

УДК 621.867

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ СТРІЧКОВОГО КОНВЕЄРА ПРИ КЕРУВАННІ ВІД ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ

Ю. О. Ромасевич, В. С. Ловейкін, Р. А. Кульпін, К. Р. Пундик

Національний університет біоресурсів і природокористування України, Україна.

Стаття зі спеціальності: 133 – галузеве машинобудування.

Кореспонденція авторів: romasevichyuriy@ukr.net.

Історія статті: отримано – листопад 2020, акцептовано – грудень 2020.

Бібл. 9, рис. 4, табл. 2.

Анотація. У статті розвинуто підхід щодо підвищення експлуатаційних показників роботи стрічкового конвеєра на етапі його пуску. Це досягнуто шляхом розробки математичної моделі руху конвеєра при керуванні від пристрою плавного пуску (у роботі враховано рівняння динаміки руху механічної частини конвеєра та рівнянь асинхронного електроприводу, який отримує живлення від пристрою плавного пуску). Визначено налаштування пристрою плавного пуску, які мають найбільший вплив на динамічні та енергетичні показники роботи конвеєра. Шляхом проведення чисельних експериментів отримано масив даних, що пов'язує величини налаштувань пристрою плавного пуску (тривалість наростання напруги живлення та початкова напруга живлення приводу) із величинами оціночних динамічних і енергетичних показників роботи конвеєра. Оціночні показники відображали середньоквадратичні та максимальні величини. Проведений аналіз дав змогу отримати раціональні значення налаштовуваних параметрів пристрою плавного пуску, при яких динамічні навантаження та втрати енергії значно зменшились.

Ключові слова: стрічковий конвеєр, пристрій плавного пуску, оптимальні налаштування, чисельні експерименти.

Постановка проблеми

Стрічкові конвеєри отримали значне поширення у багатьох сферах виробництва, у тому числі і у аграрній. Їх експлуатація досить часто є вузьким місцем виробництва, оскільки вихід з ладу конвеєра може призвести до зупинки всього технологічного процесу. Тому необхідно виконувати комплекс заходів, які б дали змогу мінімізувати негативну дію різноманітних факторів на експлуатаційні показники транспортуючої машини. Одним із таких сучасних заходів є обладнання приводу конвеєра пристроєм плавного пуску (що відповідає напрямку агротроніки: поєднанні електронних, механічних та інтелектуальних компонентів у машинах та засобах аграрного виробництва).

Пристрій плавного пуску має ряд налаштувань, які можна легко змінювати. Як правило, рекомендації стосовно таких налаштувань для роботи стрічкових конвеєрів відсутні, а інженерний персонал, який виконує введення їх в експлуатацію, є недостатньо кваліфікованим для того, щоб самостійно виконати розрахунок параметрів пристрою плавного пуску. Тому актуальною є задача розробки рекомендацій, які б дали змогу досить легко провести налаштування пристрою плавного пуску з умов мінімізації небажаних динамічних і енергетичних показників роботи стрічкового конвеєра.

Аналіз останніх досліджень

Для проведення кількісного аналізу науково-прикладних робіт у галузі динаміки, енергетики та керування рухом стрічковими конвеєрами використаємо дані наукометричних баз даних Google Scholar, Web of Science, Scopus а також дані, які можна отримати з веб-сайта патентного відомства Німеччини і спеціалізованої бази даних "Винаходи (корисні моделі) в Україні". Аналіз кількості опублікованих робіт будемо робити для часового проміжку 2015-2020 рр. Всі отримані результати наведено у табл. 1 (всі запити виконані англійською мовою).

Аналіз даних, які наведено у табл. 1 дозволяє стверджувати, що питання, які пов'язані з стрічковими конвеєрами є актуальними. Про це свідчить значна кількість наукових робіт, що проіндексовані у наукометричних базах даних. Загальною тенденцією для всіх даних (табл. 1) є зростання кількості публікацій по рокам (хоча і нерівномірне). Особливий інтерес представляє напрямок, пов'язаний з енегоефективністю роботи стрічкових конвеєрів. Важливість цих практичних питань викликана, на наш погляд, наявними резервами щодо зниження небажаних втрат енергії при транспортуванні вантажів.

Вказані резерви можна реалізувати шляхом використання частотних перетворювачів [1, 2] та пристроїв плавного пуску [3] (табл. 1), вдосконалення систем керування рухом транспортуючої машини у

тому числі у частині реалізації оптимального керування [4].

Таблиця 1. Статистика кількості наукових праць у наукометричних базах даних (за виключенням патентів).

Table 1. Statistics of number of scientific works in of peer-reviewed literature databases (patents are excluded).

Запит	Роки					
	2020	2019	2018	2017	2016	2015
Google Scholar*						
Стрічковий конвеєр	9160	9470	9160	9030	8070	7790
Стрічковий конвеєр ТА Динаміка	3430	3240	3030	2860	2690	2570
Стрічковий конвеєр ТА Енергетика	5130	5020	4870	4850	4320	4170
Стрічковий конвеєр ТА Оптимальн е керування	3140	3110	2830	2590	2550	2280
Web of Science**						
Стрічковий конвеєр	268	345	316	339	268	255
Стрічковий конвеєр ТА Динаміка	46	59	48	56	31	36
Стрічковий конвеєр ТА Енергетика	34	42	36	54	32	44
Стрічковий конвеєр ТА Оптимальн е керування	4	12	7	9	6	4
Scopus**						
Стрічковий конвеєр	431	520	423	437	377	338
Стрічковий конвеєр ТА Динаміка	29	33	35	36	22	26
Стрічковий конвеєр ТА Енергетика	67	72	58	66	53	55
Стрічковий конвеєр ТА Оптимальн е керування	10	15	8	17	8	5

* наукометрична база Google Scholar дає лише приблизну кількість наукових праць;

** запит виконано за темою та ключовими словами у працях.

Статистику кількості триманих за останні 5 років патентів у світі [5] та в нашій державі [6] за класом B65G 15/00 „Стрічковий конвеєр” можна спостерігати на рис. 1.

Як видно з рис. 1, тренди кількості отриманих патентів як у світовому масштабі так і в Україні однакові: поступове зростання кількості отриманих патентів до пікового значення у 2018 році; у

наступному 2019 році спостерігається спад кількості, після чого відбувається поживлення винахідницької роботи (2020 рік).

