадках вираз бажаної оптимізованої передавальної функції стосовно заданого вигляду запишеться так:

$$W^{opt}(p) = \frac{w_0^n / K_{зз}}{p^n + a_1 w_0 p^{n-1} + a_2 w_0^2 p^{n-2} + K + a_n w_0^n p^0}, \quad (1)$$

де  $K_{зз}$  – коефіцієнт зворотного зв'язку за вихідною координатою регулювання.

Тут коефіцієнти  $a_1, a_2, \dots, a_n$  визначають вирази стандартних форм. Отже, якщо вибрати значення  $w_0$ , для відповідного контуру регулювання та значення коефіцієнтів  $a_i$ , то отримаємо вирази бажаного характеристичного полінома системи заданої швидкодії в кожному із синтезованих контурів. Зауважимо, що для стандартної біноміальної форми другого порядку  $a_1 = 2$ , а для форми Баттерворта  $a_1 = 1.4$ . Для більшості стандартних форм (зокрема для форм біноміальної та Баттерворта) другого порядку  $a_2 = 1$ . Використовуючи цей метод, синтезували регулятори швидкості та моменту СПР за вибраної біноміальної стандартної форми розподілу коренів характеристичного рівняння. Систему ТПН-АД подано аперіодичною ланкою першого порядку з коефіцієнтом підсилення  $K = K_r K_M$  та сталою часу  $T_m$  [12–14, 21]. Структурну схему двоконтурної СПР швидкості такого електроприводу подано на рис. 1.

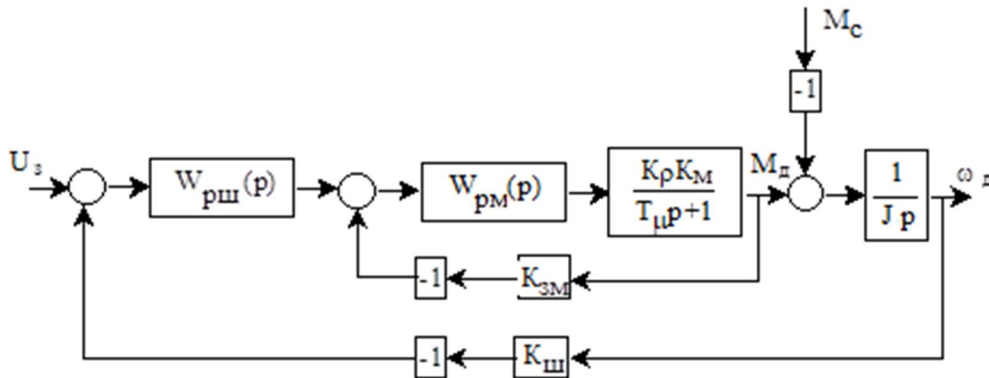


Рис. 1. Структурна схема двоконтурної СПР швидкості для ТПН-АД

На рис. 1 прийнято такі позначення:  $W_{pM}(p)$ ,  $W_{pш}(p)$  – передавальна функція регулятора моменту та швидкості відповідно;  $K_{зм}$ ,  $K_{ш}$  – коефіцієнти зворотного зв'язку за моментом та швидкістю двигуна.

Синтезуючи по черзі контури регулювання моменту та швидкості методом УХП, отримали [14] такі вирази передавальних функцій:

$$W_{pM}(p) = \frac{w_{om}(T_m p + 1)}{K_{зм} K_r K_M p}, \quad (2)$$

$$W_{pш}(p) = \frac{K_{зм} J w_{ou}^2}{K_{ш} w_{om}}, \quad \begin{matrix} \ddot{u} \\ \dot{y} \\ y \end{matrix}, \quad (3)$$

$$w_{om} = a_1 w_{ou}.$$

де  $w_{om}$ ,  $w_{ou}$  – середньгеометричні корені контуру моменту та швидкості відповідно.

### Симуляційні дослідження синтезованої СПР.

Симуляційні дослідження виконано для ЕМС переміщення козлового крана вантажністю 30 т. Використано АД типу МТВ411-6 номінальної потужності  $P_n = 22$  кВт та частоти обертання  $n_n = 965$  об/хв, який приводить у рух механізм з сумарним моментом інерції  $J = 9,871$  кгм<sup>2</sup>. Система ТПН-АД характеризується значеннями  $K_T K_M = 21,7815$ ;  $T_m = 0,003$  с.

ЕМС з використанням АД мають особливість, яка полягає у тому, що електромагнітний момент двигуна під час запуску не може перевищити значення критичного моменту. Оскільки синтез СПР здійснено для лінеаризованої моделі, де не передбачено обмеження моменту, необхідно перевірити динамічні процеси в реальній системі з обмеженням моменту за умови використання синтезованих регуляторів. Такі перехідні процеси швидкостей та моментів для різних значень  $\omega_{0ш} = (4,0; 5,0; 6,0)$  1/с показано на рис. 2 та рис. 3 відповідно.

