Methods of information systems synthesis

УДК 62-50 **doi: 10.20998/2522-9052.2017.1.02**

В. І. Носков, М. В. Ліпчанський, Г. В. Гейко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

СИНТЕЗ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ АСИНХРОННИМ ТЯГОВИМ ПРИВОДОМ МЕТОДОМ АКУР

Предметом вивчення в статті є аналіз методів синтезу систем автоматичного управління (САУ) для рухомого складу з асинхронним тяговим приводом (АТП). **Мета** – забезпечення якості динаміки процесів, точності приведення об'єктів в задану точку фазового простору та мінімізація енергетичних витрат на процеси керування в умовах детермінованих і випадкових збурень. **Задача –** вибір метода синтезу оптимальних САУ, що дозволяє забезпечити необхідні показники якості роботи АТП. Аналіз проблем оптимального управління тяговим приводом рухомого складу показав, що найбільш перспективно використовувати для синтезу систем управління об'єктами, які описуються системами нелінійних диференціальних рівнянь, метод аналітичного конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи (АКУР). Метод АКУР дозволяє синтезувати регулятори, які оптимізують процеси управління не тільки при детермінованих, але й при випадкових збуреннях. Але використання цього методу можливо для об'єктів, математична модель яких описується системою диференціальних рівнянь, в яких управління входять лінійно. У зв'язку з тим, що в АТП управління входять нелінійно, для використання методу АКУР була виконана його адаптація та були отримані вирази для управлінь, які визначають структуру оптимального регулятора. **Висновки:** запропоновано підхід для синтезу САУ асинхронного тягового приводу з використанням метода АКУР. Була виконана адаптація цього методу з урахуванням нелінійних управлінь.

Ключові слова: система автоматичного управління, асинхронний тяговий привід, метод аналітичного конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи.

Вступ

Одним з найважливіших напрямків технічного розвитку рухомого складу з високими економічними показниками є впровадження тягових приводів з асинхронними двигунами, які мають ряд переваг у порівнянні з двигунами постійного струму. Широке впровадження асинхронного приводу на залізницях України затрималося з кількох причин, основною з яких є необхідність створення надійної та економічної САУ тяговим приводом. У той же час випробування і досвід експлуатації перших українських дизель-поїздів ДЕЛ-01 та ДЕЛ-02 з АТП показують, що ця складність подолана, а накопичений досвід у галузі математичного моделювання, застосування сучасних методів теорії автоматичного управління і прогресивних інформаційних технологій, можуть бути використані при створенні сучасного рухомого складу.

Аналіз проблеми та постановка задачі

На даний час відома низка методів для синтезу оптимальних систем управління. Проте, найбільшого поширення набули тільки деякі з них: класичне варіаційне числення, динамічне програмування, принцип максимуму Понтрягіна, метод функцій Ляпунова, методи аналітичного конструювання регуляторів Лєтова-Калмана та О.А. Красовського, машинно-орієнтовані методи термінального управління з використанням алгоритмів випадкового пошуку [1–4]. Багато авторів займалися питаннями синтезу регуляторів для деяких видів математичних моделей, в яких управління входять нелінійно [5–7]. Аналіз проблем оптимального управління тяговим приводом рухомого складу показав, що найбільш перспективно використовувати для синтезу систем управління об'єктами, які описуються системами нелінійних диференційних рівнянь, метод аналітичного конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи. Метод АКУР дозволяє синтезувати регулятори, які оптимізують процеси управління не тільки при детермінованих, але і при випадкових збуреннях. Критерій оптимальності в методі АКУР дає можливість враховувати як вимоги до якості динамічних процесів, точності переведення об'єкта в задану точку фазового простору, так і мінімізувати енергетичні витрати на процеси управління.

