

УДК 621.3.067

ДОСЛІДЖЕННЯ НА КОМП'ЮТЕРНІЙ МОДЕЛІ ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ СЕРІЇ Lenze 530

І.М. Голодний, канд. техн. наук,

Ю.М. Лаврінченко, канд. техн. наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України;

А.В. Торопов, канд. техн. наук

ТОВ «ЦІТ Альтера»

Наведено комп'ютерну модель електропривода постійного струму з тиристорним перетворювачем напруги Lenze 534 та результати досліджень електромеханічних характеристик замкненої системи електропривода зі зворотними зв'язками.

***Ключові слова:** Перехідний процес, тиристорний перетворювач напруги, зворотний зв'язок, ПІ-регулятор, електромеханічна характеристика, комп'ютерна модель.*

Проблема. Нині в промисловості широко використовується сучасний регульований електропривод на базі силової електроніки. Технічні характеристики, які наводяться в паспортних даних на елементи привода, не завжди дають відповіді про його роботу в перехідних режимах. Для отримання вказаної інформації необхідно проводити дослідження на лабораторних чи випробувальних стендах, що пов'язано зі значними витратами часу та додатковими витратами на їх створення. Значно спростити дослідження перехідних процесів можна з використанням комп'ютерної моделі в системі MatLab електропривода, який складається з двигуна постійного струму незалежного збудження та тиристорного перетворювача напруги серії Lenze 530.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тиристорні перетворювачі напруги (ТПН) німецької фірми Lenze серії 530 (рис. 1) виготовляють у чотирьох модифікаціях з вихідними потужностями від 0,36 до 2,04 кВт і призначені для роботи з двигунами постійного струму незалежного збудження в

І квадранті [1]. Перетворювачі працюють з від'ємним зворотним зв'язком за напругою якоря (IR-компенсація) або за швидкістю за напругою тахогенератора. На лицьовій стороні пристрою розміщені регулятори: I_{\max} — установка максимально допустимого струму навантаження; $I \times R$ — регулятор настроювання зворотного зв'язку за напругою якоря ($I \times R$ -компенсація); n_{\max} , n_{\min} — обмеження максимальної і мінімальної швидкості двигуна; T_i — установка часу перехідного процесу.

Електрична схема приводу з ТПН наведена на рис. 2. Після подачі напруги на ТПН одночасно струм надходить в обмотку



Рис. 1. Зовнішній вигляд тиристорного перетворювача напруги серії 530 фірми Lenze

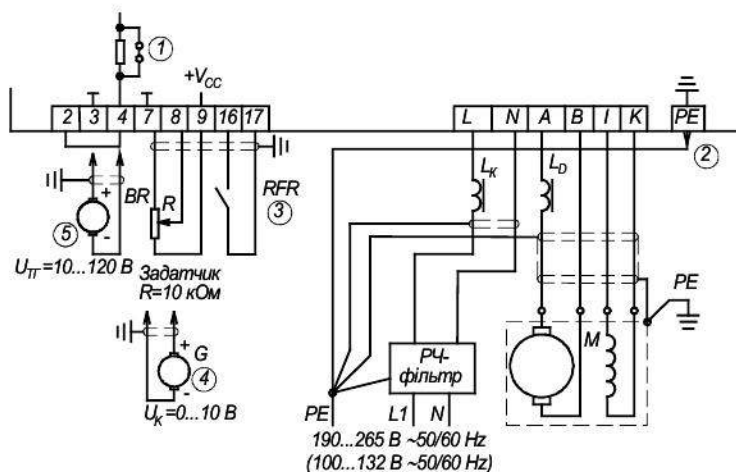


Рис. 2. Принципова електрична схема електропривода постійного струму з перетворювачем напруги серії 530:

1 — перемичка; 2 — роз'єднувач у вигляді лопатки; 3 — вимикач RFR для подачі напруги в коло якоря двигуна; 4 — зовнішнє джерело напруги керування; 5 — тахогенератор

збудження, а для подачі напруги на якір двигуна необхідно ввімкнути вимикач *RFR*. При такому порядку вмикання приводу магнітний потік встановлюється номінальним до початку роботи двигуна. Швидкість регулюється задатчиком, яким може бути потенціометр $R = 10$ кОм або зовнішнє джерело напруги керування $U_k = 0 \dots 10$ В. При використанні від'ємного зворотного зв'язку за швидкістю перемичку між клемми 2-4 знімають, а виводи тахометра *BR* приєднують до клем 3-4.

