

УДК 681.5

ДІАПАЗОН РЕГУЛЮВАННЯ У КОМПЛЕКТНИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ

Д. Ю. Шарейко, кандидат технічних наук, доцент

І. С. Білюк, кандидат технічних наук, доцент

ORCID ID: 0000-0003-1654-7468

А. М. Фоменко, доцент

О. В. Савченко, аспірант

Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова

В. М. Курепін, старший викладач

Миколаївський національний аграрний університет

Розглянуто зв'язок законів керування та частотного діапазону робочих процесів у комплектних електроприводах верстатів з ЧПК. Обґрунтовано використання математичного моделювання для дослідження частотного діапазону систем керування електроприводами. Досліджено динаміку системи автоматичного керування при використанні різних типів регуляторів швидкості та струму. Доведено доцільність вибору закону керування в комплектних електроприводах залежно від частотного діапазону технологічних процесів.

Ключові слова: математичне моделювання, система керування, верстат з ЧПК, комплектний електропривод, регулятор швидкості, регулятор струму, діапазон керування.

Постановка проблеми. Постійне оновлення верстатного парку висуває додаткові вимоги до рівня підготовки обслуговуючого персоналу. Якісна підготовка сучасних фахівців електромеханіків неможлива без вивчення ними процесів, що відбуваються у електроприводах верстатів з ЧПК при зміні параметрів налагодження системи керування на програмному рівні. Розв'язання цієї задачі неможливе без математичного моделювання, яке дозволило б дослідити зв'язок між діапазоном та законом керування в комплектному електроприводі [1].

Зважаючи на те, що будь-який регулятор, синтезований у складі електропривода, може суттєво спотворити завдання для системи керування в динаміці [2], питання дослідження впливу типу регулятора на діапазон керування для комплектних електроприводів верстатів з ЧПК є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботах [3, 4] для фізичного моделювання робочих процесів у електроприводах верстатів з ЧПК були запропоновані експериментальні стенди, а в [5] було розглянуто фізичне моделювання робочих процесів у електроприводах з П – регулятором швидкості та ПІ – регулятором струму. Але отримання передаточної функції скорегованої системи, з урахуванням діапазону керування, раніше не виконувалося. Крім того, жодний з методів

синтезу не враховує як вихідні дані діапазон регулювання швидкості [6, 7].

Метою роботи є дослідження впливу типу регулятора на діапазон керування для комплектних електроприводів верстатів з ЧПК.

Викладення основного матеріалу. Методи синтезу систем автоматичного керування можна розділити на дві групи. У вхідних даних першої групи задається тільки об'єкт керування і потрібно визначити закон функціонування регулятора у цілому. При цьому, звичайно, передбачається, що отримані при розрахунках властивості регулятора можуть бути технічно реалізовані з необхідною точністю. У завданнях другої групи в поняття синтезу вкладається більш вузький зміст. При цьому розглядається задача вибору і розрахунку параметрів спеціальних коригуючих пристроїв, що забезпечують задані статичні та динамічні характеристики системи. При цьому передбачається, що основні функціональні елементи системи (виконавчі, вимірювальні пристрої) вже обрані у відповідності з технічним завданням та разом з об'єктом керування являють собою незмінну частину системи. Найбільшого поширення набули графоаналітичні методи, засновані на побудові інверсних і логарифмічних амплітудо-частотних характеристик (ЛАЧХ) розімкненої та замкненої системи. При цьому використовуються непрямі оцінки якості перехідного процесу: запас по модулю, запас по

фазі, частота зрізу, коливальність – які можна безпосередньо визначити за частотними характеристиками [2, 7]. Такі структури часто прийнятні для систем, що не вимагають підвищеної точності відпрацювання зовнішніх впливів. При безлічі можливих варіантів вибору параметрів передаточних функцій необхідно попередньо оцінити частоту зрізу і допустиме перерегулювання. Частота зрізу однозначно оцінюється часом перехідного процесу і обчислюється за рекомендованими залежностями [2, 7]. Багатоконтурні системи автоматичного керування, що містять крім головного зворотнього зв'язку внутрішні зв'язки є найбільш поширеними на практиці. Такі системи доцільно синтезувати поконтурно, починаючи з внутрішнього і закінчуючи зовнішніми. Цей прийом отримав назву підпорядкованого синтезу.