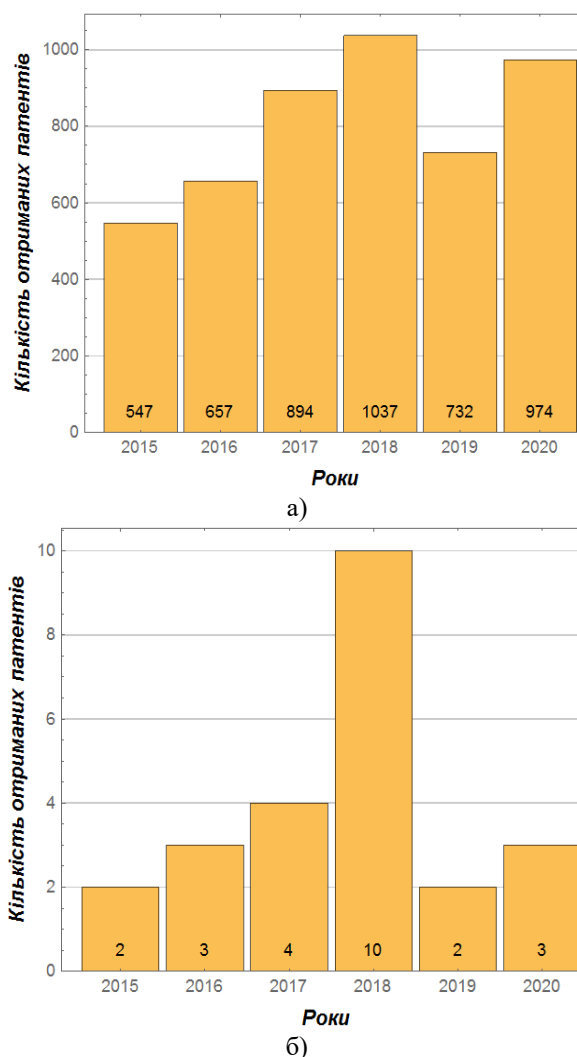


Рис. 1. Динаміка кількості отриманих патентів за останні 6 років за класом B65G 15/00 „Стрічковий конвеєр”: а) у світі; б) в Україні.

Fig. 1. Overall number of obtained patents during last 6 years according the class B65G 15/00 „Belt conveyor”: а) in the world; б) in Ukraine.

Аналіз діаграм, які наведені на рис. 1, дозволяє стверджувати, що, роботи з удосконалення конструкцій та окремих елементів стрічкових конвеєрів, у тому числі розробка систем керування їх приводами та насичення засобами електроніки, є актуальним науково-прикладним напрямком.

Мета досліджень

Мета дослідження полягає у підвищенні техніко-експлуатаційних показників роботи стрічкового конвеєра шляхом раціонального налаштування пристрою плавного пуску приводу машини.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання: 1) виконати аналіз науково-прикладних і технічних документів у галузі

досліджень конструкції та експлуатації стрічкових конвеєрів; 2) провести обґрунтований вибір математичної моделі стрічкового конвеєра, яка була б придатна для дослідження динамічних і енергетичних процесів, що мають місце при керуванні приводу конвеєра від пристрою плавного пуску; 3) дослідити закономірності впливу опційних налаштувань пристрою плавного пуску на динамічні і енергетичні показники роботи стрічкового конвеєра; 4) надати рекомендації стосовно раціональних налаштувань пристрою плавного пуску.

Результати досліджень

Першим етапом у моделюванні роботи стрічкового конвеєра є вибір його динамічної моделі. У рамках даного дослідження зупинимось на динамічній моделі, що розроблена у роботі [7] (рис. 2). Такий вибір зроблений з позицій можливості

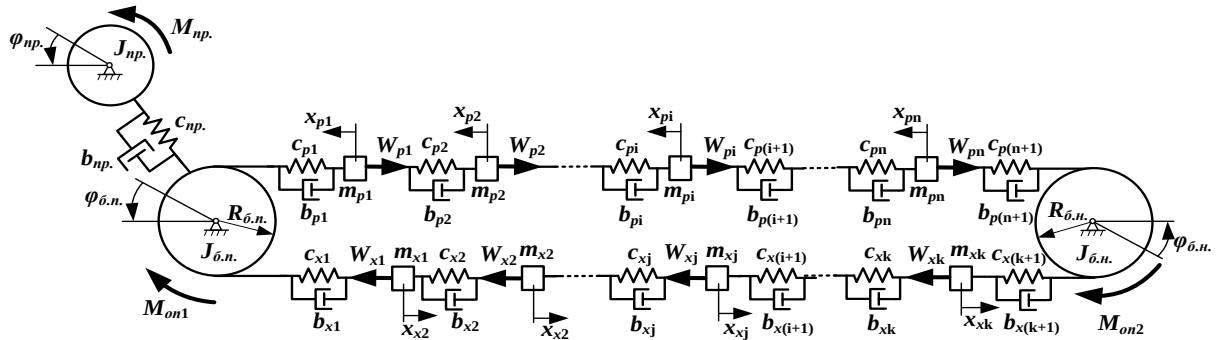


Рис. 2. Динамічна модель стрічкового конвеєра.
Fig. 2. Dynamical model of the belt conveyor.

На рис. 2 використано такі позначення: M_{np} – зведений момент приводу; M_{on1} та M_{on2} – зведені моменти опору приводного та натяжного барабанів відповідно; c_{np} – зведений коефіцієнт крутильної жорсткості приводу; b_{np} – зведений коефіцієнт дисипації приводу; $R_{\delta, np}$ та $R_{\delta, bn}$ – радіуси приводного та натяжного барабанів відповідно; J_{np} , $J_{\delta, np}$, $J_{\delta, bn}$ – зведені моменти інерції приводу, приводного та натяжного барабанів відповідно; m_{pi} – i -та зведена маса робочої гілки транспортера із вантажем; m_{xj} – j -та зведена маса холостої гілки транспортера; n – кількість зведених мас робочої гілки транспортера; k – кількість зведених мас холостої гілки транспортера; c_{pi} та b_{pi} – i -ті зведені коефіцієнти жорсткості та дисипації робочої гілки транспортера відповідно; c_{xj} та b_{xj} – j -ті зведені коефіцієнти жорсткості та дисипації холостої гілки транспортера відповідно; W_{pi} та W_{xj} – i -та та j -та зведені сили тертя від обертання підтримуючих роликів (сили W_{pi} та W_{xj} прикладені не до всіх приведених мас, а лише до тих, які взаємодіють з підтримуючими роликами).