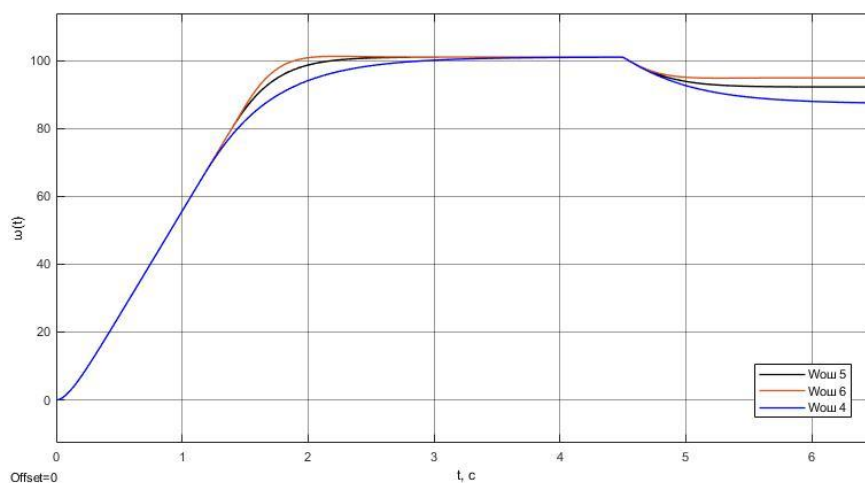


Рис. 2. Перехідні процеси швидкості у разі налаштування регуляторів на різну швидкодію контуру швидкості

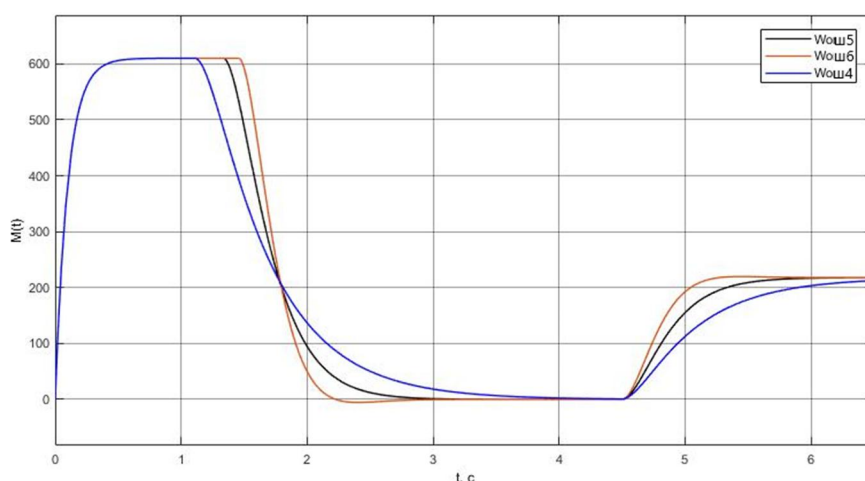


Рис. 3. Перехідні процеси моменту під час розгону і накидання навантаження для  $M_c = M_n$

З рис. 2, 3 видно, що для швидкості двигуна стандартна біноміальна форма практично збережена для різних налаштувань згідно зі значеннями  $\omega_{0ш}$ . Статична похибка швидкості АД від дії навантаження  $M_c = M_n$  – у межах від 6 % до 13,2 % для відповідної швидкодії контуру швидкості. Також було встановлено, що за накиду навантаження  $M_c = 0,7 M_n$  ця похибка зменшується і міститься у межах від 4,2 % до 9,4 %.

За допомогою симуляційної моделі такої СПР досліджено вплив параметричних збурень у вигляді зміни параметрів регуляторів моменту та швидкості, а також сумарного моменту інерції.

Спочатку досліджено чутливість синтезованої системи до точності налаштування ПІ-регуляторів моменту за умови, що параметри регулятора моменту (коефіцієнт і стала часу) містяться у межах від 0,8 до 1,2 від розрахункових. Параметри регулятора швидкості залишаємо без змін. Отримані результати симуляційних досліджень показали, що система малочутлива до зміни параметрів регулятора моменту. Величина перерегулювання координат регулювання, зміна часу регулювання та значення статичної похибки не відреагували на дію навантаження.

Далі досліджено чутливість системи до зміни параметрів П-регулятора швидкості в межах від 0,8 до 1,2 від розрахованих. Параметри регулятора моменту збережено на рівні розрахункових значень. Порівнюючи отримані результати, бачимо, що час регулювання практично залишається незмінним і стандартна біноміальна форма збережена. Час розгону в разі відхилення параметрів регулятора швидкості від розрахункового не змінюється. Водночас спостерігається зменшення  $K_{pm}$  відносно розрахованого значення, що спричиняє збільшення на 5,2 % статичної похибки, а збільшення  $K_{pm}$  приводить до зменшення статичної похибки на 2,9 %.

Аналізуючи динамічні характеристики СПР за умови одночасної зміни параметрів і регулятора моменту та регулятора швидкості, встановили, що час розгону не змінився. Збережена також стандартна біноміальна форма. Зате вплив на статичну похибку відчувається переважно з боку регулятора швидкості. За найнесприятливіших значень параметрів регуляторів їх зменшення статична похибка зростає на 11,8 % відносно значень, отриманих за умови відсутності параметричних збурень.