Загальне формулювання основної теореми методу АКУР таке [8–10]. Нехай об'єкт описується системою нелінійних диференційних рівнянь:

$$\frac{dx_i}{dt} + f_i(x_1, ..., x_n, t) = \sum_{j=1}^{m} \phi_{ij}(x_1, ..., x_n, t) u_j + \sum_{k=1}^{n} \eta_{ik}(x_1, \ldots, x_n, t) \xi_k(t), \tag{1}$$

тоді управліннями, оптимальними в сенсі мінімуму функціонала

$$I = M\left[V_3\left(x_1(t_2), ..., x_n(t_2), t_2\right)\right] + M \times \left[\int_{t_1}^{t_2} Q(x_1, ..., x_n, t) dt\right] + M\left[\frac{1}{q}\sum_{j=1}^{m}\int_{t_1}^{t_2}\left(u_j/k_j\right)^q dt\right] + \tag{2}$$

$$+M\left[\frac{1}{p}\sum_{j=1}^{m}\int_{t_1}^{t_2}\left(k_j\sum_{i=1}^{n}\phi_{ij}\frac{\partial V}{\partial x_i}\right)^p dt\right]$$

є управління

$$u_j=-k_j^p\left(\sum_{i=1}^{n}\varphi_{ij}\frac{\partial V}{\partial x_i}\right)^{p-1}, \qquad (3)$$

де V – рішення лінійного диференційного рівняння в частинних похідних

$$\frac{\partial V}{\partial t}-\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial V}{\partial x_i}f_i=-Q \qquad (4)$$

за граничною умовою

$$V\left[x_1(t_2),...,x_n(t_2),t_2\right]=V_3\left[x_1(t_2),...,x_n(t_2),t_2\right]. \qquad (5)$$

У співвідношеннях (1) – (5) прийняті наступні позначення: x_i $(i=1,2,...,n)$ – фазові координати об'єкта; f_i, φ_{ij}, η_{ik} $(i=1,2,...,n; j=1,2,...,m; k=1,2,...,r)$ – безперервні задані функції; $\xi_k(t)$ – білі шуми (послідовності статистично незалежних δ-імпульсів, випадкових за площею і розділених як завгодно малими, але кінцевими проміжками часу); M – символ математичного сподівання; $V_3[x_1(t_2),...,x_n(t_2),t_2]$ – позитивно визначена безперервна функція, що задає точність переведення об'єкта в момент часу t_2 в задану точку фазового простору; $Q(x_1,...,x_n,t)$ – позитивно визначена безперервна функція, що задає вимоги до якості перехідних процесів об'єкту за фазовими координатами в інтервалі часу управління $[t_1,t_2]$; p, q – позитивні числа, що задовольняють умовам: $1/p+1/q=1$ та x^p, x^q – парні функції x; k_j $(j=\overline{1,m})$ – задані числа; u_j $(j=\overline{1,m})$ – сигнали управління на входах виконуючих пристроїв.

У тому випадку, коли функції f_i, Q, V_3 можна задати у вигляді ступеневих рядів:

$$f_i=\sum_{g=1}^{n}a_{ig}x_g+\sum_{g,h=1}^{n}a_{igh}x_gx_h+\sum_{g,h,q=1}^{n}a_{ighq}x_gx_hx_q+..., \qquad (6)$$

$$Q=\frac{1}{2}\sum_{g,h=1}^{n}\beta_{gh}x_gx_h+\frac{1}{3}\sum_{g,h,q=1}^{n}\beta_{ghq}x_gx_hx_q+ \\ +\frac{1}{4}\sum_{g,h,q,l=1}^{n}\beta_{ghql}x_gx_hx_qx_l+..., \qquad (7)$$

$$V_3=\frac{1}{2}\sum_{g,h=1}^{n}\rho_{gh}x_gx_h+\frac{1}{3}\sum_{g,h,q=1}^{n}\rho_{ghq}x_gx_hx_q+ \\ +\frac{1}{4}\sum_{g,h,q,l=1}^{n}\rho_{ghql}x_gx_hx_qx_l+..., \qquad (8)$$