Структурна схема двоконтурної системи «тиристорний перетворювач напруги — двигун» з від'ємними зворотними зв'язками за струмом і напругою якоря або напругою тахогенератора наведена на рис. 3. Введенням у систему електропривода зворотного зв'язку за струмом досягається обмеження струму і моменту, а за напругою якоря чи тахогенератора — автоматична стабілізація швидкості.

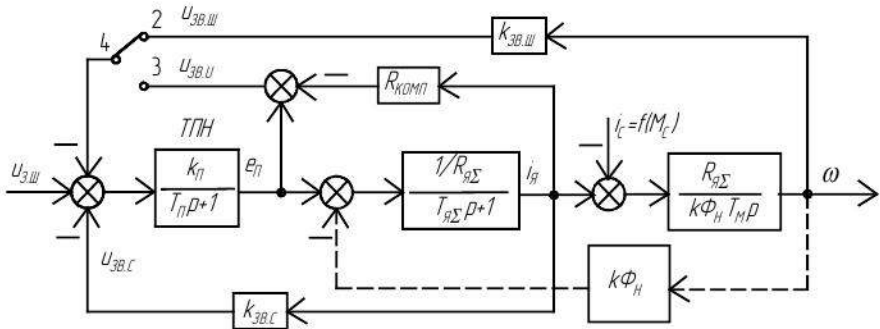


Рис 3. Двоконтурна структурна схема електропривода в системі ТПН-Д з від'ємними зворотними зв'язками за струмом і швидкістю (перемичка 2-4 замкнена) або напругою якоря (перемичка 3-4 замкнена):

$u_{з.ш}$ — задаючий сигнал швидкості; $u_{зв.ш}$, $u_{зв.с}$ — сигнали зворотного зв'язку відповідно за швидкістю та напругою якоря; $u_{зв.с}$ — сигнал зворотного зв'язку за струмом; $R_{комп}$ — компенсаційний опір; $R_{яΣ}$ — сумарний опір якірного кола; ТПН — тиристорний перетворювач напруги; $k_{п}$ — коефіцієнт підсилення ТПН; $k_{Фн}$ — номінальний магнітний потік двигуна; $k_{зв.с}$, $k_{зв.ш}$ — коефіцієнти зворотного зв'язку відповідно за струмом та швидкістю; $T_{п}$, $T_{яΣ}$ — електромагнітні сталі часу ТПН та якірного кола; $T_{м}$ — електромеханічна стала часу; $e_{п}$ — ЕРС тиристорного перетворювача напруги; $i_{я}$, i_c — миттєві значення струму якірного кола та струму, пропорційного статичному опору робочої машини; p — оператор Лапласа

Коефіцієнт зворотного зв'язку за струмом $k_{зв.С}$ можна визначити за максимальною напругою задання швидкості $U_{зш.МАКС}$ і максимальним (пусковим) струмом двигуна:

$$k_{зв.С} = \frac{u_{зш.МАКС}}{\lambda_I I_H}, \quad (1)$$

де λ_I — допустима кратність пускового струму; I_H — номінальний струм електродвигуна.

Стабілізація ЕРС ТПН здійснюється шляхом подачі узгодженого сигналу від'ємного зворотного зв'язку $u_{зв.У} = e_{II} - i_{Я} R_{КОМП}$ на вхід задаючого сигналу швидкості. Змінюючи величину $R_{КОМП}$ змінюють величину коефіцієнта зворотного зв'язку. При збільшенні навантаження напруга на затискачах двигуна знижується за рахунок втрат в якірному колі. В результаті зростає падіння напруги на опорі $R_{КОМП}$ сигнал з якого віднімається від e_{II} і узгоджено подається на вхід $u_{зш}$. Напруга на виході ТРН автоматично збільшується.