Проведено дослідження чутливості системи до зміни значень  $J$  від 0,8 до 1,2 відносно значення, прийнятого під час синтезу системи. Регулятори моменту і швидкості налаштовані згідно з розрахунковим значенням. Встановлено, що невідповідність моменту інерції у бік збільшення призводить до збільшення часу регулювання з 2,5 с до 3,0 с, а зменшення моменту інерції відносно розрахункового спричиняє зменшення часу розгону з 2,5 с до 2,0 с. Статична похибка у всіх випадках не змінюється. Спостерігається невелика відмінність у траєкторії динамічного процесу координат регулювання. Тому можна стверджувати, що система малочутлива з погляду статичної похибки до зміни моменту інерції механізму.

За умови невідповідності розрахунковим значенням усіх параметрів регуляторів та моменту інерції виявлено, що динамічні характеристики швидкості синтезованої ЕМС повністю відповідають стандартній біноміальній формі зі збереженням очікуваного часу регулювання.

### Синтез СПР стосовно ТПН-АД

Розглянемо структурну схему СПР, показану на рис. 4.

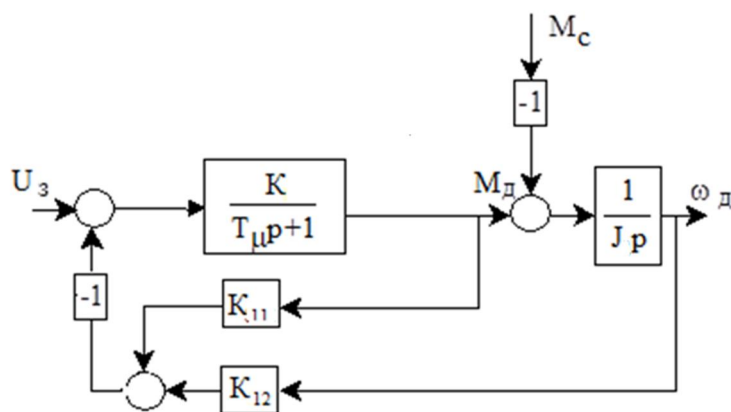


Рис. 4. Структурна схема СПР швидкістю системи ТПН-АД



Аналізуючи цю структурну схему, легко показати, що її передавальна функція щодо сигналу завдання  $W_{\text{СМР}}(p) = \frac{\omega_d(p)}{U_3(p)}$  матиме вигляд.

$$W_{\text{СМР}}(p) = \frac{K/(JT_\mu)}{p^2 + p(1 + KK_{11})/T_\mu + KK_{12}/(JT_\mu)}. \quad (4)$$

Отже, динамічні властивості цієї СМР визначається тільки виразом характеристичного полінома:

$$H(p) = p^2 + p(1 + KK_{11})/T_\mu + KK_{12}/(JT_\mu). \quad (5)$$

Поставимо вимогу, щоб  $H(p)$  трансформувався у якусь стандартну форму другого порядку. Нехай це буде стандартна біноміальна форма  $H_{\text{ст}}(p)$ .

$$H_{\text{ст}}(p) = p^2 + 2p\omega_{0\text{ш}} + \omega_{0\text{ш}}^2. \quad (6)$$

З умови  $H(p) = H_{\text{ст}}(p)$  отримаємо систему рівнянь, прирівнюючи коефіцієнти при однакових степенях оператора  $p$  у виразах (5) і (6).

$$\begin{cases} \frac{(1 + KK_{11})}{T_\mu} = 2\omega_{0\text{ш}}, \\ \frac{KK_{12}}{J_1T_\mu} = \omega_{0\text{ш}}^2. \end{cases} \quad (7)$$

З цієї системи рівнянь отримаємо такі вирази для розрахунку параметрів модального регулятора:

$$K_{11} = \frac{2\omega_{0\text{ш}}T_\mu - 1}{K}, \quad (8)$$

$$K_{12} = \frac{\omega_{0\text{ш}}^2 J T_\mu}{K}. \quad (9)$$

### Симуляційні дослідження синтезованої СМР

Дослідимо динамічні процеси в СМР під час запуску за умови дії параметричних збурень та за умови дії координатних збурень у вигляді навантаження. Увівши обмеження сигналу модального регулятора, отримали симуляційну модель на основі структурної схеми, показаної на рис. 4. Таке обмеження дало змогу змоделювати динамічні процеси в системі з АД. Для тих самих значень  $\omega_{0\text{ш}}$ , що й для СПР, на рис. 5 показано динамічні процеси швидкості під час розгону і накидання навантаження  $M_c = M_n$