де $a_{ig}, a_{igh}, a_{ighl}$, … – коефіцієнти, які є в загальному випадку функціями часу, що не змінюються при перестановці індексів, починаючи з другого; $\beta_{gh}, \beta_{ghq}, \beta_{ghql}$, … – коефіцієнти, які є в загальному випадку функціями часу, що не змінюються при перестановці індексів; $\rho_{gh}, \rho_{ghq}, \rho_{ghql}$, … – постійні коефіцієнти, які не змінюються при перестановці індексів, рішення рівняння (4) можна шукати у вигляді

$$V=\frac{1}{2}\sum_{g,h=1}^{n}A_{gh}x_gx_h+\frac{1}{3}\sum_{g,h,q=1}^{n}A_{ghq}x_gx_hx_q+ \\ +\frac{1}{4}\sum_{g,h,q,l=1}^{n}A_{ghql}x_gx_hx_qx_l+..., \qquad (9)$$

де A_{gh}, A_{ghq}, A_{ghql} – коефіцієнти, які є в загальному випадку функціями часу, можуть бути визначені з системи звичайних диференційних рівнянь:

$$\frac{dA_{ij}}{dt}-\sum_{p=1}^{n}(\alpha_{pi}A_{pj}+\alpha_{pj}A_{pi})=-\beta_{ij};$$

$$\frac{dA_{ijk}}{dt}-\sum_{p=1}^{n}(\alpha_{pi}A_{pjk}+\alpha_{pj}A_{pik}+\alpha_{pk}A_{pij})= \\ =-\beta_{ijk}+\sum_{p=1}^{n}\left(A_{pi}\alpha_{pjk}+A_{pj}\alpha_{pik}+A_{pk}\alpha_{pij}\right). \qquad (10)$$

З урахуванням співвідношення (9) вираз для управління (3) можна представити у вигляді:

$$u_j=-k_j^p\left(\sum_{i=1}^{n}\varphi_{ij}\left(\sum_{k=1}^{n}A_{jk}x_k+\sum_{k,l=1}^{n}A_{ikl}x_kx_l+...\right)\right)^{p-1}. \qquad (11)$$

Це співвідношення і визначає структуру оптимального, в сенсі мінімуму функціоналу узагальненої роботи (2), регулятора для початкового об'єкта управління (1).

Таким чином, для синтезу оптимальної системи управління методом АКУР необхідно, щоб математична модель об'єкта мала вигляд (1).

Адаптація методу АКУР для об’єктів, в які управління входять нелінійно

З вигляду рівнянь (1) випливає, що метод АКУР можна використовувати для об'єктів, що описуються за допомогою систем звичайних нелінійних диференційних рівнянь, в які управління u_j входять лінійно. Це накладає певні обмеження на область застосування методу, оскільки існує широкий клас об'єктів, математичні моделі яких описуються системами звичайних диференційних рівнянь, в які управляючі впливи входять нелінійно.

Прикладом є асинхронний тяговий привід [11]. В цьому випадку у праву частину системи рівнянь (1) входять співвідношення виду $u_1\sin(\alpha u_2+\gamma)$, де u_1 і u_2 – управління; α, γ – константи, або в більш загальному випадку – у вигляді добутку функцій, кожна з яких залежить від одного управління: $\psi_1(u_1)$, $\psi_2(u_2)$. У зв'язку з необхідністю вирішувати завдання для об'єкта, математична модель якого містить керуючі впливи під знаками функцій, або у вигляді добутку двох функцій, кожна з яких залежить від одного управління, пропонується нова модифікація методу аналітичного конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи, яка ґрунтується на такій теоремі [12].

Теорема. Нехай об'єкт описується системою:

$$\frac{dx_i}{dt}+f_i(x_i,...,x_n,t)=\sum_{k=1}^{n}\eta_{ik}(x_1,\dots,x_n,t)o_k(t)+$$

$$+\sum_{j=1}^{m}\phi_{ij}(x_1,...,x_n,t)\psi_{1ij}(u_{1ij})\psi_{2ij}(u_{2ij}), \qquad (12)$$

тоді оптимальними в сенсі мінімуму функціоналу

$$I=M[V_3(x_1(t_2),...,x_n(t_2),t_2)]+M\left[\int_{t_1}^{t_2}Qdt\right]+$$

$$+M\left[\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\int_{t_1}^{t_2}\left(u_{1ij}^2/k_{1ij}^2+u_{2ij}^2/k_{2ij}^2\right)dt\right] \qquad (13)$$

