

УДК 621.865.8+681.5

В.Ф. Семенюк, д-р техн. наук, проф.,
В.П. Яглінський, д-р техн. наук, проф.,
О.А. Андрущенко, д-р техн. наук, проф.,
В.В. Вовк, інженер,
Одес. нац. політехн. ун-т

ВПЛИВ ОБМЕЖЕНЬ ШВИДКОСТІ, ПРИШВИДШЕННЯ І РИВКА НА ТОЧНІСТЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРОМИСЛОВИМ РОБОТОМ

В.Ф. Семенюк, В.П. Яглінський, О.А. Андрущенко, В.В. Вовк. **Вплив обмежень швидкості, пришвидшення і ривка на точність системи керування промисловим роботом.** Розроблена імітаційна *Simulink*-модель промислового робота агрегатної побудови з трьох контурною системою регулювання координат. Розглянуті випадки подання на систему стрибкоподібного сигналу на пересування робота та сигналів, сформованих у часі із урахуванням обмежень на швидкість, пришвидшення і ривок. Необхідну точність відтворення завдання руху досягнуто підбором оптимального кроку інтегрування, або введенням змінного кроку інтегрування, при котрому фронти імпульсу ривку співпадають у часі із кроком інтегрування.

Ключові слова: імітаційна модель, виконавча механічна система, електропривод.

В.Ф. Семенюк, В.П. Яглінський, О.А. Андрущенко, В.В. Вовк. **Влияние ограничений скорости, ускорения и рывка на точность системы управления промышленным роботом.** Разработана имитационная *Simulink*-модель промышленного робота агрегатного построения из трехконтурной системой регулирования координат. Рассмотрены случаи подачи на систему скачкообразного сигнала на передвижение робота и сигналов, сформированных во времени с учетом ограничений на скорость, ускорение и рывок. Необходимую точность воспроизведения задания движения достигнуто подбором оптимального шага интегрирования, или введением переменного шага интегрирования, при котором фронт импульса рывка совпадает по времени с шагом интегрирования.

Ключевые слова: имитационная модель, исполнительная механическая система, электропривод.

V.F. Semeniuk, V.P. Yaglinsky, O.A. Andryushchenko, V.V. Vovk. **Effect of speed limits, acceleration and jerk on the accuracy of the control system of industrial robots.** Developed simulation *Simulink*-model of industrial robot modular construction of three circuits control system coordinates. We consider the cases of the system hopping signal to move the robot and signals formed in time with the limitations on speed, acceleration, and jerk. Required accuracy of motion tasks accomplished by selecting optimal integration step, or the introduction of variable integration step, in which the front of the pulse breakthrough coincides with the integration step.

Keywords: simulation model, executive mechanical system, drive.

На функціонування промислового робота і його динамічні параметри суттєво впливає подання на систему управління стрибкоподібного сигналу на пересування а також сигналів, сформованих у часі із урахуванням обмежень на швидкість, прискорення і ривок. Більше ніж 70 % промислових роботів використовують дискретно-позиційні системи керування, відомі моделі яких не враховують вплив вказаних обмежень [1]. Крім того, динаміка механічної виконавчої системи при одночасному відпрацюванні двигунами завдань здійснює вплив на роботу автоматизованого електроприводу робота, тому введення обмежень на ривок дає можливість зменшити динамічні навантаження і є актуально необхідним перспективним напрямом дослідження.

На основі математичних моделей механічної частини робота, електроприводів і системи керування розроблено програмні модулі функціонування системи керування промислового

дволанкового робота типу *SCARA* [1, 2]. Для верифікації розроблених авторами раніше програмних модулів наявним діючим системам керування у складі промислових роботів створено відповідну імітаційну модель системи керування засобами проблемно-орієнтованого програмного комплексу *Simulink* у складі *MATLAB* (рис. 1). Рух ланок роботи забезпечено високомоментними двигунами постійного струму із незалежним збудженням. Система регулювання координат — трьохконтурна.