До іншої групи належать аналітичні методи синтезу систем автоматичного керування. Для них знаходиться вираз, що аналітично зв'язує якість процесу з параметрами коригуючого пристрою, а також визначаються значення параметрів, що відповідають екстремальним значенням спеціально вибраної функції. До цих методів належить синтез за інтегральними критеріями якості перехідного процесу, а також за критерієм середньоквадратичної помилки.

При проектуванні систем керування об'єктами, що не містять чистого запізнення, найбільше застосування отримали два критерії – модульний оптимум та симетричний оптимум [2].

Для забезпечення бажаної форми амплітудної характеристики, близької до прямокутної, коефіцієнти нормованої функції вибирають у відповідності зі стандартними поліномами Баттерворта. Існують інші методи синтезу, при яких задається крива перехідного процесу. Але реалізація систем з перехідним процесом, заданим надмірно жорстко, як правило, виявляється досить важким завданням: система виходить невинувато складною і часто нездійсненною. Тому більшого поширення отримав метод завдання більш грубих якісних оцінок (таких, як перерегулювання, час

регулювання, коливальність), при яких зберігається велика свобода у виборі детальної форми кривої перехідного процесу. Динамічні характеристики об'єктів зазвичай можуть бути апроксимовані деякими типовими залежностями. Це дозволяє всю можливу різноманітність необхідних законів звести до декількох типових законів регулювання, що використовуються на практиці (П-регулювання, ПД-регулювання, ПІ-регулювання, ПІД-регулювання). Отже, задача синтезу системи керування зводиться до вибору відповідного регулятора з типовим законом регулювання та визначення оптимальних значень параметрів настройки вибраного регулятора. Проте жодний з методів синтезу не враховує вплив синтезованого регулятора на діапазон керування. На практиці, для електроприводів одним із важливих показників якості є здатність системи як можна швидше та м'якше відпрацьовувати динамічні накиди навантаження при певній заданій швидкості [2, 6]. Звичайно, така настройка системи дозволяє знижувати мінімальну підтримувану швидкість, а отже збільшувати діапазон керування. Окрім того, суттєвим фактором при розгляді діапазону можна вважати здатність електропривода як можна точніше відпрацьовувати змінний у часі сигнал завдання швидкості. Особливо це актуально для приводів верстатів з ЧПК, де сигнал завдання програмно може змінюватися дуже динамічно та у широких межах. Від здатності системи точно відпрацьовувати цей сигнал залежить якість впровадженого технологічного процесу.

Отже, для дослідження питання діапазону, окрім статичних режимів, будемо розглядати також і динаміку системи керування при змінному сигналі завдання з переходами на різні швидкості та при різному рівні повільності зміни цього сигналу.

Застосуємо визначений підхід для дослідження діапазону П регулятора швидкості та ПІ регулятора струму системи однофазного керування двигуна постійного струму (ДПС) з наступними передаточними функціями регуляторів [7]:

$$W_{pc} = \frac{T_{pc} p + 1}{T_{pc} p}; \quad W_{pш} = K_{pш} \cdot \quad (1)$$

У статичці діапазон керування:

$$D = \frac{\delta}{100} \frac{\omega_{н}}{\Delta\omega_{p,з}} \frac{R_s}{C} \frac{W_{pш}(0) k_{ш} + \frac{C}{W_{pc}(0) k_{тп}}}{k_c + \frac{R_s}{W_{pc}(0) k_{тп}}} = \frac{\delta}{100} \frac{\omega_{н}}{\Delta\omega_{p,з}} \frac{R_s}{C} \frac{K_{pш} k_{ш}}{k_c}$$

Як видно, його величина прямо-пропорційна коефіцієнту підсилення П-регулятора, що повністю відповідає загальній теорії. Тобто для збільшення діапазону необхідно збільшувати

коефіцієнт підсилення $K_{рш}$. Коефіцієнт регулятора швидкості зручно знайти за умови оптимізації системи на технічний оптимум [5]. Отже для виразу $K_{рш}$ можемо записати:

$$K_{рш} = W_{Pi} = \frac{1}{\prod_{i=1}^N a_i T_{иp}} \frac{1}{W_{Ki}} \frac{K_{i-1}}{K_i} = \frac{1}{a^2 T_{тп} p} \frac{T_M p C}{R_\epsilon} \frac{k_\epsilon}{R_\epsilon} = \frac{C T_M k_\epsilon}{a^2 T_{тп} R_\epsilon k_{ш}} \quad (2)$$