є управління:

$$u_{1ij}=-k_{1ij}^2\frac{\partial V}{\partial x_i}\varphi_{ij}\psi_{1ij}\psi_{2ij}/2u_{1ij}; \qquad (14)$$

$$u_{2ij}=-k_{2ij}^2\frac{\partial V}{\partial x_i}\varphi_{ij}\psi_{1ij}\psi_{2ij}/2u_{2ij}, \qquad (15)$$

де V – рішення рівняння (4) за граничною умовою (5).

Доказ. Повна похідна функції V в силу рівнянь об'єкта (12) і рівняння (4) дорівнює

$$\frac{dV}{dt}=\frac{\partial V}{\partial t}+\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial V}{\partial x_i}\frac{dx_i}{dt}=$$

$$=\frac{\partial V}{\partial t}+\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial V}{\partial x_i}\left(\sum_{j=1}^{m}\varphi_{ij}\psi_{ij}^1\psi_{ij}^2+\sum_{k=1}^{r}\eta_{ik}\xi_k(t)-f_i\right)= \qquad (16)$$

$$=-Q+\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial V}{\partial x_i}\sum_{j=1}^{m}\varphi_{ij}\psi_{ij}^1\psi_{ij}^2+\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial V}{\partial x_i}\sum_{k=1}^{r}\eta_{ik}\xi_k(t).$$

Інтегруємо вираз (16) в інтервалі часу $[t_1, t_2]$:

$$V[x_1(t_2),\dots,x_n(t_2),t_2]-V[x_1(t_1),\dots,x_n(t_1),t_1]=$$

$$=-\int_{t_1}^{t_2}Qdt+\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\int_{t_1}^{t_2}\frac{\partial V}{\partial x_i}\varphi_{ij}\psi_{ij}^1\psi_{ij}^2dt+ \qquad (17)$$

$$+\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{r}\int_{t_1}^{t_2}\frac{\partial V}{\partial x_i}\eta_{ik}\xi_k(t)dt.$$

Враховуючи, що за умовою

$$V[x_1(t_2),\dots,x_n(t_2),t_2]=V_3[x_1(t_2),\dots,x_n(t_2),t_2],$$

із (17) можна отримати

$$M\left[V_3\left(x_1(t_2),\dots,x_n(t_2),t_2\right)\right]+M\left[\int_{t_1}^{t_2}Qdt\right]=$$

$$=M\left[V\left(x_1(t_1),\dots,x_n(t_1),t_1\right)\right]+ \qquad (18)$$

$$+M\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\int_{t_1}^{t_2}\frac{\partial V}{\partial x_i}\varphi_{ij}\psi_{ij}^1\psi_{ij}^2dt\right]+M\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{k=1}^{r}\int_{t_1}^{t_2}\frac{\partial V}{\partial x_i}\eta_{ik}\xi_k(t)dt\right].$$

Використовуючи методику О.А. Красовського [9] покажемо, що останній член у (18) не залежить від управлінь (14), (15). З огляду на прийняту модель білих шумів в (1) і (12), можна записати

$$\xi_k(t)=\sum\nolimits_d B_{kd}\delta(t-\tau_d), \qquad (19)$$

де $\xi_k(t)$ – узагальнений стаціонарний випадковий процес; B_{kd} – незалежні випадкові центровані величини; τ_1, τ_2, … – випадкові моменти часу, яким відповідають "імпульси" δ-функції.