Мета дослідження — отримання достовірних характеристик електропривода постійного струму з напівпровідниковим перетворювачем напруги серії Lenze 530 в перехідних процесах на комп'ютерній моделі в системі MatLab при значному скороченні часу і зменшенні матеріальних затрат.

Матеріали та методика досліджень. Аналіз приводних характеристик проводився на основі положень теорії електропривода з використанням комп'ютерної моделі в системі MatLab.

Результати досліджень. Згідно структурної схеми електропривода (рис. 3) можна записати наступні системи рівнянь електромеханічних характеристик з від'ємними зворотними зв'язками за струмом і напругою якоря [2]:

$$\begin{cases} k_{II} [u_{зш} - (e_{II} - i_{Я} R_{КОМП}) - k_{зв.С} i_{Я}] = (T_{II} p + 1) e_{II}, \\ e_{II} - \kappa \Phi_H \omega = R_{Я} (T_{Я\Sigma} p + 1) i_{Я}; \end{cases} \quad (2)$$

за струмом і швидкістю:

$$\begin{cases} k_{II} (u_{зш} - k_{зв.Ш} \omega - k_{зв.С} i_{Я}) = (T_{II} p + 1) e_{II}, \\ e_{II} - \kappa \Phi_H \omega = R_{Я} (T_{Я\Sigma} p + 1) i_{Я}. \end{cases} \quad (3)$$

Після перетворень рівнянь (2) одержимо вирази динамічних електромеханічної і механічної характеристик електропривода:

$$\omega = \frac{k_{II} u_{3,III}}{\kappa \Phi_H [(T_{II} p + 1) + k_{II}]} - \frac{R_{Я} [(T_{II} p + 1) + k_{II}] (T_{Я\Sigma} p + 1) + k_{II} k_{3B.C} - k_{II} R_{КОМП}}{\kappa \Phi_H [(T_{II} p + 1) + k_{II}]} i_{Я}; \quad (4)$$

$$\omega = \frac{k_{II} u_{3,III}}{\kappa \Phi_H [(T_{II} p + 1) + k_{II}]} - \frac{R_{Я} [(T_{II} p + 1) + k_{II}] (T_{Я\Sigma} p + 1) + k_{II} k_{3B.C} - k_{II} R_{КОМП}}{(\kappa \Phi_H)^2 [(T_{II} p + 1) + k_{II}]} m; \quad (5)$$

де m — електромагнітний момент двигуна.

При $p=0$ рівняння (4) і (5) описують статичні електромеханічну і механічну характеристики:

$$\omega = \frac{k_{II} u_{3,III}}{\kappa \Phi_H (k_{II} + 1)} - \frac{R_{Я} (k_{II} + 1) + k_{II} k_{3B.C} - k_{II} R_{КОМП}}{\kappa \Phi_H (k_{II} + 1)} i_{Я}; \quad (6)$$

$$\omega = \frac{k_{II} u_{3,III}}{\kappa \Phi_H (k_{II} + 1)} - \frac{R_{Я} (k_{II} + 1) + k_{II} k_{3B.C} - k_{II} R_{КОМП}}{(\kappa \Phi_H)^2 (k_{II} + 1)} m. \quad (7)$$

Жорсткість механічних характеристик у цій замкненій системі залежить від величини зворотних зв'язків, отже від коефіцієнтів $k_{3B.C}$ і $R_{КОМП}$. Так, при $R_{Я}(k_{II}+1)+k_{II}k_{3B.C} = k_{II}R_{КОМП}$ характеристика має нескінченно велику жорсткість ($\beta=\infty$), а при $R_{Я}(k_{II}+1)+k_{II}k_{3B.C} < k_{II}R_{КОМП}$ — додатну жорсткість ($\beta>0$).