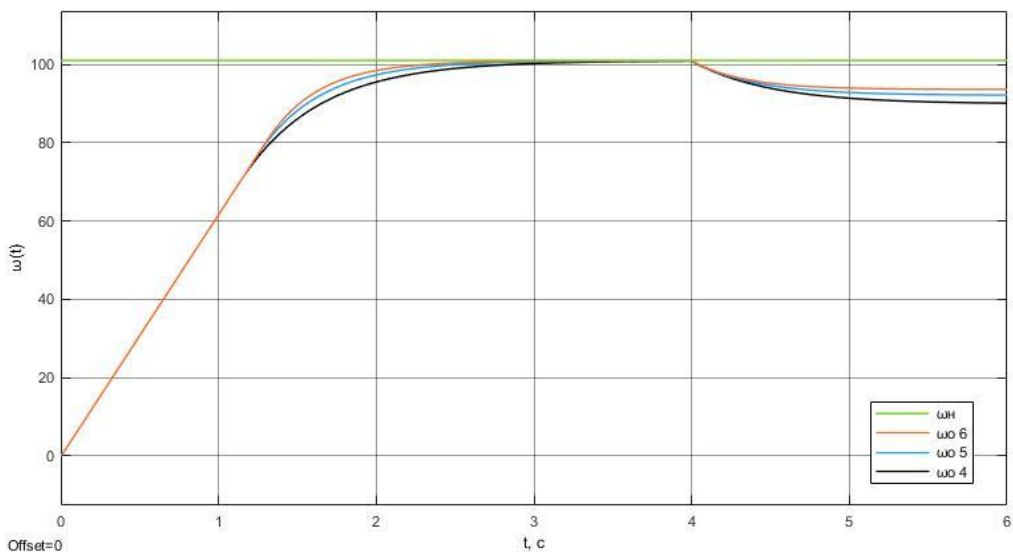


Рис. 5. Перехідні процеси швидкості в СМР з обмеженням електромагнітного моменту

Таким перехідним процесам швидкості відповідають динамічні процеси моменту, показані на рис. 6.

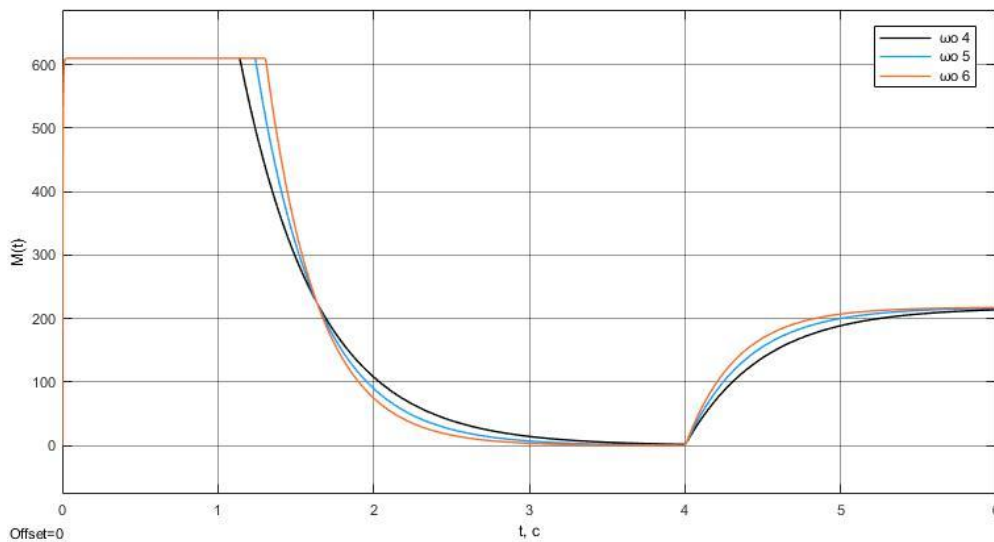


Рис. 6. Перехідні процеси моменту в СМР під час розгону та накидання навантаження  $M_c=M_n$

З рис. 5, 6 видно, що стандартна біноміальна форма для швидкості під час розгону збережена, хоча вже йдеться про нелінійну систему. Час регулювання також залишається на рівні очікуваного 2–3 с залежно від значення  $\omega_{0m}$ . Статична похибка від дії навантаження міститься в межах від 7,3 % до 10,9 %. Зменшення навантаження до  $M_c=0,7 M_n$  спричиняє статичну похибку в межах від 5,1 % до 7,7 % залежно від значення  $\omega_{0m}$ .

На створеній симуляційній моделі проведено дослідження чутливості синтезованої СМР з обмеженням моменту до точності налаштування модального регулятора і відповідності деяких параметрів об'єкта регулювання їх розрахунковим значенням.

Здійснено дослідження динамічних процесів за умови, що параметри модального регулятора у межах від 0,8 до 1,2 від розрахункових. Саме такий діапазон їх зміни застосовано для дослідження СМР. Аналізуючи отримані результати, встановили, що час регулювання практично не змінюється зі збереженням стандартної біноміальної форми. Статична похибка для таких параметричних збурень теж практично не змінюється. Відмінність динамічних процесів полягає тільки у дещо іншій траєкторії швидкості АД переходу до нових усталених значень.

Аналогічна ситуація повторилася і під час дослідження статичної похибки за умови параметричного збурення у СМР, якщо момент інерції в межах від 0,8 до 1,2 від розрахованого значення. Водночас невідповідність моменту інерції у бік його збільшення призводить до зростання часу регулювання на 0,5 с, а зменшення моменту інерції відносно розрахункового – до зменшення часу регулювання на 0,5 с. Перерегулювання відсутні.