Згідно співвідношенню (19) останній член виразу (18) можна перетворити до вигляду

$$R=M\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\sum_{d}\left(B_{kd}\int_{\tau_d-0}^{\tau_d+0}\frac{\partial V}{\partial x_i}\eta_{ik}\delta(t-\tau_d)dt\right)\right]. \qquad (20)$$

Внаслідок впливу δ-функцій $\delta(t-\tau_d)$ ($d=const$) фазові координати об'єкта управління (12) на інтервалі часу від τ_d-0 до τ_d+0 отримують прирощення

$$\Delta x_{id}=\int_{\tau_d-0}^{\tau_d+0}\eta_{ik}B_{kd}\delta(t-\tau_d)dt,\quad i=\overline{1,n}.$$

З точністю до нескінченно малих величин більш високого порядку прирощення Δx_{id} не залежить від управлінь u_{1ij} та u_{2ij} ($i=\overline{1,n}$, $j=\overline{1,m}$). Таким чином, зміни фазових координат, викликані впливом збурень у вигляді δ-функцій, з точністю до нескінченно малих величин вищого порядку не залежать від управлінь u_{1ij} и u_{2ij}, а це означає, що і збурення функцій

$$V[x_1,\dots,x_n,t],\ \frac{\partial V}{\partial x_i},\ \eta_{ik}(x_1,\dots,x_n,t),$$

викликані впливом збурень у вигляді δ-функцій з точністю до нескінченно малих більш вищого порядку, не залежать від управлінь u_{1ij} и u_{2ij} ($i=\overline{1,n}$, $j=\overline{1,m}$). Тому і R з точністю до нескінченно малих величин не залежить від управлінь.

Функціонал (13) з урахуванням виразів (17) і (20) перетворимо до виду

$$I=M[V(x_1(t_1),\dots,x_n(t_1),t_1)]+$$

$$+M\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}\int_{t_1}^{t_2}\frac{\partial V}{\partial x_i}\varphi_{ij}\psi_{ij}^1\psi_{ij}^2dt\right]+ \qquad (21)$$

$$+M\left[\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\int_{t_1}^{t_2}\left(u_{1ij}^2/k_{1ij}^2+u_{2ij}^2/k_{2ij}^2\right)dt\right]+R.$$

Оскільки маємо таке:

$$\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{u_{1ij}}{k_{1ij}}+k_{1ij}\frac{\partial V}{\partial x_i}\varphi_{ij}\psi_{1ij}\psi_{2ij}/2u_{1ij}\right]^2=$$

$$=\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{u_{1ij}^2}{k_{1ij}^2}+\frac{\partial V}{\partial x_i}\varphi_{ij}\psi_{1ij}\psi_{2ij}+\frac{u_{1ij}^2}{k_{1ij}^2}\right]=$$

$$=2\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\frac{u_{1ij}^2}{k_{1ij}^2}+\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial V}{\partial x_i}\varphi_{ij}\psi_{1ij}\psi_{2ij};$$

$$\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{u_{2ij}}{k_{2ij}}+k_{2ij}\frac{\partial V}{\partial x_i}\varphi_{ij}\psi_{1ij}\psi_{2ij}/2u_{2ij}\right]^2=$$

$$= 2\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\frac{u_{2ij}^2}{k_{2ij}^2} + \sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}\frac{\partial V}{\partial x_i}\varphi_{ij}\psi_{1ij}\psi_{2ij} ,$$

то функціонал (21) можна записати у вигляді

$$I = M\left[V(x_1(t_1),\ ...,\ x_n(t_1),t_1)\right] + M \times$$

$$\times\left[\frac{1}{2}\int_{t_1}^{t_2}\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}[\frac{u_{1ij}}{k_{1ij}} + k_{1ij}\frac{\partial V}{\partial x_i}\phi_{ij}\psi_{1ij}\psi_{2ij} / 2u_{1ij}]^2 dt\right] + M \times \quad (22)$$

$$\times\left[\frac{1}{2}\int_{t_1}^{t_2}\sum_{j=1}^{m}\sum_{i=1}^{n}[\frac{u_{2ij}}{k_{2ij}} + k_{2ij}\frac{\partial V}{\partial x_i}\phi_{ij}\psi_{1ij}\psi_{2ij} / 2u_{2ij}]^2 dt\right] + R .$$

Якщо управління u_{1ij}, u_{2ij} визначаються відповідно співвідношеннями (14) і (15), то підінтегральний вираз в функціоналі (22) обертається в нуль, і він приймає мінімальне значення.