Рівняння статичної механічної характеристики можна отримати також після перетворень системи рівнянь (3).

$$\omega = \frac{k_{II} u_{3,III}}{\kappa \Phi_H (1 + k_{III})} - \frac{R_{Я} + k_{II} k_{3B.C}}{(\kappa \Phi_H)^2 (1 + k_{III})} m, \quad (8)$$

де $k_{III} = \frac{k_{II} k_{3B,III}}{\kappa \Phi_H}$ — коефіцієнт підсилення системи.

Аналіз рівняння (8) показує, що збільшення коефіцієнта від'ємного зворотного зв'язку за швидкістю $k_{3B,III}$ а відповідно і k_{III} , за інших рівних умов призводить до зменшення швидкості ідеального холостого ходу і до збільшення

жорсткості механічних характеристик. При $k_{ш}=\infty$ механічна характеристика стає абсолютно жорсткою.

На основі електричної схеми ТПН були створені моделі в MatLab з від'ємними зворотними зв'язками за напругою якоря (рис. 4, а) та швидкістю (рис. 4, б). В електроприводі використано двигун постійного струму незалежного збудження МИ32 314-02 з каталожними параметрами: $P_H=0,78$ кВт; $U_H=110$ В; $I_H=8,2$ А; $n_H=2500$ об/хв.; $U_{зб}=110$ В; $I_{зб}=0,35$ А; $\eta_H=0,86$; $J=0,053$ кг \times м 2 ; $R_{я}=1,8$ Ом; $L_{я}=0,021$ Гн; $G=38$ кг.

Розрахункові величини для моделі: $T_H=0,01$ с; $T_{я}=L_{я}/R_{я}=0,021/1,8\approx 0,02$ с; $R_H=U_H/I_H=110/8,2=13,4$ Ом; $R_{я}^*=R_{я}/R_H=1,8/13,4=0,134$; $\omega_H=\pi n_H/30=3,14\cdot 2500/30=262$ рад/с; $T_M=J R_{я} \omega_H^2 / P_H^2=0,053\cdot 1,8\cdot 262^2\cdot 8,2^2/780^2=0,72$ с; $I_{к.з}=U_H/R_{я}=110/1,8=61$ А; $k\Phi_H=(U_H-I_H R_{я})/\omega_H=(110-8,2\cdot 1,8)/262=0,36$ В \cdot с/рад; $k_I=I_{к.з}/I_H=61/8,2=7,4$; $k_I T_M=7,4\cdot 0,72=5,33$ с.

У переліку розрахункових величин використано позначення: $T_{ш}$, $T_{я}$ — електромагнітні сталі часу ТПН та якірного кола; $L_{я}$, $R_{я}$ — індуктивність та активний опір обмотки якоря; $R_{я}^*$ — активний опір якоря у відносних одиницях; ω_H — номінальна швидкість обертання якоря двигуна; T_M — електромеханічна стала часу; ω_0 — швидкість ідеального холостого ходу; $I_{к.з}$ — струм короткого замикання; k — конструктивний коефіцієнт; Φ_H — номінальний магнітний потік; k_I — кратність струму короткого замикання.

Вхідні параметри моделі задаються у відносних одиницях. Для переведення їх з відносних одиниць в іменовані необхідно перемножити отримані результати на відповідні базові величини U_H , I_H , R_H та ω_0 .

У наведеній моделі (рис. 4, а) блок Transfer Fcn моделює ланку якоря двигуна з $T_{я}=0,02$ с та коефіцієнт підсилення $1/R_{я}^*$, а блок Transfer Fcn1 — ланку тиристорного перетворювача напруги з $T_H=0,01$ с. Блоки Integrator і підсилювач Gain з коефіцієнтом підсилення $K=1/k_I T_M$ реалізують рівняння руху електропривода. Струм навантаження формується блоками Step1, Gain2 з коефіцієнтом підсилення $K_2=0,7$ та Integrator1 як інтеграл від постійного сигналу.