Настройка на технічний оптимум дозволяє аналітично визначити $K_{рш}$ за формулою (2), де a – коефіцієнт оптимізації (для технічного

оптимуму $a = 2$). Таким чином, знайдемо діапазон регулювання, що забезпечить налагоджений П-регулятор:

$$D = \frac{\delta}{100} \frac{\omega_H}{\Delta\omega_{p,з}} \frac{R_\epsilon k_{ш}}{C k_\epsilon} \frac{C T_M k_\epsilon}{a^2 T_{тп} R_\epsilon k_{ш}} = \frac{\delta}{100} \frac{\omega_H}{\Delta\omega_{p,з}} \frac{T_M}{a^2 T_{тп}} \quad (3)$$

На практиці максимальне значення електромеханічної сталої часу T_M , як правило, не перевищує 0,3...0,4 с, спад швидкості навантаженого двигуна загальнопромислового виконання складає 10% від номінальної, а стала часу сучасних тиристорних перетворювачів $T_{тп} \geq 0,006$. Таким чином при $a=2$ та відносній похибці регулювання $\delta = 10\%$ діапазон не перевищує значення $D \leq 10$.

Виконаємо імітаційне моделювання системи керування з використанням параметрів двигунів та тиристорних перетворювачів, що випускаються промисловістю, з потужністю до 90 кВт. На рисунку 1 можна бачити графіки

статичного спаду швидкості замкненої системи при раптовому накиді навантаження за умови відсутності задаючого впливу для декількох двигунів різної потужності з П-регулятором швидкості, настроєним на технічний оптимум.

За рахунок зміни коефіцієнта оптимізації a можна підвищити діапазон до приблизних значень у 40–50. Але при цьому суттєво погіршується динаміка системи, що приводить до збільшення перерегулювання до 60% та підвищення коливальності системи. Це приводить систему до границі стійкості, що ускладнює використання такого підходу збільшення діапазону на практиці.

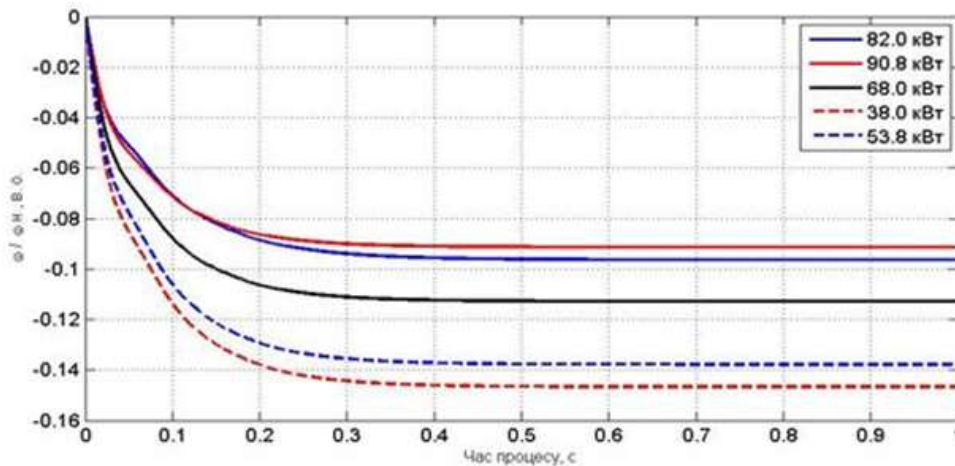


Рис. 1. Статичний спад швидкості при накиді навантаження

Розглянемо динаміку відпрацювання швидкості системи при змінному сигналі завдання та з однаковими зовнішніми регуляторами швидкості, що синтезовані при настройці на технічний оптимум (рисунок 2).

Аналіз перехідних процесів на рисунку 2 показав, що збільшення $K_{рш}$ суттєво прискорює

динаміку системи, що забезпечується завдяки зсуву частоти зрізу всієї системи праворуч.

На рисунку 3 показано логарифмічні частотні характеристики (ЛЧХ) розглянутих систем, де видно, що за рахунок зміни $K_{рш}$ неможливо істотно збільшити частоту зрізу в межах стійкості системи.