У розрахунках, які виконані нижче, $n=20$, $k=5$. Ці значення забезпечують достатньою точністю розрахунків динамічних і енергетичних показників. Виходячи з динамічної моделі (рис. 2) можна отримати математичну модель руху зведених мас стрічкового конвеєра [7]:

дослідження як динамічних так і енергетичних процесів при роботі конвеєра.

Стрічка у моделі (рис. 2) представлена із використанням кусково-лінійної апроксимації, яка полягає в умовному розбиванні контуру стрічки на деяку кількість ділянок, при цьому в межах кожної з них закон зміни швидкості деформації по довжині передбачається лінійним.

Динамічна модель, що зображена на рис. 2, отримана із врахуванням наступних припущень: конвеєрна траса є прямолінійною з постійним кутом нахилу; трансмісійні вали є абсолютно жорсткими; проковзування стрічки на роликоопорах відсутні; стрічка є пружно-в'язким стрижнем; сили внутрішнього тертя пропорційні швидкості деформації; маси барабанів значно менші розподіленої маси стрічки і вантажу; коефіцієнти опору руху постійні на обох гілках стрічки; швидкості набігання та збігання стрічки на приводному валу однакові.

$$\begin{aligned}
 & M_{np} = \ddot{\varphi}_{np} J_{np} + c_{np}(\varphi_{np} - \varphi_{\delta, np}) + b_{np}(\dot{\varphi}_{np} - \dot{\varphi}_{\delta, np}); \\
 & c_{np}(\varphi_{np} - \varphi_{\delta, np}) + b_{np}(\dot{\varphi}_{np} - \dot{\varphi}_{\delta, np}) = \ddot{\varphi}_{\delta, np} J_{\delta, np} + M_{on1} + \\
 & + c_{p1}(\varphi_{\delta, np} R_{\delta, np} - x_{p1}) + b_{p1}(\dot{\varphi}_{\delta, np} R_{\delta, np} - \dot{x}_{p1}) + c_{x1} \times \\
 & \times (\varphi_{\delta, np} R_{\delta, np} - x_{x1}) + b_{x1}(\dot{\varphi}_{\delta, np} R_{\delta, np} - \dot{x}_{x1}); \\
 & c_{p1}(\varphi_{\delta, np} R_{\delta, np} - x_{p1}) + b_{p1}(\dot{\varphi}_{\delta, np} R_{\delta, np} - \dot{x}_{p1}) = m_{p1} \ddot{x}_{p1} + \\
 & + W_{p1} + c_{p2}(x_{p1} - x_{p2}) + b_{p1}(\dot{x}_{p1} - \dot{x}_{p2}); \\
 & \dots \dots \dots \\
 & c_{pi}(x_{p(i-1)} - x_{pi}) + b_{pi}(\dot{x}_{p(i-1)} - \dot{x}_{pi}) = m_{pi} \ddot{x}_{pi} + W_{pi} + \\
 & + c_{p(i+1)}(x_{pi} - x_{p(i+1)}) + b_{p(i+1)}(\dot{x}_{pi} - \dot{x}_{p(i+1)}); \\
 & \dots \dots \dots \\
 & c_{pn}(x_{p(n-1)} - x_{pn}) + b_{pn}(\dot{x}_{p(n-1)} - \dot{x}_{pn}) = m_{pn} \ddot{x}_{pn} + W_{pn} + \\
 & + c_{p(n+1)}(x_{pn} - \varphi_{\delta, np} R_{\delta, np}) + b_{p(n+1)}(\dot{x}_{pn} - \dot{\varphi}_{\delta, np} R_{\delta, np}); \quad (1) \\
 & R_{\delta, np}(c_{p(n+1)}(x_{pn} - \varphi_{\delta, np} R_{\delta, np}) + b_{p(n+1)}(\dot{x}_{pn} - \dot{\varphi}_{\delta, np} R_{\delta, np})) = \\
 & = c_{x(k+1)}(\varphi_{\delta, np} R_{\delta, np} - x_{x(k+1)}) + b_{x(k+1)}(\dot{\varphi}_{\delta, np} R_{\delta, np} - \dot{x}_{x(k+1)}) + \\
 & + \ddot{\varphi}_{\delta, np} J_{\delta, np} + M_{on2}; \\
 & c_{x(k+1)}(\varphi_{\delta, np} R_{\delta, np} - x_{x(k+1)}) + b_{x(k+1)}(\dot{\varphi}_{\delta, np} R_{\delta, np} - \dot{x}_{x(k+1)}) = \\
 & = W_{xk} + m_{xk} \ddot{x}_{xk} + c_{xk}(x_{xk} - x_{x(k-1)}) + b_{xk}(\dot{x}_{xk} - \dot{x}_{x(k-1)}); \\
 & \dots \dots \dots \\
 & c_{x(j+1)}(x_{x(j+1)} - x_{xj}) + b_{x(j+1)}(\dot{x}_{x(j+1)} - \dot{x}_{xj}) = m_{xj} \ddot{x}_{xj} + W_{xj} + \\
 & + c_{xj}(x_{xj} - x_{x(j-1)}) + b_{xj}(\dot{x}_{xj} - \dot{x}_{x(j-1)}); \\
 & \dots \dots \dots \\
 & c_{x2}(x_{x2} - x_{x1}) + b_{x2}(\dot{x}_{x2} - \dot{x}_{x1}) = m_{x1} \ddot{x}_{x1} + W_{x1} + \\
 & + c_{x1}(x_{x1} - R_{\delta, np} \varphi_{\delta, np}) + b_{x1}(\dot{x}_{x1} - R_{\delta, np} \dot{\varphi}_{\delta, np}).
 \end{aligned}$$

Всі символи, які використані у системі рівнянь (1), вказано на підписуночному підписі рис. 2.