Отже, теорема доведена. Вона доведена для випадку $p = q = 2$, тобто для квадратичного критерію якості щодо управлінь, критерію, що має ясний фізичний сенс і широко застосовується при оптимізації електропривода. Зауважимо, що вигляд оптимальних управлінь (14) і (15) при випадкових збуреннях описаного типу однаковий для детермінованих і стохастичних систем. При цьому величини управлінь як і в найбільш загальних теоремах по АКУР О.А. Красовського [8] не залежать від рівня шумів.

Якщо функції f_i, Q, V_3 можна представити у вигляді степеневих рядів (6), (7), (8), то рішення рівняння (4) матиме вигляд (9), а коефіцієнти цього рівняння визначаються з системи рівнянь (10). З урахуванням співвідношення (9) рівняння (14) і (15) можна представити у вигляді

$$u_{1ij} = -k_{1ij}^2\frac{\phi_{ij}\cdot\psi_{1ij}\cdot\psi_{2ij}}{2u_{1ij}}\left(\sum_{k=1}^{n}A_{jk}x_k + \sum_{k,l=1}^{n}A_{ikl}x_kx_l + ...\right), \quad (23)$$

$$u_{2ij} = -k_{2ij}^2\frac{\phi_{ij}\cdot\psi_{1ij}\cdot\psi_{2ij}}{2u_{2ij}}\left(\sum_{k=1}^{n}A_{jk}x_k + \sum_{k,l=1}^{n}A_{ikl}x_kx_l + ...\right). \quad (24)$$

Ці співвідношення і визначають структуру оптимального регулятора.

Висновок

Запропоновано підхід для синтезу САУ асинхронного тягового приводу з використанням метода АКУР. Була виконана адаптація цього методу з урахуванням нелінійних управлінь. Отримані співвідношення, котрі визначають структуру оптимального регулятора

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Варіаційне числення та методи оптимізації / М.О. Перестюк, О.М. Станжицький, О.В. Капустян, Ю.В. Ловейкін. Навч. посібник. – Київ: КНУ ім. Т.Шевченка, 2010. – 121 с.
2. Милютин А.А. Принцип максимума в оптимальном управлении / А.А. Милютин, А.В. Дмитрук, Н.П. Осмоловский – М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2004. – 167 с.
3. Летов А.М. Аналитическое конструирование регуляторов / А.М. Летов // М.: Автоматика и телемеханика. – 1960. – Т. 21, вып. 4. – С. 436–441.
4. Сурков В.В. Аналитическое конструирование регуляторов, оптимальных по точности и быстродействию / В.В. Сурков, Б.В. Сухинин, В.И. Ловчаков, А.Э. Соловьев. – Тула: Тул. гос. ун-т, 2005. – 300 с.
5. Дмитриенко В.Д. Синтез оптимальных регуляторов для дизель-поезда методом аналитического конструирования по критерию обобщенной работы / В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, Н.В. Мезенцев // Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – Вип. 31. – С. 87–94.
6. Эволюционные методы компьютерного моделирования / А.Ф. Верлань, В.Д. Дмитриенко, Н.И. Корсунов, В.А. Шорох. – К.: Наук. думка, 1992. – 256 с.
7. Дмитриенко В.Д. Оптимизация функционала обобщенной работы при нелинейно входящих управлениях / В.Д. Дмитриенко, В.И. Носков, Н.В. Мезенцев // Праці Луганського відділення Міжнародної Академії Автоматизації. – Луганськ: МАН, 2005. – № 1. – С. 17 – 22.
8. Моделирование и оптимизация систем управления и контроля локомотивов / В.И. Носков, В.Д. Дмитриенко, Н.И. Заполовский, С.Ю. Леонов. – Х.: ХФИ «Транспорт Украины», 2003. – 248 с.
9. Красовский А.А. Системы автоматического управления полетом и их аналитическое конструирование / А.А. Красовский . – М.: Наука, 1973. – 560 с.
10. Дмитриенко В.Д. Синтез регуляторов методом АКОР А.А. Красовского при нелинейно входящих управлениях и случайных возмущающих воздействиях / В.Д. Дмитриенко, В.И. Носков, Н.В. Мезенцев // Вісник НТУ «ХПІ», 2009. – Харків: НТУ «ХПІ», 2010. – Вип. 12. – С. 53 – 60.
11. Носков В.И. Математическая модель электропривода на основе метода АКУР. / В.И. Носков, А.И. Баленко, Н.И. Заполовский // Функционально-ориентированные вычислительные системы: Межд. НТК. – Киев, 1993. – С. 20.
12. Дмитриенко В.Д. Решение задачи оптимизации критерия обобщенной работы при нелинейно входящих управлениях / В.Д. Дмитриенко, В.И. Носков, Н.В. Мезенцев // Системи обробки інформації. – 2004. – Вип. 12 (40) – С. 52 – 59.