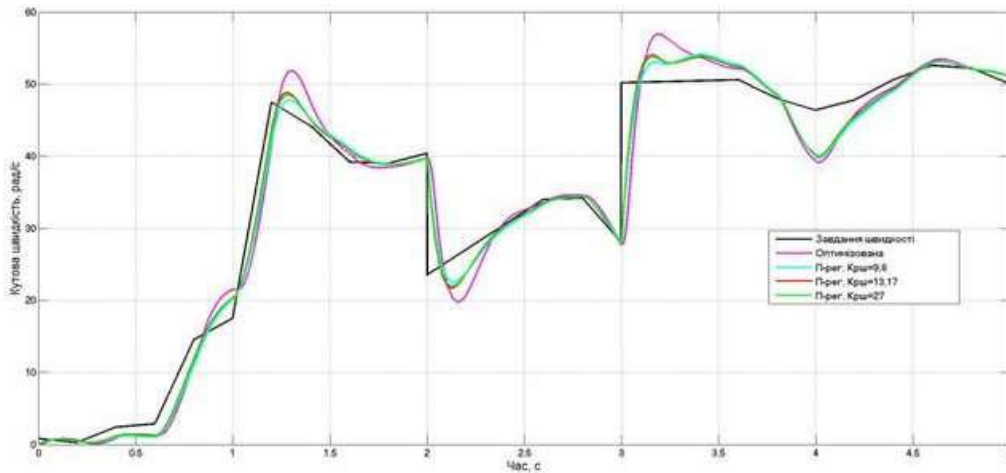


Рис. 2. Динаміка системи з П-регулятором швидкості

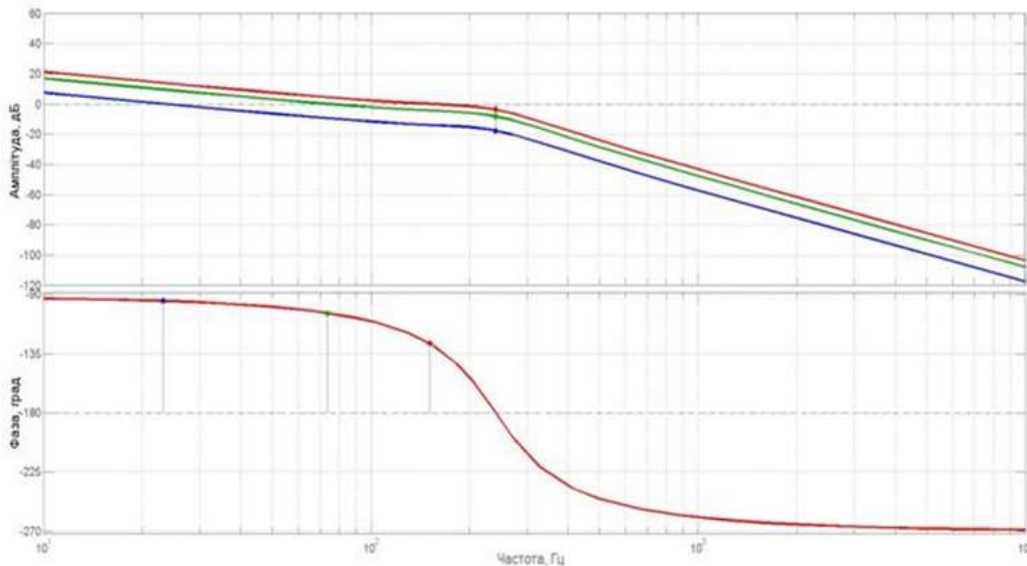


Рис. 3. ЛЧХ при різних параметрах налагодження П-регулятора

Отже видно, що настройка на збільшення частоти зрізу дозволяє суттєво покращити відпрацювання системою динамічного завдання. Суттєві стрибки або ярко виражені переходи з однієї швидкості на іншу супроводжуються небажаними кидками швидкості та підвищеною

коливальністю, що в свою чергу є наслідком збільшення частоти зрізу.