Проведено дослідження СМР для випадку, коли момент інерції та параметри модального регулятора не відповідають розрахованим значенням. У цьому випадку час регулювання змінювався в межах  $\pm 0,5$ с, а статичні похибки від дії навантаження практично не змінилися.

### Висновки

1. Синтезовано двоконтурну СМР для системи ТПН-АД на основі стандартної біноміальної форми. Проведено симуляційні дослідження динамічних процесів у синтезованій СМР за умови дії керуючих впливів, а також координатних і параметричних збурень у вигляді зміни параметрів регуляторів, моменту інерції та моменту статичного навантаження.



2. Синтезовано СМР для системи ТПН-АД, на основі стандартної біноміальної форми, з урахуванням тих самих координат регулювання, що й для побудови СПР. Проведено симуляційні дослідження динамічних процесів у синтезованій СМР за тих самих умов, як і під час дослідження СПР.

3. Урахування обмеження моменту на рівні  $M_{кр}$  не призводить до появи перерегулювання швидкості. Тому процес розгону зберігається максимально наближеним до стандартної біноміальної форми як для СПР, так і для СМР. Статична похибка, зумовлена координатним збуренням у вигляді накидання навантаження, для обох систем залишається однаковою і залежить тільки від вибраної бажаної швидкодії для тих самих значень  $M_c$ . Параметричні збурення у вигляді зміни параметрів регуляторів не призводять до появи перерегулювання і до відчутної зміни часу регулювання у жодній із систем. Змінюється тільки вигляд траєкторії переходу координат регулювання до нових усталених значень. Зате за умови найнесприятливіших відхилень параметрів регуляторів СПР у межах  $\pm 20\%$  статична похибка може збільшитися на 11,8 % відносно її значення, коли таких параметричних збурень немає. Для СМР такі самі параметричні збурення не приводять до зміни статичної похибки швидкості. Відхилення моменту інерції від розрахункового значення приводить тільки до однакової зміни часу регулювання для СПР і для СМР.

4. Отже, СМР має перевагу над СПР стосовно значення статичної похибки за умови дії параметричних збурень регуляторів. За всіма іншими динамічними показниками ці дві ЕМС є однаковими.

**Перспективи подальших досліджень.** Подальші дослідження спрямовані на виявлення допустимих меж параметричних збурень з умови збереження працездатності обох ЕМС стосовно ТПН-АД.

#### Список літератури

1. Setiawan, I. Investigation of symmetrical optimum PI controller based on plant and feedback linearization in gridtie inverter systems / Setiawan, I., Facta, M., Priyadi, A., Purnomo, M. // *International Journal of Renewable Energy Research*, 2017, 7 (3), 1228–1234. <https://www.ijrer.org/download/5984.pdf>.
2. Barbosa, A. Symmetrical optimum based PI control redesign/ Barbosa, A., Junior, G., Barros, P. // *Proc. of the IEEE Conference on Control Applications 2014. (CCA 2014)*, 1143–1149. [1569935441.pdf](https://www.inf.br/1569935441.pdf) (swge.inf.br).
3. Cirtoaje, V. Two controller design procedures using closed-loop pole placement technique/ Cirtoaje, V., Baiesu, A., Mihalache, S. // *Control engineering and applied informatics*, 2009-11 (1), 34–42. <https://www.researchgate.net> > ...
4. Slobodan N. Digital Control of Electrical Drives / Slobodan N. Vukosavić: // Springer-Verlag, New York, 2007, 87–95. <https://www.waterstones.com>...
5. Jörg Kahlert. Crashkurs Regelungstechnik: Eine praxisorientierte Einführung mit Begleitsoftware / Jörg Kahlert. // Auflage. VDE-Verlag, Berlin 2015, 150–153. [modul.online.hswt.de/modulhandbuch/Module-WPT\\_83-Master.pdf](http://modul.online.hswt.de/modulhandbuch/Module-WPT_83-Master.pdf).
6. Thomas Beier, Regelungstechnik: Basiswissen, Grundlagen, Beispiele/ Thomas Beier, Petra Wurl // Auflage. Fachbuchverlag Leipzig, München 2015, 177–185. [www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/81298949x.pdf](http://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/81298949x.pdf).
7. Gert-Helge Geitner Entwurf digitaler Regler für elektrische Antriebe / Gert-Helge // Geitner. VDE-Verlag, Berlin, Offenbach, 1996. 7–88. <https://d-nb.info/94721108X/04>.
8. Мельник О. О. Загальні підходи щодо синтезу електромеханічних систем методом узагальненого характеристичного полінома / Мельник О. О., Шеремет О. І. // *Науковий вісник Донбаської державної машинобудівної академії. Краматорськ*, 2017. № 2 (23Е). С. 106–111. [www.dgma.donetsk.ua/science\\_public/science\\_vesnik/...](http://www.dgma.donetsk.ua/science_public/science_vesnik/)
9. Попович М. Г. Особливості синтезу та дослідження електромеханічних систем з послідовною корекцією та частотнорегульованими асинхронними двигунами / Попович М. Г., Теряев В. І., Кіселичник О. І., Бур'ян С. О. // *Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. Кременчук: КДПУ*, 2007. Вип. 3/2007 (44) частина 2. С. 12–16. [www.kdu.edu.ua/statti/2007-3-2\(44\)/12.pdf](http://www.kdu.edu.ua/statti/2007-3-2(44)/12.pdf).