Для досягнення високої точності регулювання швидкості виникла необхідність одночасного регулювання струму (моменту). При цьому використана система підпорядкованого керування з певними стандартними настройками.

Основою першого контуру є ПІ-регулятор і ланки ТПН та якоря двигуна, які охоплені від'ємним зворотним зв'язком за струмом якоря. Зазвичай регулятор

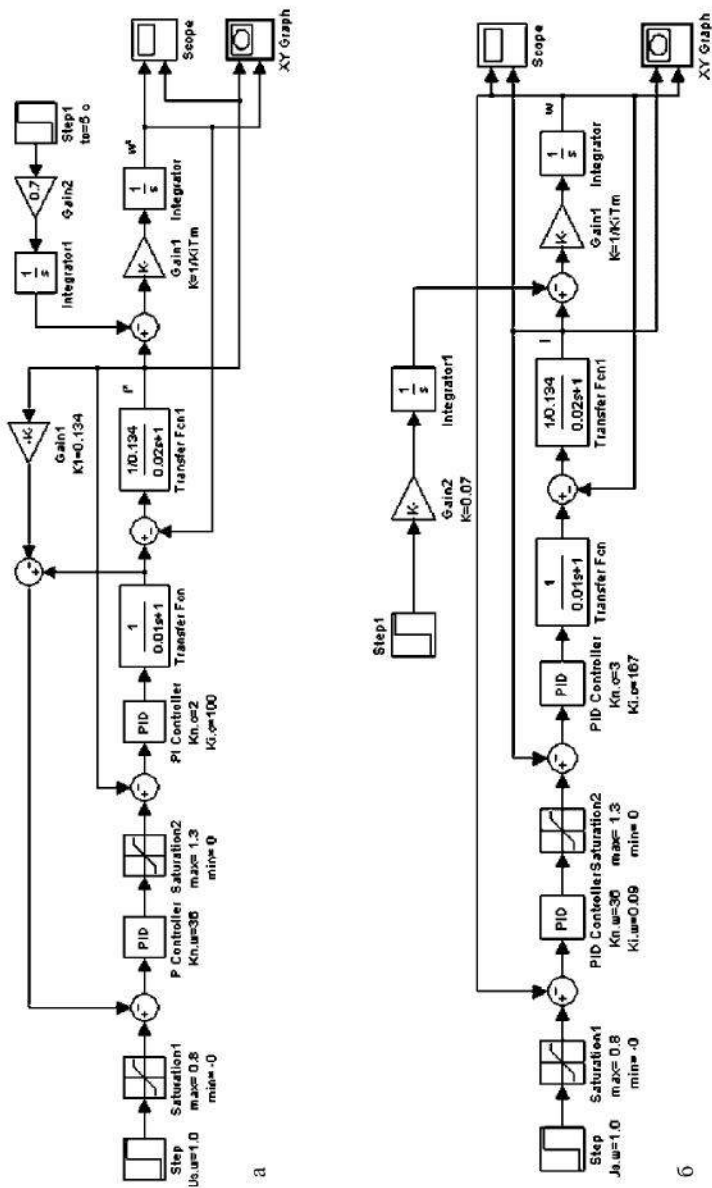


Рис. 4. Комп'ютерна модель електропривода постійного струму з від'ємними зворотними зв'язками за струмом і напругою якоря (а) та за швидкістю (б)

струму налаштовують на технічний оптимум. При цьому згідно теорії автоматичного керування [3, 4] необхідно, щоб передаточна функція регулятора мала вигляд:

$$W_{p.c}(p) = \frac{T_{я\sigma} p + 1}{T_{II} p}. \quad (9)$$

Згідно (9) коефіцієнти підсилення регулятора струму мають значення:

- коефіцієнт інтегрального підсилення

$$k_{i.c} = 1/T_{II} = 1/0,01 = 100;$$

- коефіцієнт пропорційного підсилення

$$k_{p.c} = T_{я\sigma}/T_{II} = 0,02/0,01 = 2.$$

Другий контур з від'ємним зворотним зв'язком за напругою якоря налаштований також на технічний оптимум і має пропорційний П-регулятор. Коефіцієнти визначено за передаточною функцією регулятора швидкості [3, 4]:

$$W_{p.ш}(p) = \frac{T_M}{2T_{II}}. \quad (10)$$

Згідно (10) коефіцієнт підсилення регулятора швидкості:

$$k_{п.ш} = 0,72/(2 \cdot 0,01) = 36.$$

За допомогою регулятора T_i , який встановлений на лицевій панелі ТРН (див. рис. 1), можна змінювати коефіцієнт підсилення П-регулятора швидкості, що дає можливість змінювати час перехідного процесу.

Керування моделлю здійснює блок Step, який задає напругу на виході ТРН. Модель має два обмежувальних блоки Saturation. Saturation1 призначений для обмеження максимальної n_{MAX} і мінімальної n_{MIN} швидкості, Saturation2 — для обмеження максимального струму I_{MAX} . Для візуалізації електромеханічної (механічної) характеристики використано блок XYGraph, а на осцилографі Scope можна спостерігати за зміною швидкості та струму якоря в часі.

Результати моделювання роботи електропривода наведено на рис. 5 та 6.

Процес роботи двигуна змодельований наступним чином. Запуск відбувається без навантаження (рис. 5), а через 5 с починає плавно зростати навантаження. Згідно з завданням встановлено обмеження: швидкості до $0,8\omega_0$, а максимального струму — $1,3I_H$. Встановлені граничні значення модель точно

відслідковує, що видно з рис. 6. На початку пуску, коли різниця між заданим та дійсним значеннями швидкості є досить великою, регулятор швидкості переходить у режим «насичення». При цьому сигнал завдання за струмом є сталим і в системі працює тільки контур регулювання струму якоря. Завдяки ПІ-регулятору

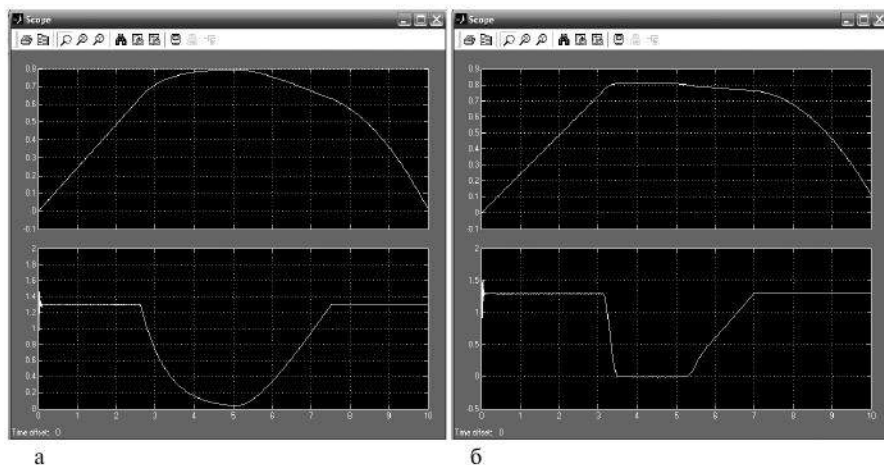


Рис. 5. Графіки миттєвих значень швидкості (верхній) та струму (нижній):
а — $R_{\text{КОМП}} = 0,034$ в.о.; б — $R_{\text{КОМП}} = 0,134$ в.о.