Розглянемо систему з ПІ – регулятором струму та ПІ – регулятором швидкості, що мають наступні передаточні функції:

$$W_{pc} = \frac{T_{\mu c} p + 1}{T_{\mu c} p}; \quad W_{psh} = \frac{T_{\mu sh} p + 1}{T_{\mu sh} p}. \quad (4)$$

З урахуванням (3) отримаємо:

$$D = \frac{\delta}{100} \frac{\omega_n}{\Delta \omega_{p,3}} \frac{R_e}{C} \frac{W_{psh}(0)k_{ш} + \frac{C}{W_{pc}(0)k_{ТП}}}{k_c + \frac{R_e}{W_{pc}(0)k_{ТП}}} = \frac{\delta}{100} \frac{\omega_n}{\Delta \omega_{p,3}} \frac{R_e}{C} \frac{\infty k_{ш}}{k_c} \rightarrow \infty. \quad (5)$$

Як видно із залежності (5), введення інтегралу до закону регулювання повністю знищує статичний спад швидкості, що фактично

говорить про нескінченний діапазон керування у статичному режимі, але при цьому неврахованою залишається динаміка системи (див. рисунок 4).

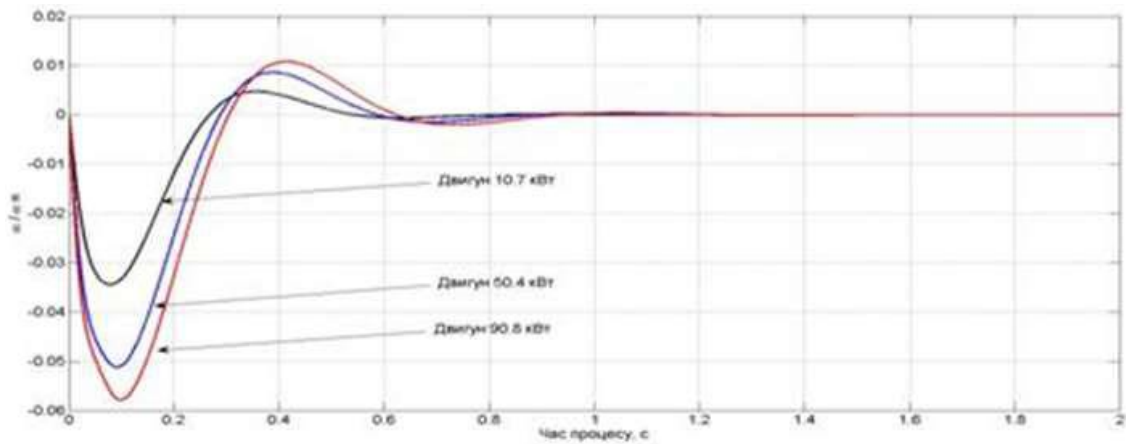


Рис. 4. Динамічне відпрацювання ПІ- регулятора

Динамічне відпрацювання ПІ регулятора на практиці не дозволяє стверджувати про нескінченність діапазону регулювання. На відміну від попередніх, в цьому випадку величина діапазону не буде залежати виключно від коефіцієнта пропорційної складової, а визначатиметься максимальним значенням

динамічного спаду швидкості, який представлено на рисунку 4, де представлена динаміка систем для різних двигунів з ПІ-регулятором.

Розглянемо частотні характеристики системи керування з ПІ-регулятором (див. рисунок 5).