10. Маруцак Я. Ю. Синтез регуляторів САР електроприводу ТПЧ-АД методом узагальненого характеристичного полінома / Я. Ю. Маруцак, В. М. Кравцов // Вісник Запорізького технічного університету. Радіоелектроніка, інформатика, управління. – Запоріжжя : ЗДТУ, 2000. № 2(4). С. 141–146. <https://cyberleninka.ru/article/n/sintez-regulyatoriv-sar-elektroprivodu-tpch-ad...>
11. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навчальний посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Кленіков та ін.; За ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. К.: Либідь, 2005. 680 с. <https://www.twirpx.com/file/2069726>.
12. Шпіка М. І. Конспект лекцій з дисципліни “Системи керування електроприводами” (для студентів 3 і 4 курсів усіх форм навчання напряму підготовки 0922 (6.050702) – “Електромеханіка” спеціальності “Електромеханічні системи автоматизації та електропривод”) / М. І. Шпіка; Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. Х.: ХНАМГ, 2012. 71 с. [eprints.knate.edu.ua/24769/1/2010 печ. 81Л...](http://eprints.knate.edu.ua/24769/1/2010 печ. 81Л...)
13. Козлова Л. Е. Исследование статички и динамики замкнутого бездатчикового асинхронного электропривода собственных нужд ТЭС по схеме ТРН – АД с нейросетевым наблюдателем угловой скорости / Козлова Л. Е., Боловин Е. В. // Современные проблемы науки и образования. 2014. № 3.; <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13581>.
14. Маруцак Я. Ю. Синтез електромеханічних систем з послідовним та паралельним коригуванням : навч. посіб. / Я. Ю. Маруцак // Львів : Видавництво Національного університету “Львівська політехніка”, 2005. 208 с. <https://3lib.net/book/3101542/4e1f33>
15. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування: підручник. / Попович М. Г., Ковальчук О. В. // К.: Либідь, 2007. 656 с. [https://elprivod.ntnu.org.ua/files/tac/Попович\\_Теорія\\_автом\\_керув...](https://elprivod.ntnu.org.ua/files/tac/Попович_Теорія_автом_керув...)
16. Буряковський С. Г. Дослідження роботи модернізованого електровоза з системою модального регулювання та спостерігачем стану / Буряковський С. Г., Рій Д. Ю. // Електричний транспорт: зб. наукових праць УкрДАЗТ, 2012, вип. 128 с. 257–262. [lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/7033/1/ZNP...](http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/7033/1/ZNP...)
17. Акимов А. В. Об астатизме по возмущению в электроприводах с модальными регуляторами / Акимов А. В., Кленіков В. Б. // Автоматизированные электромеханические системы с модальными регуляторами и наблюдателями состояния. Харьков: ХГПУ, 1997. С. 29–38. [repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/...](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/...)
18. Григорьев В. В. Синтез систем автоматического управления методом модального управления / Григорьев В. В., Журавлёва Н. В., Лукьянова Г. В. // С-Пб: СПбГУ ИТМО, 2007. 108 с. [window.edu.ru/catalog/pdf2txt/420/54420/26549](http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/420/54420/26549)
19. Кочнева Т. Н. Модальное управление электромеханическими системами в металлургии / Кочнева Т. Н., Кожевников А. В., Кочнев Н. В. // Вестник Череповецкого государственного университета: научный журнал. Череповец: ФБГОУ ВПО ЧГУ. № 1 (45). Т.1. 2013. С. 11–16. <https://cyberleninka.ru/article/n/modalnoe...>
20. Кочнев Н. В. Модальное управление нежесткими электромеханическими системами в металлургии / Кочнев Н. В., Кочнева Т. Н. // Современная техника и технологии. 2015. № 4 <https://technology.snauka.ru/2015/04/6296>
21. Толочко О. І. Синтез та аналіз системи модального керування крановим механізмом поступального руху з врахуванням роботи підіймального механізму / Толочко О. І., Ришков О. М. / ПСЕ Технічна електродинаміка, 2018, № 4. С. 131–134. DOI: 10.15407/techned2018.04.131