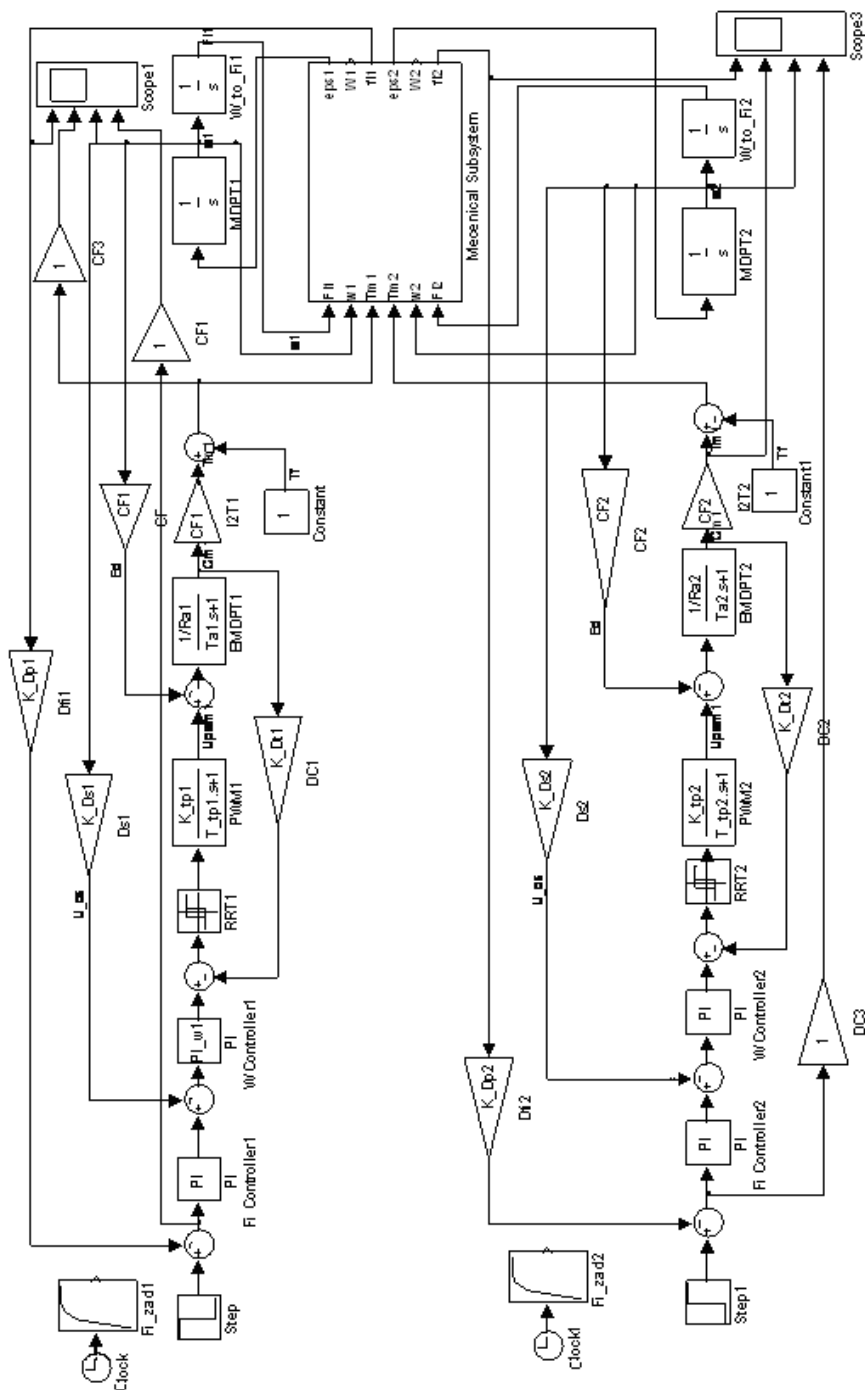


Рис. 1. Імітаційна *Simulink*-модель електроприводів і системи керування дволанкового робота

Внутрішній контур регулювання струму містить релейний регулятор струму, силовий перетворювач напруги постійного струму і контур якорю двигуна постійного струму незалежного збудження, охоплені зворотним зв'язком із датчиком струму якоря. Контур струму підпорядкований контуру регулювання швидкості регулятором швидкості із зворотним зв'язком у вигляді датчика швидкості. Зовнішній контур — контур регулювання переміщення містить регулятор переміщення і датчик переміщення. Регулятори переміщення і швидкості розраховані як пропорційно-інтегровальні регулятори. Пришвидження послідовно інтегруються у інтеграторах для отримання швидкості і кутового переміщення.