REFERENCES

1. Perestyuk, M.O., Stanzhits'kiy, O.M., Kapustyan, O.V. and Loveykín YU.V. (2010), *Variatsiyne chyslennya ta metody optymizatsiyi* [Variation calculus and optimization methods], KNU im. T. Shevchenka, Київ, 121 p.
2. Milyutin, A.A., Dmitruk, A.V. and Osmolovskiy N.P. (2004), *Printsip maksimuma v optimal'nom upravlenii* [The maximum principle in optimal control], MGU im. M.V. Lomonosova, Moskva, 167 p.
3. Letov A.M. (1960), "*Analiticheskoye konstruirovaniye regulyatorov*" [Analytical Design of Controllers, Avtomatika i telemekhanika], t. 21, vyp. 4, pp. 436–441.

4. Surkov V.V., Sukhynyn, B.V., Lovchakov, V.Y. and Solovev, A.É. (2005), Analytycheskoe konstruyrovanye rehulyatorov, optymalnykh po tochnosty y bystrodeystvyyu [Analytical design of regulators optimal in accuracy and speed], Tul. hos. un-t, Tula, 300 p.
5. Dmitriyenko, V.D., Zapolovskyy, N.Y. and Mezentsev, N.V. (2010), Syntez optymalnykh rehulyatorov dlya dyzel-poezda metodom analytycheskoho konstruyrovanyya po kryteryyu obobshchennoy raboty [Synthesis of optimal regulators for a diesel train by the method of analytical construction according to the criterion of generalized work], *Visnyk NTU «KHPI»*, Kharkiv, vyp. 31, pp. 87–94.
6. Verlan, A.F., Dmytryenko, V.D., Korsunov, N.Y. and Shorokh, V.A. (1992), Évolyutsyonnye metody kompyuternoho modelyrovanyya [Evolutionary methods of computer modeling], Nauk. dumka, Kyev, 256 p.
7. Dmitriyenko, V.D., Noskov, V.I. and Mezentsev, N.V. (2005), Optymyzatsyya funktsyonala obobshchennoy raboty pry nelyneyno vkhodyashchykh upravlenyyakh [Optimization of the function of generalized work under non-linearly incoming control], *Pratsi Luhanskoho viddilennya Mizhnarodnoyi Akademiyi Avtomatyzatsiyi*, No. 1, pp. 17–22.
8. Noskov V.Y., Dmitriyenko, V.D. and Leonov, S.YU. (2003), *Modelyrovanye y optymyzatsyya system upravlenyya y kontrolya lokomotyvov* [Modeling and Optimization of Locomotive Control and Control Systems], KHFY «Transport Ukrayny», Kharkov, 248 p.
9. Krasovskyy A.A. (1973), *Systemy avtomatycheskoho upravlenyya poletom y ykh analytycheskoe konstruyrovanye* [Systems for Automatic Flight Control and their Analytical Design], Nauka, Moskva, 560 p.
10. Dmitriyenko, V.D., Noskov, V.I. and Mezentsev, N.V. (2009), Syntez rehulyatorov metodom AKOR A.A. Krasovskoho pry nelyneyno vkhodyashchykh upravlenyyakh y sluchaynykh vozmushchayushchykh vozdeystvyyakh, *Visnyk NTU «KHPI»*, Vyp. 12, pp 53–60.
11. Noskov, V.Y., Balenko, A.Y. and Zapolovskyy, N.Y. (1993), Matematycheskaya model élektropryvoda na osnove metoda AKUR, *Funktsyonalno-oryentyrovannye vychyslytelnye systemy*: Mezhd. NTK, Kyev, p. 20.
12. Dmitriyenko, V.D., Noskov, V.I. and Mezentsev, N.V. (2004), Resheniye zadachi optimizatsii kriteriya obobshchennoy raboty pri nelineyno vkhodyashchikh upravleniyakh [Solution of the problem of optimization of the criterion of generalized work for nonlinearly incoming controls], *Sistemi obrobki ínformatsíí*, vip. 12 (40), pp. 52–59.