### References

1. Setiawan, I. Investigation of symmetrical optimum PI controller based on plant and feedback linearization in gridtie inverter systems / Setiawan, I., Facta, M., Priyadi, A., Purnomo, M. // International Journal of Renewable Energy Research, 2017, – 7 (3), pp 1228–1234. <https://www.ijrer.org/download/5984/pdf>
2. Barbosa, A. Symmetrical optimum based PI control redesign/ Barbosa, A., Junior, G., Barros, P. // Proc. of the IEEE Conference on Control Applications 2014, - (CCA 2014), pp 1143–1149. 1569935441.pdf (swge.inf.br).
3. Cirtoaje, V. (). Two controller design procedures using closed-loop pole placement technique / Cirtoaje, V., Baiesu, A., Mihalache, S. // Control engineering and applied informatics, 2009-11 (1), pp 34–42. <https://www.researchgate.net/...>
4. Slobodan N. Digital Control of Electrical Drives./ Slobodan N. Vukosavić:// Springer-Verlag, New York 2007, pp. 87–95. <https://www.waterstones.com...>
5. Jörg Kahlert. Crashkurs Regelungstechnik: Eine praxisorientierte Einführung mit Begleitsoftware / Jörg Kahlert.// Auflage. VDE-Verlag, Berlin 2015, ss. 150–153. [modul.online.hswt.de/modulhandbuch/Module-WPT\\_83-Master.pdf](http://modul.online.hswt.de/modulhandbuch/Module-WPT_83-Master.pdf)

6. Thomas Beier, *Regelungstechnik: Basiswissen, Grundlagen, Beispiele*/ Thomas Beier, Petra Wurl// Auflage. Fachbuchverlag Leipzig, München 2015, ss 177–185. [www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/81298949x.pdf](http://www.gbv.de/dms/tib-ub-hannover/81298949x.pdf) .
7. Gert-Helge Geitner *Entwurf digitaler Regler für elektrische Antriebe* / Gert-Helge // Geitner. VDE-Verlag, Berlin, Offenbach. 1996. ss. 77–88. <https://d-nb.info/94721108X/04> .
8. Mel'nyk O. O. *Zahal'ni pidkhody shchodo syntezy elektromekhanichnykh system metodom uzahal'nenoho kharakterystychnoho polinoma*/ Mel'nyk O. O., Sheremet O. I. // *Naukovyy visnyk Donbas'koyi derzhavnoyi mashynobudivnoyi akademiyi, Kramators'k*, 2017. No. 2 (23E). S. 106–111. [www.dgma.donetsk.u.a/science\\_public/science\\_vesnik/...](http://www.dgma.donetsk.u.a/science_public/science_vesnik/...) .
9. Popovych M. H. *Osoblyvosti syntezy ta doslidzhennya elektromekhanichnykh system z poslidovnoyu korektsiyeyu ta chastotnorehul'ovanymy asynkhronnymy dvyhunamy* / Popovych M. H., Teryayev V. I., Kiselychnyk O. I., Bur'yan S. O. // *Visnyk Kremenchnuts'koho derzhavnogo politekhnichnoho universytetu. Kremenchnuk: KDPU*, 2007. Vyp. 3/2007 (44) chastyna 2. S. 12–16. [www.kdu.edu.ua/statti/2007-3-2\(44\)/12.pdf](http://www.kdu.edu.ua/statti/2007-3-2(44)/12.pdf).
10. Marushchak Ya. Yu. *Syntezy rehulyatoriv SAR elektropryvodu TPC-H-AD metodom uzahal'nenoho kharakterystychnoho polinoma* / Ya. Yu. Marushchak, V. M. Kravtsov // *Visnyk Zaporiz'koho tekhnichnoho universytetu. Radioelektronika, informatyka, upravlinnya. Zaporizhzhya : ZDTU*, 2000. No. 2(4). S. 141–146. <https://cyberleninka.ru/article/n/syntezy-regulyatoriv-sar-elektropryvodu-tpch-ad...> .
11. *Elektromekhanichni systemy avtomatychnoho keruvannya ta elektropryvody: Navchal'nyy posibnyk* / M. H. Popovych, O. Yu. Lozyns'kyy, V. B. Klepikov ta in.; Za red. M. H. Popovycha, O. Yu. Lozyns'koho. K.: Lybid', 2005. 680 s. <https://www.twirpx.com/file/2069726> .
12. Shpika MI *Synopsis of lectures on the subject “Control systems of electric drives” (for students of 3rd and 4th courses of all forms of education in the direction of training 0922 (6.050702) “Electromechanics” specialty “Electromechanical automation systems and electric drive”)* / M. I. Shpika; Khark. nat. acad. city households. H.: KNAMG, 2012. 71 p. [eprints.kname.edu.ua/24769/1/2010\\_nch\\_81J...](http://eprints.kname.edu.ua/24769/1/2010_nch_81J...) .
13. Kozlova L. E. *Yssledovanye statyky y dynamyky zamknutoho bezdatchykoho asynkhronnoho élektropryvoda sobstvennykh nuzhd TÉS po skheme TRN – AD s neyrosetevym nablyudatelem uhlovy skorosty* / Kozlova L. E., Bolovyn E. V. // *Sovremennye problemy nauky y obrazovanyia*. 2014. No. 3. <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=13581>.
14. Marushchak Ya. Yu. *Syntezy elektromekhanichnykh system z poslidovnym ta paralel'nym koryhuvanniam : navch. posib.* / Ya. Yu. Marushchak. L'viv : Vydavnytstvo Natsional'noho universytetu “L'vivs'ka politekhnika”, 2005. 208 s. <https://3lib.net/book/3101542/4e1f33> .
15. Popovych M. H. *Teoriya avtomatychnoho keruvannya: pidruchnyk* / Popovych M. H., Koval'chuk O. V. // K.: Lybid', 2007. 656 s. [https://elpryvod.nmu.org.ua/files/tac/Понович\\_Теория\\_автом\\_керув...](https://elpryvod.nmu.org.ua/files/tac/Понович_Теория_автом_керув...)
16. Buryakovs'kyy S. H. *Doslidzhennya roboty modernizovanoho elektrovoza z systemoyu modal'noho rehulyuvannya ta sposterihachem stanu* / Buryakovs'kyy S. H., Riy D. Yu. // *Elektrychnyy transport. Zbirnyk naukovykh prats' UkrDAZT*, 2012, vyp. 128, s. 257–262. [lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/7033/1/ZNP...](http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/7033/1/ZNP...)
17. Akymov A. V. *Ob astatyzme po vozmushchenyyu v élektropryvodakh s modal'nymy rehulyatoramy* / Akymov A. V., Klepykov V. B. // *Avtomatyzirovannyye élektromekhanicheskiye systemy s modal'nymy rehulyatoramy y nablyudatelyamy sostoyannya*. Khar'kov: KHHPU. 1997. S. 29–38. [repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/...](http://repository.kpi.kharkov.ua/bitstream/KhPI-Press/...)
18. Hryhor'ev V. V. *Syntezy system avtomatycheskoho upravleniya metodom modal'noho upravleniya* / Hryhor'ev V. V., Zhuravlëva N. V., Luk'yanova H. V. / S-Pb: SPbHU YTMO, 2007. 108 s. [window.edu.ru/catalog/pdf2txt/420/54420/26549](http://window.edu.ru/catalog/pdf2txt/420/54420/26549)
19. Kochneva T. N. *Modal'noye upravleniye elektromekhanicheskimi sistemami v metallurgii* / Kochneva T. N., Kozhevnikov A. V., Kochnev N. V. // *Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta. Nauchnyy zhurnal. – Cherepovets: FBGU VPO CHGU*. No. 1 (45). T. 1. 2013. S. 11–16. <https://cyberleninka.ru/article/n/modalnoe...>
20. Kochnev N. V. *Modal'noye upravleniye nezhestkimi elektromekhanicheskimi sistemami v metallurgii* / Kochnev N. V., Kochneva T. N. // *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii*. 2015. No. 4. S. 25–29. <https://technology.snauka.ru/2015/04/6296>.
21. Tolochko O. I. *Synthesis and analysis of the modal control system of the crane mechanism of translational motion taking into account the operation of the lifting mechanism* / Tolochko O. I., Ryzhkov O. M. / *PSE Technical Electrodynamics*, 2018, No. 4. S. 131–134. DOI: 10.15407/techned2018.04.131.