Механічна частина роботи представлена у вигляді підсистеми *Mechanical Subsystem*. В моделі механічної частини відтворюються залежності і взаємний вплив одна на одну рухів ланок роботи, а також біжучі зміни параметрів механічної частини – моментів інерції і маси вантажу. На входи моделі подаються координати, які описують стан електроприводів ланок: моменти на валах електродвигунів, їх швидкість і кутовий шлях. На виходах моделі маємо координати, які описують кінематичний стан руху ланок роботи: кутові прискорення, швидкості і пересування. Координати електроприводів і механічної частини зв'язані між собою відповідними математичними залежностями [2]. Завдяки тому, що до моделі механічної частини подаються біжучі координати електроприводів (кутовий шлях і всі необхідні похідні), диференціальні рівняння руху механічної частини вирішуються як алгебраїчні. Блоки завдання руху формують на виході розгорнутий у часі сигнал на пересування. Залежно від заданого пересування і обмежень визначається форма циклограми графіка швидкості і інтервали часу, на яких діють імпульси пришвидшень та ривків. В моделі це виглядає як подача стрибків пришвидшення або ривку від блоків *Step* на загальний суматор з подальшим інтегруванням. Задане пересування в 1 рад відповідає трикутній формі графіку швидкості. При обмеженні тільки пришвидшення маємо дві його ділянки. При обмеженнях пришвидшення і ривку (кут повороту: $\varphi_3 = \pi$; кутова швидкість: $\omega_m = 6 \text{ c}^{-1}$; кутове пришвидження: $\varepsilon_m = 40 \text{ c}^{-2}$; ривок: $\rho_m = 500 \text{ c}^{-3}$) діаграма руху містить 6 ділянок (рис. 2).

Позиційне керування ланками роботи підпорядковане кінцевій меті — переміщення

об'єкта маніпулювання від початкового положення до заданого кінцевого положення. При цьому порядок відпрацювання завдання окремими ланками і траєкторії їх руху можуть бути довільними, або відповідати деякій стратегії.

У простішому випадку формуються стрибкоподібні завдання всім ланкам і всі вони стартують одночасно, а закінчують рух кожна окремо, після виконання завдання. Тут досягаються максимальні швидкодія і продуктивність, але вадою є екстремальні навантаження механічної і електричної частин роботи, оскільки електроприводи працюють із обмеженнями струмів і моментів, а отже пришвидшень, встановленими в системі керування на максимальному рівні. При одночасному старті динамічні навантаження збільшуються також завдяки взаємному впливу ланок. Все

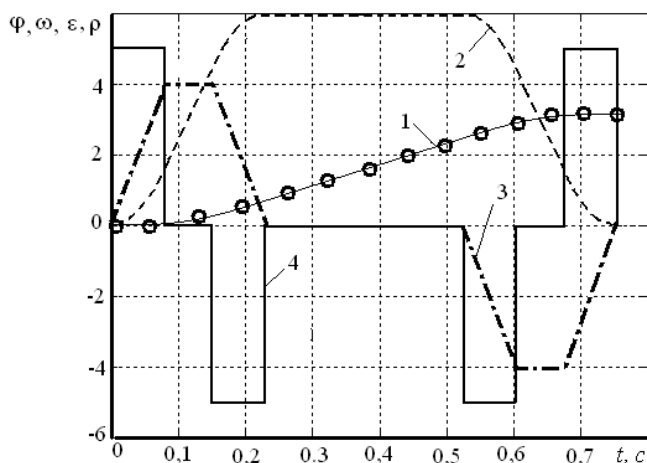


Рис. 2. Діаграма руху із обмеженням швидкості, пришвидшення і ривку, випадок "Великого" переміщення, або умовно трапецеїдальна форма графіку швидкості:
1 — кут повороту φ , рад, 2 — кутова швидкість ω , c^{-1} ,
3 — кутове пришвидження $\varepsilon/10$, c^{-2} , 4 — ривок $\rho/100$, c^{-3}