Надійшла (received) 07.02.2017
Прийнята до друку (accepted for publication) 16.05.2017

Синтез системы управления асинхронным тяговым приводом методом АКОР

В. И. Носков, М. В. Липчанский, Г. В. Гейко

Предметом изучения в статье является анализ методов синтеза систем автоматического управления (САУ) для подвижного состава с асинхронным тяговым приводом (АТП). **Цель** – обеспечение качества динамики процессов, точности приведения объектов в заданную точку фазового пространства и минимизация энергетических затрат на процессы управления в условиях детерминированных и случайных возмущений. **Задача** – выбор метода синтеза оптимальных САУ, позволяющий обеспечить требуемые показатели качества работы АТП. Анализ проблем оптимального управления тяговым приводом движущегося состава показал, что наиболее перспективно использовать для синтеза систем управления объектами, которые описываются системами нелинейных дифференциальных уравнений, метод аналитического конструирования регуляторов по критерию обобщенной работы (АКОР). Метод АКОР позволяет синтезировать регуляторы, которые оптимизируют процессы управления не только при детерминированных, но и при случайных возмущениях. Однако, использование этого метода возможно для объектов, математическая модель которых описывается системой дифференциальных уравнений, в которых управления входят линейно. В связи с тем, что в АТП управления входят нелинейно, для использования метода АКОР была выполнена его адаптация и были получены выражения для управлений, которые определяют структуру оптимального регулятора. **Выводы:** предложен подход для синтеза САУ асинхронного тягового привода с использованием метода АКОР. Была выполнена адаптация этого метода с учётом нелинейных управлений.

Ключевые слова: система автоматического управления, асинхронный тяговый привод, метод аналитического конструирования регуляторов по критерию обобщенной работы.

Synthesis of the asynchronous traction drive control system by the ACOR method

V. Noskov, M. Lipchansky, G. Geiko

The **subject** of the study in the article is the analysis of methods for the synthesis of automatic control systems (ACS) for rolling stock with an asynchronous traction drive (ATD). **The goal** is assurance the quality of the processes dynamics, the accuracy of bringing objects to a specified point in the phase space, and minimizing energy costs for control processes in conditions of deterministic and random perturbations. **The task** is selection the method of optimal ACS synthesis, which allows providing the required indicators of ATD work quality. Analysis of the problems of optimal control of moving train traction drive showed that it is most promisingly to use the method of analytic construction of regulators by the criterion of generalized work (ACOR) for the synthesis of object management systems, which are described by systems of nonlinear differential equations. AKOR method allows to synthesize regulators that optimize control processes not only for deterministic, but also for random perturbations. However, the use of this method is possible for objects whose mathematical model is described by a system of differential equations in which control enters linearly. In connection with the fact that controls are non-linear in the ATD, to use the AKOR method, its adaptation was performed and expressions were obtained for the controls that determine the structure of the optimal regulator. **Conclusions:** an approach for the synthesis of the asynchronous traction drive ACS using the AKOR method is proposed. Adaptation of this method was carried out taking into account nonlinear controls.

Keywords: automatic control system, asynchronous traction drive, method of analytic construction of the regulators by the criterion of generalized work.