**Ya. Marushchak**

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electromechanics and Computerized Electromechanical Systems,  
yaroslav.y.marushchak@lpnu.ua,

**V. Pavlish**

Lviv Polytechnic National University,  
Department of Electromechanics and Computerized Electromechanical Systems,  
vasil.pavlish@i.ua

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF SYSTEMS THYRISTOR VOLTAGE CONVERTER – ASYNCHRONOUS MOTOR WITH SERIAL AND PARALLEL ADJUSTMENT**

© *Marushchak Ya., Pavlish V., 2021*

**A comparative analysis of the influence of coordinate and parametric perturbations on the dynamic characteristics of the systems of subordinate (sequential adjustment) and modal (parallel adjustment) control in relation to the electric drive thyristor voltage converter – induction motor. For this purpose the uniform conditions of their functioning are provided. First of all, it is the synthesis of both systems according to the same standard (binomial) forms, as well as the effect of the same parametric and coordinate perturbations on the systems.**

**Synthesized two-circuit system of subordinate and modal control for electric drive thyristor voltage converter – asynchronous motor, based on the binomial standard form of root distribution of a characteristic polynomial. To implement the standard binomial form in the system of subordinate regulation, the method of the generalized characteristic polynomial of synthesis of the corresponding regulators is used. Simulation studies were performed under the influence of control effects and the presence of coordinate and parametric perturbations in both systems. In the role of coordinate perturbations the action of the moment of static loading is considered, and in the role of parametric perturbations – deviation of parameters of regulators and the moment of inertia from calculated values within  $\pm 20\%$ .**

**Electromechanical systems using asynchronous motors have a feature that the motor torque during start-up cannot exceed the critical torque. Due to the fact that the synthesis of systems is carried out for a linearized model, where there is no torque limitation, the verification of dynamic processes in a real system with torque limitation under the condition of using synthesized regulators. It is established that for engine speed the standard binomial form is saved for settings for different speed. According to the results of simulation studies of the synthesized systems, it is established that the system of modal control has an advantage over the system of subordinate control with respect to the magnitude of static error under the action of parametric perturbations of regulators. For all other dynamic indicators, these two systems are the same.**

***Key words: thyristor voltage converter; induction motor; serial adjustment; parallel adjustment.***