це може вплинути на виникнення неприпустимих коливань і збільшення часу позиціонування до повного їх затухання. Максимальні динамічні навантаження можуть бути також неприпустимими для об'єкту маніпулювання [3].

Для зменшення цих негативних явищ стартування окремих ланок розподіляють у часі. Першою починає рух ланка із найбільшим завданням на пересування. Наступна ланка стартує після закінчення розгону першої і так далі. Така стратегія незначно впливає на продуктивність роботи, оскільки графіки руху більшості ланок опиняються "вкладеними" у графік руху ланки із найбільшим переміщенням.

Більш кращих, чітко прогнозованих результатів у зменшенні динамічних навантажень можна досягти при формуванні діаграми руху із заданими обмеженнями пришвидшень. При досить жорстких обмеженнях на умови переміщення делікатних вантажів (невисока міцність деталі, пересування рідин) діаграма руху формується із обмеженнями не тільки пришвидшення, але і його похідної, так званого ривку. Такі діаграми руху розглядаються як оптимальні із критеріїв обмеження динамічних навантажень в ланках і механічних передачах, або із комфортності руху для делікатних об'єктів [3].

Вищою похідною для діаграми є ривок ρ . Розрахунки полягають в інтегруванні цього ривку і зниженні ступені похідної до прискорення ε , швидкості ω і пересування φ .

Часткові випадки. При менших значеннях завдання на пересування можливі ще два види діаграм. Умовно «Середнє» пересування, коли швидкість не досягає обмеження, але прискорення досягає обмеження і є ділянка руху із усталеним прискоренням. Умовно «Мале» пересування, коли прискорення не досягає максимуму. В обох випадках форма графіку швидкості відповідає трикутнику і цим графікам можна також привласнити найменування "Великий трикутник" і "Малий трикутник". На рис. 3 наведена діаграма руху, як граничний варіант між "Великим трикутником" і "Малим трикутником", для наступних обмежень: кут повороту — $\varphi_3=0,5128$ рад; кутова швидкість — $\omega_m=6$ с⁻¹; кутове пришвидшення — $\varepsilon_m=40$ с⁻²; ривок — $\rho_m=500$ с⁻³.

Визначення форми графіку можна зробити за такими виразами:

— якщо на ділянках $\varphi_3 > 2(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)$, то форма діаграми швидкості трапецеїдальна, або "Велике" пересування;

— якщо умова $2(\varphi_1 + \varphi_3) < \varphi_3 \leq 2(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3)$, то діаграми швидкості має форму "Великого трикутника", або "Середнє" переміщення;

— якщо $\varphi_3 \leq 2(\varphi_1 + \varphi_3)$, то діаграми швидкості має форму "Малого трикутника", або "Мале" переміщення.

В останньому випадку відсутня ділянка руху із максимальним прискоренням, а задане пересування досягається за рахунок зменшення часу дії ривку. при збереженні його максимального значення.

Відтворення діаграм руху можливе при використанні наведених аналітичних залежностей, або методами числового інтегрування заданої найвищої похідної. Останній метод і його комп'ютерне моделювання більш прості в реалізації, але можуть вести до значних похибок. У відповідності до методу виконується числове інтегрування вищої похідної на інтервалах часу. які розраховуються в залежності від завдання на пересування, заданих обмежень і виду діаграми. Наприклад при простому методі Ейлера при нульових початкових умовах в заданому циклі розрахунків

$$\varepsilon = \varepsilon + \rho_i \cdot \Delta t; \quad \omega = \omega + \varepsilon \cdot \Delta t; \quad \varphi = \varphi + \omega \cdot \Delta t.$$

Окрім похибки за амплітудою, треба враховувати похибку за фазою, яка виникає на кожному ступені інтегрування. При цикловому управлінні ланками роботу, коли кожна координата відпрацьовує свою координату окремо, такі похибки за фазою не мають суттєвого значення. При контурному управлінні, коли всі ланки виконують єдине завдання, похибка за фазою окремих координат може привести до значних похибок у відтворенні заданої траєкторії.