Оскільки у рамках даного дослідження розглядається режим пуску конвеєра, то початкові умови руху відповідають стану спокою, тобто всі узагальнені координати та узагальнені швидкості зведених мас системи є нульовими в момент часу $t=0$.

У подальшому використаємо рівняння (1) для того, щоб моделювати енергетичні та динамічні процеси у транспортуючій машині.

Фактором, який має значний вплив на режим руху стрічкового конвеєра, є рушійне зусилля. Воно моделюється шляхом використання рівнянь асинхронного електродвигуна, що отримує живлення від пристрою плавного пуску. Рівняння руху двигуна приводу конвеєра мають такий вигляд (вони записані у нерухомій системі координат відносно статора) [8, 9]:

$$\begin{cases} \frac{di_{1\alpha}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1} (u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1 + k_r e_{2\alpha}); \\ \frac{di_{1\beta}}{dt} = \frac{1}{\delta L_1} (u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1 - k_r e_{2\beta}); \\ \frac{di_{2\alpha}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2} ((u_{1\alpha} - i_{1\alpha} R_1) k_s + e_{2\alpha}); \\ \frac{di_{2\beta}}{dt} = -\frac{1}{\delta L_2} ((u_{1\beta} - i_{1\beta} R_1) k_s - e_{2\beta}); \\ M_{np} = U \eta \frac{3}{2} p L_{12} (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}), \end{cases} \quad (3)$$

де $i_{1\alpha}$, $i_{1\beta}$ – проекції узагальненого вектора струму статора на нерухомі ортогональні координатні осі α і β ; $i_{2\alpha}$, $i_{2\beta}$ – проекції узагальненого вектора струму ротора на ортогональні координатні осі α і β ; L_1 , L_2 – індуктивності статорної та роторної обмоток; L_{12} – взаємодійність; k_r і k_s – коефіцієнти магнітного зв'язку ротора та статора відповідно ($k_r = L_{12} L_2^{-1}$; $k_s = L_{12} L_1^{-1}$); M – електромагнітний момент двигуна; p – кількість пар полюсів електричної машини; $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ – проекції узагальненого вектора напруги статора на координатні осі α і β ($u_{1\alpha} = U_{\max} \cos(2\pi \int f dt)$, $u_{1\beta} = U_{\max} \sin(2\pi \int f dt)$); $U_{\max}$ – амплітуда фазної напруги живлення двигуна; f – частота напруги живлення двигуна; $e_{2\beta}$, $e_{2\alpha}$ – ЕРС, що індукуються потокозчепленнями ротора по осях α і β відповідно ($e_{2\alpha} = p \omega_{\text{дв}} (L_2 i_{2\beta} + L_{12} i_{1\beta}) + i_{2\alpha} R_2$, $e_{2\beta} = p \omega_{\text{дв}} (L_2 i_{2\alpha} + L_{12} i_{1\alpha}) + i_{2\beta} R_2$); R_1 – активний опір статорної обмотки; R_2 – зведений до статора активний опір роторної обмотки; X_1 – індуктивний опір статорної обмотки; X_2 – зведений до статора індуктивний опір роторної обмотки; δ – коефіцієнт розсіювання ($\delta = 1 - (1 + X_1(2\pi f L_{12})^{-1})(1 + X_2(2\pi f L_{12})^{-1})^{-1}$); $\omega_{\text{дв}}$ – кутова швидкість двигуна; U – загальне передаточне число приводу конвеєра; η – ККД приводу конвеєра.

Математична модель асинхронного електроприводу (3) ґрунтується на наступних загальноприйнятих припущеннях: магнітна система машини не насичена; відсутні втрати в сталі; фазові обмотки машини симетричні і зміщені одна відносно іншої строго на 120° ; магнітні рушійні сили обмоток і магнітні поля розподіляються вздовж повітряного зазору між статором і ротором за синусоїдальним законом; постійна величина повітряного зазору; ротор

машини симетричний; реальна розподілена обмотка замінюється на еквівалентну зосереджену, яка генерує ту саму магнітну рушійну силу.

Як і для початкових умов руху зведених мас моделі стрічкового конвеєра приймаємо, що всі електромагнітні процеси на початку руху електроприводу транспортуючої машини відсутні. Тому всі струми в момент часу $t=0$ рівні нулю.

Оскільки за умовами задачі живлення двигун буде отримувати від пристрою плавного пуску, то напруга живлення двигуна буде змінюватись за наступним законом:

$$U = U_0 + (U_{\text{ном}} - U_0) \frac{t}{t_{\text{розг}}}, \quad (4)$$

де U_0 – початкова напруга живлення двигуна, В; t – час; $t_{\text{розг}}$ – тривалість розгону двигуна (тривалість наростання напруги живлення від U_0 до $U_{\text{ном}}$); $U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга живлення двигуна, В.

Для того, щоб провести аналіз динамічних та енергетичних процесів, що мають місце у елементах конвеєра під час пуску, наведемо оціночні показники та дамо вирази, за якими вони розраховані.

Таблиця 2. Оціночні показники та їх формули.
Table 2. Estimation indicators and their formulas.

Показник		Формула
Клас інтегральних показників		
Середньоквадратичні значення	Приводного моменту, Нм	$\left(\frac{3}{2} \frac{U \eta p L_{12}}{t_{\text{розг}}} \int_0^{t_{\text{розг}}} ((i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}))^2 dt \right)^{\frac{1}{2}}$
	Моменту в муфті, Нм	$\left(t_{\text{розг}}^{-1} \int_0^{t_{\text{розг}}} (c_{np}(\varphi_{np} - \varphi_{\delta.n}) + b_{np}(\dot{\varphi}_{np} - \dot{\varphi}_{\delta.n}))^2 dt \right)^{\frac{1}{2}}$
	Зусилля у стрічці у місці її набігання на приводний барабан, Н	$\left(t_{\text{розг}}^{-1} \int_0^{t_{\text{розг}}} ((c_{p1}(\varphi_{\delta.n} R_{\delta.n} - x_{p1}) + b_{p1}(\dot{\varphi}_{\delta.n} R_{\delta.n} - \dot{x}_{p1}))^2 dt \right)^{\frac{1}{2}}$
Втрати енергії в приводі, Дж		$\frac{3}{2} \left(R_1 \int_0^{t_{\text{розг}}} (i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2) dt + R_2 \int_0^{t_{\text{розг}}} (i_{2\alpha}^2 + i_{2\beta}^2) dt \right)$
Клас термінальних показників		
Максимальні значення	Приводного моменту, Нм	$\max(U \eta \frac{3}{2} p L_{12} (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}))$
	Моменту в муфті, Нм	$\max(c_{np}(\varphi_{np} - \varphi_{\delta.n}) + b_{np}(\dot{\varphi}_{np} - \dot{\varphi}_{\delta.n}))$
	Зусилля у стрічці у місці її набігання на приводний барабан, Н	$\max(c_{p1}(\varphi_{\delta.n} R_{\delta.n} - x_{p1}) + b_{p1}(\dot{\varphi}_{\delta.n} R_{\delta.n} - \dot{x}_{p1}))$
	Потужність конвеєра, Вт	$\max(\frac{3}{2} (U_{1\alpha} i_{1\alpha} + U_{1\beta} i_{1\beta}))$
Струм двигуна, А		$\max(i_{1\alpha}, i_{2\alpha}, i_{1\beta}, i_{2\beta})$