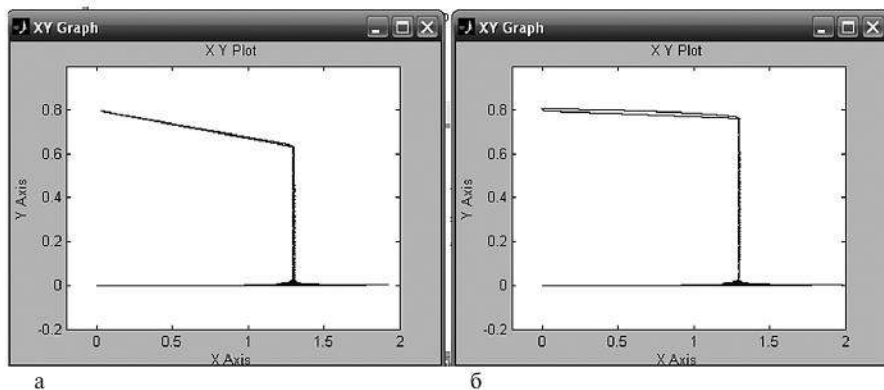


Рис. 6. Електромеханічні характеристики електропривода:
а — $R_{\text{КОМП}} = 0,034$ в.о.; б — $R_{\text{КОМП}} = 0,134$ в.о.

значення струму залишається незмінним, а швидкість лінійно зростає (рис. 6). Коли П-регулятор швидкості (напруги) виходить з «насичення», система керування фактично стає двоконтурною: із внутрішнім контуром регулювання струму та зовнішнім контуром регулювання напруги. При цьому жорсткість характеристик підвищується, але вони не стають абсолютно жорсткими через наявність П-регулятора швидкості. Пусковий струм спадає, а система стабілізує швидкість на заданому рівні. Коли навантаження на двигун стає більшим його максимального моменту, швидкість двигуна зменшується і система знову переходить у режим стабілізації струму.

Пояснити отримані електромеханічні характеристики (рис. 6) можна так. При пуску двигуна відбувається незначне коливання пускового струму, потім він утримується на максимально допустимому рівні, а швидкість двигуна збільшується. Коли струм стає меншим максимального, швидкість лінійно збільшується до максимально допустимої $0,8w_0$. При збільшенні навантаження відбувається зворотний процес. На рис. 6, б добре видно вплив динамічного моменту при розгоні двигуна (верхня крива електромеханічної характеристики).

Моделювання проведено при двох значеннях коефіцієнтів зворотного зв'язку за напругою якоря, який визначається опором $R_{\text{КОМП}}$ (коефіцієнт компенсації). Як видно з рис. 6, жорсткість електромеханічної характеристики збільшується при збільшенні коефіцієнтів зворотного зв'язку, що підтверджує раніше подані теоретичні викладки. Коефіцієнт компенсації в електроприводі серії Lenze 530 устанавлюється регулятором «I×R».

На рис. 7 наведено електромеханічну характеристику, досліджену на лабораторній установці. Аналіз графіків підтверджує адекватність результатів, отриманих на моделі і реальній установці.

На рис. 8, б показано графіки, одержані на моделі тільки з контуром, який моделює від'ємний зворотний зв'язок

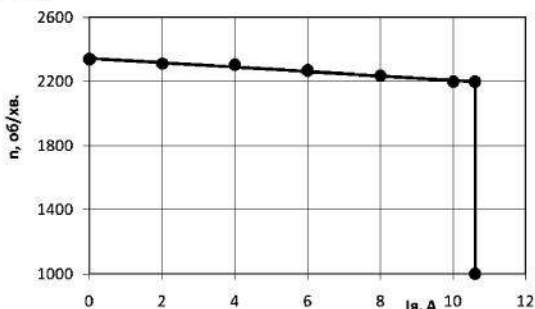


Рис. 7. Електромеханічна характеристика, досліджена на лабораторній установці ($R_{\text{КОМП}}=0,134 \text{ в.о.}$)