Більш значні похибки виникають через розбіжність у часі передніх і задніх фронтів імпульсу ривку і початку і кінця біжучої ділянки інтегрування. Необхідну точність відтворення

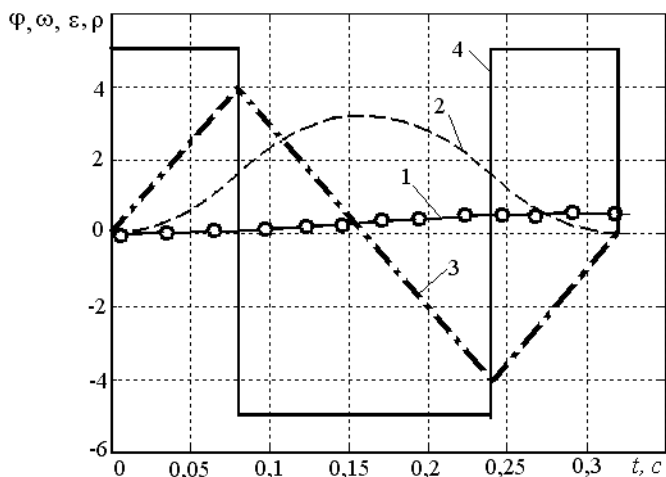


Рис. 3. Діаграма руху з обмеженням швидкості, пришвидшення і ривку, випадок трикутної форми циклограми швидкості: 1 — кут повороту φ , рад, 2 — кутова швидкість ω , s^{-1} , 3 — кутове пришвидшення $\varepsilon/10$, s^{-2} , 4 — ривок $\rho/100$, s^{-3}

завдання досягають підбором оптимального кроку інтегрування, або введенням змінного кроку інтегрування, при котрому fronti імпульсу ривку співпадають у часі із кроком інтегрування.

В системі керування встановлені обмеження у вигляді рівня насичення регуляторів пересування и швидкості, відповідно номінальна швидкість двигунів 209,4 рад/с та максимально припустимий струм 122,16 А для двигуна першої ланки і 108,6 А для двигуна другої ланки. Максимальні прискорення і ривки отримуємо експериментально (таблиця).

Отримані величини прискорень і ривків набагато перевищують ті, що рекомендовані в технічному завданні, а саме прискорення 22 рад/с² і ривок до 3600 рад/с³ на валу ланки (або в середньому 700 рад/с² і 110000 рад/с³) на валу двигунів.

Кінематичні параметри руху ланок роботу при екстремальних режимах роботи системи електроприводу

№	Параметр	На валу двигуна		На валу ланки	
		1-ї ланки	2-ї ланки	1-а ланка	2-га ланка
1	Максимальна швидкість, s^{-1}	209,4	209,4	6,54	9,6
2	Максимальне пришвидшення, s^{-2}	5900	9500	180	430
3	Максимальний ривок, s^{-3}	980000	1500000	30700	72600

Одним із способів зменшення прискорення є зменшення рівня насичення у регуляторах швидкості, з тим, щоб обмежити динамічну складову струму і моменту. Але це не універсальна рекомендація, оскільки ступінь обмеження залежать від умов роботи, які можуть змінюватися, наприклад наявність, або відсутність вантажу. Існує також проблема початку і закінчення гальмування. Більш універсальним засобом зменшення прискорення або прискорення та ривку є перехід від завдання стрибкоподібного сигналу до його розгорнутого у часі виду $\varphi(t)$. Розглянемо цю можливість на прикладі одної — першої ланки (рис. 4).