* середньоквадратичне значення.

Фізичний зміст силових середньоквадратичних показників відповідає еквівалентним значенням зусиль (крутних моментів). Вони дають змогу встановити загальний рівень навантаженості елементів стрічкового конвеєра силовими факторами. Максимальні значення силових факторів дають змогу визначити коефіцієнти динамічності окремих елементів. Саме під час дії максимального навантаження найчастіше виникають поломки елементів в той час як середньоквадратичні значення зумовлюють втому матеріалу, з якого виготовлені ті чи інші елементи конвеєра (стрічка, муфта, вал, зубчасті передачі тощо). Середньоквадратичні та максимальні силові показники необхідні для проведення інженерних розрахунків окремих елементів стрічкових конвеєрів. Втрати енергії показують змінні втрати електричної енергії, які виникають у приводі конвеєра під час його пуску. Ці втрати йдуть на нагрів двигуна, тому вони є небажаними.

Показник максимального струму двигуна дає змогу встановити рівень струмових навантажень електрообладнання приводу конвеєра (передусім пристрою плавного пуску), а максимальна потужність вказує пікові перевантаження конвеєра за потужністю. Бажано, щоб обидва ці показники були мінімальними.

Для проведення досліджень було виконано чисельні експерименти, які полягали у багатократному інтегруванні систем диференціальних рівнянь (1) та (2) при різних значеннях U_0 та $t_{розг}$, які входять в вираз (3).

Таким чином, незалежними факторами були тривалість наростання напруги живлення $t_{розг}$ та початкове значення напруги живлення U_0 приводу конвеєра, а відгуками – чисельні значення оціночних показників, які наведені у табл. 2. Зміна $t_{розг}$ виконувалась в межах 0...5 с з кроком 0,5 с, а U_0 – в межах 0...380 В з кроком 20 В.

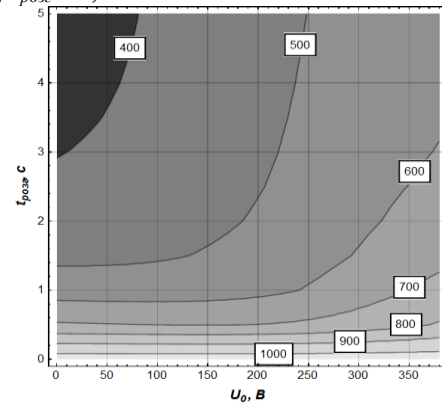
Таким чином, було проведено 220 чисельних експериментів. Всі розрахунки оціночних показників проведені для стрічкового стаціонарного одноопераційного конвеєра КЛ 100-45-4-500-1П (продуктивність машини 100 т/год, швидкість руху стрічки 1,6 м/с, довжина транспортування 45 м).

Для аналізу закономірностей були сформовані масиви даних, які містили значення незалежних факторів та саме значення показника. Їх зручно представити у вигляді контурних графіків (рис. 3).

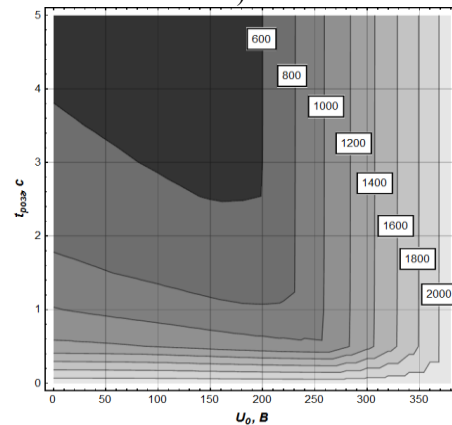
Аналіз графічних залежностей, які представлені на рис. 3, а та б показує загальну тенденцію: збільшення тривалості розгону та зменшення початкової напруги живлення призводить до зменшення середньоквадратичного та максимального значень приводного моменту. Причому характер цих залежностей не однаковий.

Зі збільшенням $t_{розг}$ спочатку відбувається інтенсивне зменшення середньоквадратичного та максимального значень приводного моменту. Вплив фактора U_0 на величину цих показників починає проявлятися лише для $t_{розг} > 1,5$ с. Для зменшення цих небажаних показників необхідно зменшувати початкову напругу живлення. Наприклад, при $t_{розг}=3$ с середньоквадратичне значення моменту приводу при $U_0=0$ у 1,5 раза менше, ніж при $U_0=U_{ном}$. При цьому ж значенні $t_{розг}$ максимальне значення крутного моменту

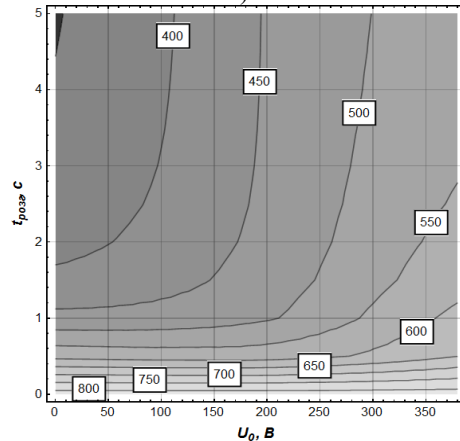
у тричі менше при $U_0=0$, ніж при $U_0=U_{ном}$. Таким чином, для мінімізації приводних моментів необхідно забезпечувати незначну величину U_0 та тривалість розгону $t_{розг} > 1,5$ с.