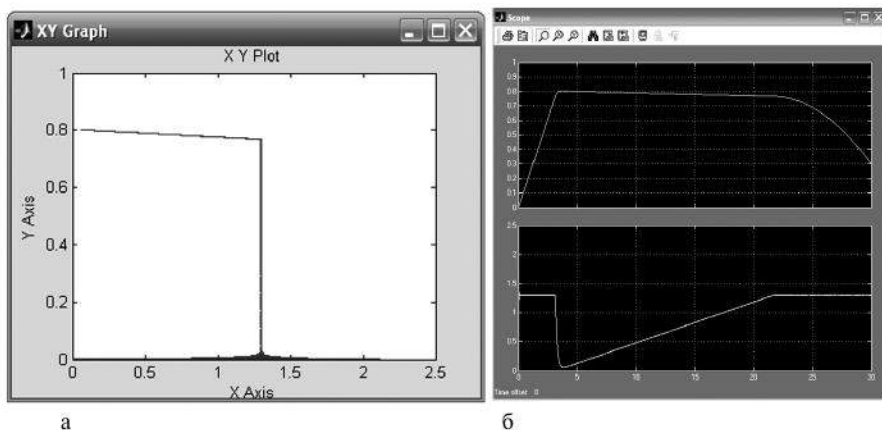


Рис. 8. Результати досліджень роботи електропривода на моделі в MatLab: а — електромеханічна характеристика; б — графіки миттєвих значень швидкості (верхній) та струму (нижній)

за швидкістю. Контур має також пропорційний П-регулятор з коефіцієнтами підсилення $k_{п.ш} = 36$. У вибраних регуляторах контур струму налаштовано на технічний оптимум, а контур швидкості — на симетричний.

Процес моделювання аналогічний попередньому. Згідно з завданням встановлено обмеження швидкості до $0,8\omega_0$, а максимального струму — на рівні $1,3I_H$. Встановлені граничні значення модель точно відслідковує, що видно з отриманої електромеханічної характеристики (рис. 8, а).

На рис. 9 наведено електромеханічну характеристику, яка досліджена на лабораторній установці. Аналіз графіків підтверджує адекватність результатів, отриманих на моделі і реальній установці.

Висновки. Створена комп'ютерна модель в MatLab електропривода з ТПН серії Lenze 530, в якій передбачено

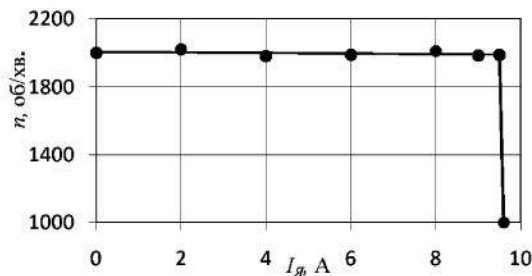


Рис. 9. Електромеханічна характеристика, досліджена на лабораторній установці

обмеження максимальної і мінімальної швидкостей та максимального струму, стабілізацію заданої швидкості, регулювання часу перехідного процесу.

Аналіз результатів досліджень підтвердив адекватність змодельованих перехідних процесів в електроприводі з реальними.

Бібліографія

1. Инструкция по эксплуатации электропривода постоянного тока серии Lenze 530: [Электронный ресурс]. — Режим доступа http://www.lenze.org.ua/pdf/530_Speed_controllers_1202_EN.pdf.
2. Регульований електропривод. Теорія. Моделювання: [підруч. для студ. вищ. навч. закладів] / [І.М. Голодний, Ю.М. Лавріненко, М.В. Синявський та ін.]; за ред. І.М. Голодного. — К.: Аграр Медіа Груп, 2011. — 513 с.

ИССЛЕДОВАНИЕ НА КОМПЬЮТЕРНОЙ МОДЕЛИ ЭЛЕКТРОПРИВОДА ПОСТОЯННОГО ТОКА СЕРИИ Lenze 530

Приведена комп'ютерна модель електропривода постійного тока с тиристорным преобразователем напряжения Lenze 530 и результаты исследований электромеханических характеристик замкнутой системы электропривода с обратными связями.

Ключевые слова: *переходный процесс, тиристорный преобразователь напряжения, обратная связь, ПИ-регулятор, электромеханическая характеристика, компьютерная модель.*

STUDY ON COMPUTER MODELS DC DRIVE Lenze 530 SERIES

Computer model DC drive thyristor voltage converter Lenze 530 shows and studies electromechanical characteristics of a closed system with electric feedback.

Key words: *transition process, thyristor voltage converter, feedback, PI-controller, electromechanical characteristics, the computer model.*