Досліджено математичні моделі режимів роботи системи керування роботом при відтворенні заданого переміщення в системі, спроектованій для умов дискретно-позиційного керування. Розглянуто випадки подання на систему стрибкоподібного сигналу на переміщення і сигналів, сформованих у часі із урахуванням обмежень на швидкість, пришвидшення і ривок.

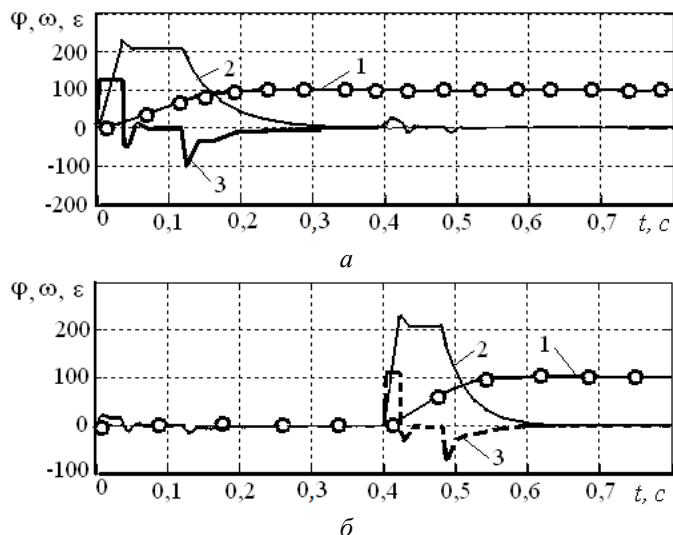


Рис. 4. Осцилограми переміщення ланок роботу при стрибкоподібному завданні (а) і екстремальному (б) налагодженні регуляторів

Результатами функціонування створеної імітаційної *Simulink*-моделі системи керування електродвигунами підтверджено адекватність щодо розробленої раніше математичної моделі, реалізованої у вигляді програмних процедур. Проведені дослідження підтвердили працездатність і високу точність відтворення розробленими програмними процедурами кінематичних діаграм електродвигунів порівняно до імітаційної *Simulink*-моделі і надають підстави для успішного виконання наступних етапів дослідження кінематики та динаміки складної електромеханічної системи робота, як за допомогою програмних процедур так і за допомогою рівноцінної створеної імітаційної *Simulink*-моделі

Література

1. Яглінський, В.П. Моделирование динамических процессов роботизованого виробництва: Монографія / В.П. Яглінський, Д.В. Іоргачев. — Одеса: Астропринт. — 2004. — 232 с.
2. Андрущенко, О.А. Диаграммы движения электромеханических систем / О.А. Андрущенко // Електромашинобудування та електрообладн. — 2008. — Вып. 70. — С. 11 — 17.
3. Ros, S. Kinematics of robots with parallel structure / S. Ros, V. Jaglinsky, D. Chlyzov // MOTROL. Motoryzacija i energetyka rolnictwa. — 2008.— Т. 10А. — Р. 105 — 114.

References

1. Yaglinsky, V.P. Modelyuvannya dynamichnykh procesiv robotyzovanoho vyrobnyctva: Monohrafiya [Simulation of dynamic processes robotic production: Monograph] / V.P. Yaglinsky, D. Iorhachev. — Odessa, 2004. — 232 p.
2. Andrushchenko, O.A. Diagrammy dvizheniya jelektromehanicheskikh sistem [Diagrams of electromechanical systems motions] / O.A. Andrushchenko // Elektromashynobuduvannya ta elektroobladn. [Electrical machinery and electrical equipment]. — 2008. — Iss. 70. — pp. 11 — 17.
3. Ros, S. Kinematics of robots with parallel structure / S. Ros, V. Jaglinsky, D. Chlyzov // MOTROL. Motoryzacija I energetyka rolnictwa. — 2008.— Vol. 10A. — pp. 105 — 114.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. політехн. ун-та Положаєнко С.А.

Надійшла до редакції 17 грудня 2012 р.