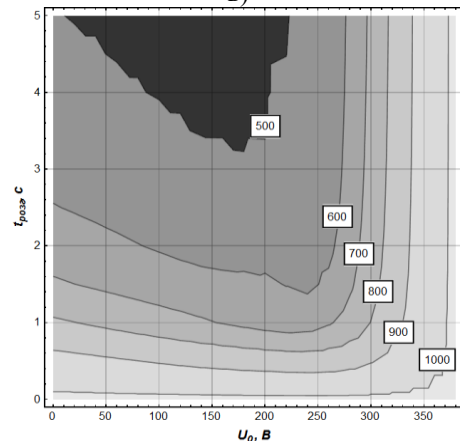
а)



б)



в)



г)

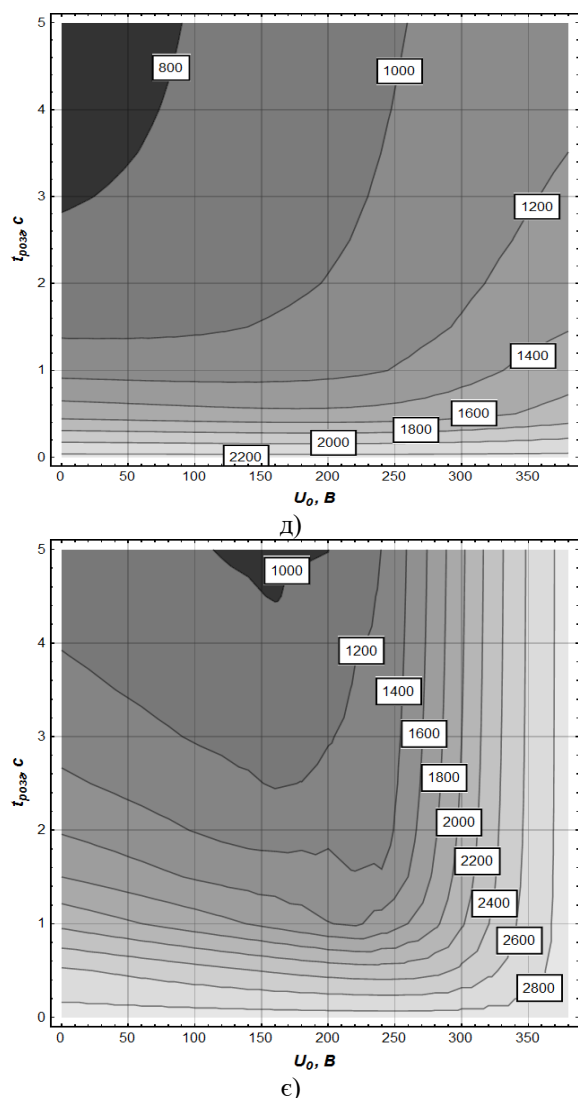


Рис. 3. Графіки оціночних динамічних показників роботи стрічкового конвеєра при пуску від пристрою плавного пуску: а) середньоквадратичне значення приводного моменту; б) максимальне значення приводного моменту; в) середньоквадратичне значення моменту в муфті; г) максимальне значення моменту в муфті; д) середньоквадратичне значення зусилля у стрічці у місці її набігання на приводний барабан; е) максимальне значення зусилля у стрічці у місці її набігання на приводний барабан.

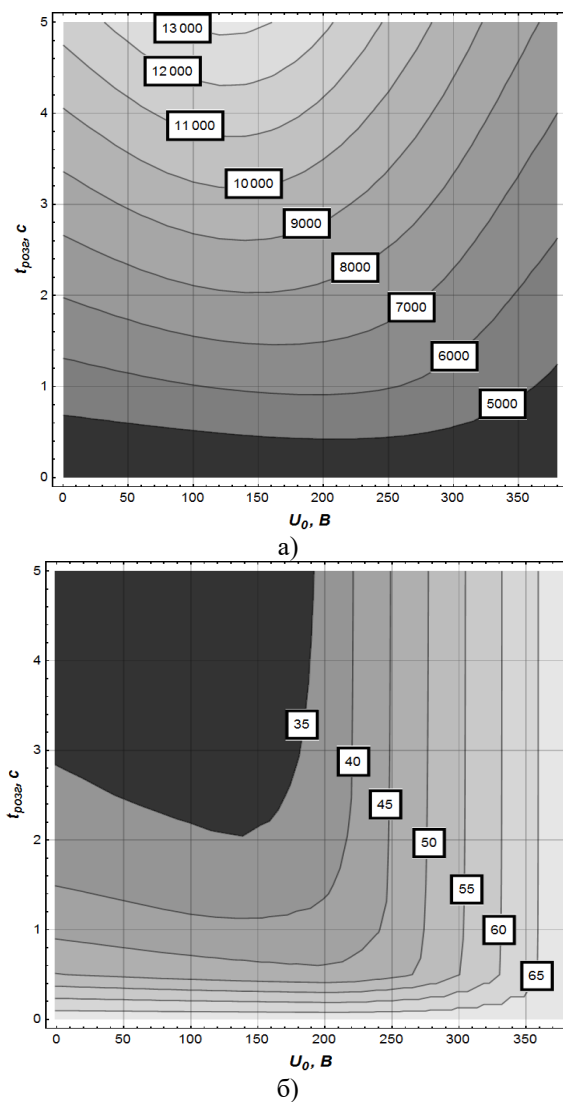
Fig. 3. Plots of estimation dynamical indicators of the belt conveyor during its start-up via softstarter: а) RMS of the driving torque; б) maximal value of the driving torque; в) RMS of the coupling torque; г) maximal value of the coupling torque; д) RMS of the force in the belt in the local area of interaction of the belt and the drum; е) maximal value of the force in the belt in the local area of interaction of the belt and the drum.

Аналіз графічних залежностей, які відповідають крутним моментам у муфті (рис. 3, в, г) показує, що бажано налаштовувати тривалість розгону більшу за одну секунду. Крім того, початкову напругу живлення двигуна необхідно задавати мінімально можливою (ідеальний варіант – нульовою). Це дасть змогу більш ніж в двічі зменшити середньоквадратичне та максимальне значення крутного моменту у муфті.

Аналіз залежності величин зусиль у стрічці (у місці її набігання на барабан) показує наступні закономірності: зростання тривалості розгону з 0 до 1,5 с значно зменшує середньоквадратичне та максимальне значення зусилля (в 1,8 раз – для середньоквадратичної величини і в 1,2 – для максимальної); подальше зростання $t_{розг}$ (більше 1,5 с) зумовлює зменшення цих показників у меншій мірі; збільшення величини U_0 призводить до зростання середньоквадратичного та максимального значень зусилля у стрічці (особливо яскраво ця тенденція проявляється при $U_0 > 220$ В); фактори, при яких досягається мінімум максимального значення зусилля у стрічці ($U_0 = 170$ В та $t_{розг} = 5$ с) не забезпечують мінімум середньоквадратичної величини зусилля, яка досягається при $U_0 = 0$ В та $t_{розг} = 5$ с. Таким чином, раціонально виконувати налаштування $t_{розг} > 1,5$ с з початковою напругою живлення двигуна у діапазоні 0...170 В.

Аналіз енергетичних показників виконаємо за аналогічною методикою. Для цього побудуємо графічні залежності (рис. 4).

З рис. 4, а випливає, що зростання тривалості розгону зумовлює збільшення втрат енергії. Тому при налаштуванні пристрою плавного пуску бажано не встановлювати значних величин $t_{розг}$.



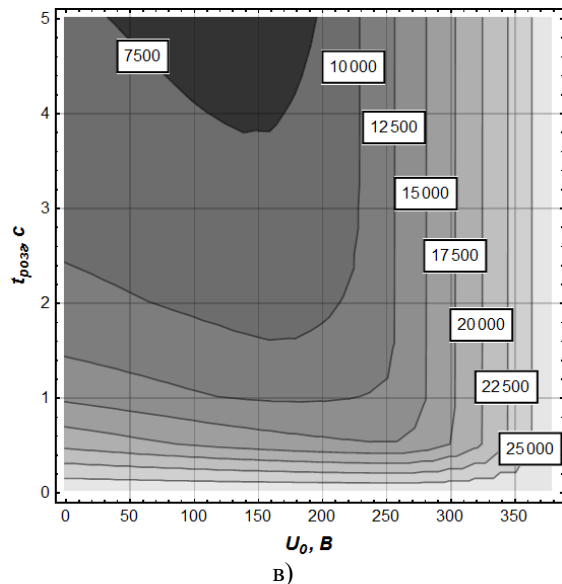


Рис. 4. Графіки оціночних енергетичних показників роботи стрічкового конвеєра при пуску від пристрою плавного пуску: а) втрати енергії в приводі; б) максимальний струм двигуна; в) максимальна потужність двигуна.

Fig. 4. Plots of estimation energy indicators of the belt conveyor during its start-up via softstarter: а) energy losses in the drive; б) maximal current of the drive; в) maximal power of the drive.

Аналіз величин пікових струмів у приводі конвеєра (рис. 4, б) показує тенденцію до зниження цього показника при збільшенні тривалості розгону та зменшенні початкової напруги живлення. Можна рекомендувати виконувати налаштування $t_{розг}$ близько 1 с при мінімальній (бажано нульовій) початковій напрузі живлення приводу конвеєра. Загалом підбором величин $t_{розг}$ та U_0 можна досягнути майже двократного зменшення максимального струму приводу конвеєра. На рекомендованому рівні $t_{розг}=1$ с підбір U_0 забезпечує зменшення пікового струму приводу у 1,5 рази.

Максимальна потужність конвеєра нелінійно залежить від параметрів $t_{розг}$ та U_0 . Для її зменшення необхідно налаштовувати тривалість розгону більшу однієї секунди, а значення початкової напруги живлення вибирати у діапазоні 40...180 В.

Нераціональне налаштування параметрів $t_{розг}$ та U_0 , наприклад, при $t_{розг}=0,5$ с та $U_0=U_{ном}$, зумовлює більш ніж шестикратне перевантаження приводу конвеєра. Звичайно таке перевантаження не триває довго, однак, навіть воно може викликати поломки елементів конвеєра.

Підсумовуючи проведений аналіз за енергетичними та динамічними показниками можна дійти висновку, що тривалість розгону бажано задавати більше 1,5 с, а початкову напругу у діапазоні 0...180 В.

Висновки

1. Для проведення досліджень обрано динамічну та відповідну їй математичну модель руху стрічкового

конвеєра, яка представлена системою диференціальних рівнянь другого порядку. Також обрано модель керованого пристроєм плавного пуску асинхронного приводу конвеєра. Загалом математична модель конвеєра є нелінійною і тому її використання пов'язано з чисельним інтегруванням диференціальних рівнянь.

2. Для встановлення закономірностей впливу тривалості розгону приводу та початкового значення напруги живлення проведено 220 чисельних експериментів в яких визначено 4 інтегральних та 5 термінальних оціночних динамічних та енергетичних показників роботи конвеєра.

3. Аналіз отриманих даних дозволив встановити раціональні налаштування тривалості розгону приводу (більше 1,5 с) та початкового значення напруги живлення приводу конвеєра (0...180 В), при яких небажані енергетичні та динамічні показники є незначними. Наприклад, при $t_{розг}=1,5$ с та $U_0=50$ В середньоквадратичне значення моменту приводу рівне 481 Нм, муфти – 411 Нм, зусилля у стрічці – 948 Н, втрати потужності – 6609 Дж, максимальна потужність – 11457 Вт, максимальний струм двигуна – 38,7 А. Ці дані підтверджують тезу стосовно того, що раціональне налаштування пристрою плавного пуску для приводу стрічкового конвеєра дозволяє підвищити його техніко-експлуатаційні показники.

Список літератури

1. Dongqi L., Hankun Sh., Xuelin W. Research on Energy-saving Process Control Method of Bulk Cargo Terminal Based on Frequency Control Technology. International Conference on New Energy and Sustainable Development. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2020. Vol. 619. 012038. doi: 10.1088/1755-1315/619/1/012038.
2. Ji J., Miao C., Li X. Research on the energy-saving control strategy of a belt conveyor with variable belt speed based on the material flow rate. PLOS ONE. 2020, 15(1), e0227992. doi: 10.1371/journal.pone.0227992.
3. Todorovski M., Mircevski S., Vidanovski D. Possibilities for Reducing Power Losses of Conveyor Belt Electric Drives. 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (Antalya, TURKEY). 2014. P. 1189-1194.
4. Zhang, S., & Xia, X. Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems. Applied Energy. – 2010. Vol. 87. Issue 6. P. 1929-1937. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.01.006.
5. Deutsches Patent- und Markenamt: веб-сайт. URL: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?window=1&space=menu&content=index&action=einsteiger&switchToLang=en> (доступ 23.12.2020).
6. Спеціалізована БД "Винаходи (корисні моделі) в Україні". Результати пошуку: веб-сайт. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=views&searchres&page=1> (доступ 23.12.2020).
7. Ловейкін В. С., Ромасевич Ю. О., Шалатовська К. М. Математичне моделювання динаміки руху стрічкового транспортера. Підійомно-транспортна техніка. 2017. Вип. 2. С. 16-23.

8. Штейнер Р. Т. Математическое моделирование электроприводов переменного тока с полупроводниковыми преобразователями частоты. Екатеринбург. УРО РАН. 2000. 654 с.

9. Loveikin V., Romasevych Y., Shymko L., Ohienko M., Duczmal W., Potwora W., Titova L., Rogovskii I. Agrotechnics and optimal control of cranes and hoisting machines: monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. 2020. 164 p.

References

1. Wang Dongqi L., Hankun Sh., Xuelin W. (2020). Research on Energy-saving Process Control Method of Bulk Cargo Terminal Based on Frequency Control Technology. International Conference on New Energy and Sustainable Development. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 619. 012038. doi: 10.1088/1755-1315/619/1/012038

2. Ji J., Miao C., Li X. (2020). Research on the energy-saving control strategy of a belt conveyor with variable belt speed based on the material flow rate. PLOS ONE. 15(1). e0227992. doi: 10.1371/journal.pone.0227992.

3. Todorovski M., Mircevski S., Vidanovski D. (2014). Possibilities for Reducing Power Losses of Conveyor Belt Electric Drives. 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (Antalya, TURKEY). 1189-1194.

4. Zhang, S., Xia, X. (2010). Optimal control of operation efficiency of belt conveyor systems. Applied Energy. 87(6). 1929-1937. doi: 10.1016/j.apenergy.2010.01.006.

5. Deutsches Patent- und Markenamt. URL: <https://depatisnet.dpma.de/DepatisNet/depatisnet?window=1&space=menu&content=index&action=einsteiger&switchToLang=en> (access 23.12.2020).

6. Specialized database "Inventions (ultimate models) in Ukraine". Results of the search: web-site. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=views&searchres&page=1> (access 23.12.2020).

7. Loveikin V. S., Romasevych Y. O. (2017). Mathematical modeling of belt conveyor movement. Lifting and Conveying Machinery. 2. 16-23.

8. Shteyner R. P. (2000). Mathematical modeling of electric AC drives with semiconductor frequency converters. Ekaterinburg. 654.

9. Loveikin V., Romasevych Y., Shymko L., Ohienko M., Duczmal W., Potwora W., Titova L., Rogovskii I. (2020). Agrotechnics and optimal control of cranes and hoisting machines: monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. 164.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ЛЕНТОЧНЫХ КОНВЕЙЕРОВ ПРИ УПРАВЛЕНИИ ОТ УСТРОЙСТВА ПЛАВНОГО ПУСКА

Ю. А. Ромасевич, В. С. Ловеikin,
Р. А. Кульпин, К. Р. Пундик

Аннотация. В статье развит подход по повышению эксплуатационных показателей работы ленточного конвейера на этапе его запуска. Это достигнуто путем разработки математической модели движения конвейера при управлении от устройства плавного пуска (в работе учтено уравнение динамики движения механической части конвейера и уравнений асинхронного электропривода, который получает питание от устройства плавного пуска). Определены параметры устройства плавного пуска, которые оказывают наибольшее влияние на динамические и энергетические показатели работы конвейера. Путем проведения численных экспериментов получен массив данных, который связывает величины настроек устройства плавного пуска (длительность нарастания напряжения питания и начальное напряжение питания привода) с величинами оценочных динамических и энергетических показателей работы конвейера. Оценочные показатели отражали среднеквадратичные и максимальные величины. Проведенный анализ позволил получить рациональные значения настраиваемых параметров устройства плавного пуска, при которых динамические нагрузки и потери энергии значительно уменьшились.

Ключевые слова: ленточный конвейер, устройство плавного пуска, оптимальные настройки, численные эксперименты.

RESEARCH OF DYNAMIC AND ENERGY PROCESSES OF BELT CONVEYORS UNDER CONTROL WITH SOFT STARTER

Yu. O. Romasevych, V. S. Loveikin, R. A. Kulpin,
K. R. Pundyk

Abstract. In the article an approach to improvement of the belt conveyor performance at the stage of its start-up has been developed. It was achieved by developing a mathematical model of the conveyor movement under control from the soft starter (the work takes into account the equation of the dynamics of the movement of the mechanical part of the conveyor and the equations of the asynchronous electric drive, which is supplied by the soft starter). The parameters of the soft starter have been determined, which have the strong impact on the dynamic and energy performance of the conveyor. By carrying out numerical experiments, a data array was obtained that connects the settings of the soft starter (the duration of the supply voltage rise and the initial drive supply voltage) with the values of the estimated dynamic and energy performance of the conveyor. Estimates reflected RMS and maximum values. The analysis made it possible to obtain rational values of the optional parameters of the soft starter, at which the dynamic loads and energy losses significantly decreased.

Key words: belt conveyor, soft starter, optimal settings, numerical experiments.

Ю. О. Ромасевич ORCID 0000-0001-5069-5929.

В. С. Ловеikin ORCID 0000-0003-4259-3900.

Р. А. Кульпин ORCID 0000-0002-5388-1628.

К. Р. Пундик ORCID 0000-0001-6081-6341.