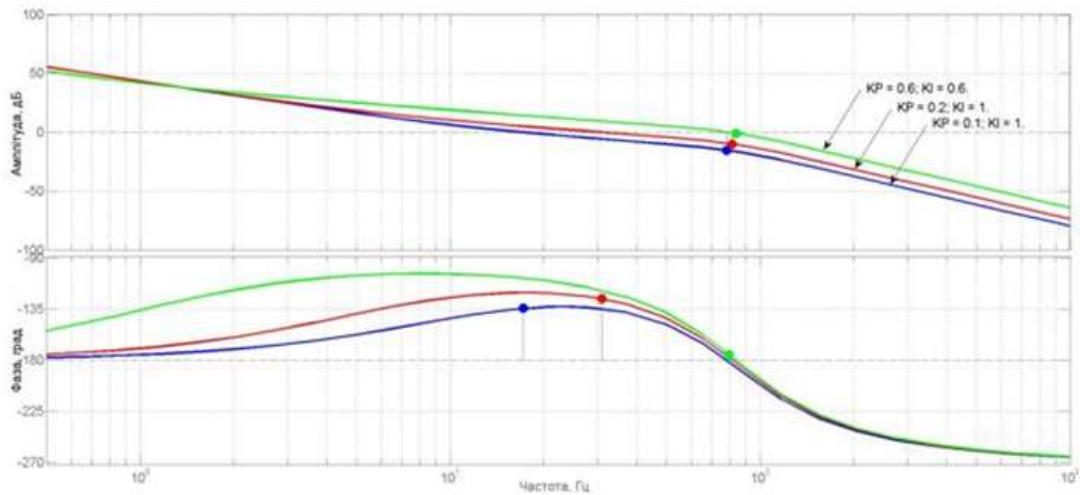


Рис. 5. Частотні характеристики системи з ПІ-регулятором

Завдяки чисельному експерименту для різних значень параметрів ПІ регулятора було підтверджено, що зсув частоти зрізу праворуч суттєво покращує динамічне відпрацювання стрибка навантаження, а отже і збільшує діапазон регулювання. Слід зазначити, що при цьому зменшуються запаси за фазою та амплітудою, що знижує ступінь стійкості системи (див. рисунок 5). Суттєвим обмеженням зсуву частоти зрізу праворуч також є збільшення коливальності системи керування електроприводом, що погіршує динаміку для використання на практиці. За дослідними даними при різних значеннях параметрів ПІ-регулятора діапазон регулювання можна отримати в межах

до 150, що супроводжується перерегулюванням у 60-70%.

Висновки. У роботі отримано передаточні функції скорегованих систем керування швидкістю комплектних електроприводів з урахуванням діапазону керування. Використання отриманих результатів надає можливість впливати на діапазон регулювання швидкості електропривода за рахунок зміни параметрів законів регулювання, що дозволяє у випадку вже спроектованого та встановленого привода покращувати експлуатаційні властивості та впроваджувати додаткові функціональні можливості для існуючого технологічного процесу, або застосовувати даний електропривод в умовах іншого технологічного процесу.

Список використаних джерел:

1. Leonhard Werner. Control of Electrical Drives – Third edition / Werner Leonhard – Berlin; Heidelberg; New York: Springer 2001. – P.460.
2. Попович М.Г. Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи [Текст] / М.Г. Попович, О.Ю. Лозинський, В.Б. Клепиков – К.: Либідь, 2005. – 680 с.
3. Пат. 65775 Україна, МПК G05B 23/02 (2006.01) Стенд фізичного моделювання нелінійних процесів / Шарейко Д.Ю., Фоменко А.М., Степанов С.А., Гріднев І.Ю., Серба А.І., заявник та патентовласник Національний університет кораблебудування ім. адмірала Макарова. – № 201107799, заявл. 21.06.2011; опубл. 12.12.2011, бюл. № 23.
4. Шарейко, Д.Ю. До питання модернізації вітчизняного верстатного парку [Текст] / Д.Ю. Шарейко, А. М. Фоменко, І. С. Білюк // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – 2011. – Вип. 5 (70) – С. 86-90.
5. Фоменко А.М. Експеримент з діапазону регулювання електроприводів [Текст] / А.М. Фоменко, Д.Ю.Шарейко, І.С. Білюк // Перспективна техніка і технології – 2014 : матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів. м. Миколаїв. – Миколаїв : МНАУ, 2016 – С. 60-69.
6. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов [Текст] / М.П. Белов – М. : Академия, 2007. — 576 с.
7. Попович М.Г. Теорія автоматичного керування [Текст] / М.Г. Попович, О.В. Ковальчук – К.: Либідь, 2007. — 656 с.

Д. Ю. Шарейко, І. С. Білюк, А. Н. Фоменко, О. В. Савченко, В. Н. Курепин. Диапазон регулирования в комплектных электроприводах.

Рассмотрена связь законов управления и частотного диапазона рабочих процессов в комплектных электроприводах станков с ЧПУ. Обосновано использование математического моделирования для исследования частотного диапазона систем управления электроприводами. Исследована динамика системы автоматического управления при использовании различных типов регуляторов скорости и тока. Доказана целесообразность выбора закона управления в комплектных электроприводах в зависимости от частотного диапазона технологических процессов.

Ключевые слова: математическое моделирование, система управления, станок с ЧПУ, комплектный электропривод, регулятор скорости, регулятор тока, диапазон управления.

D. Shareiko, I. Bilyuk, A. Fomenko, O. Savchenko, V. Kurepin. The control range in complete electric drives.

The connection between the laws of control and the frequency range of the workflow of the complete electric drives of the computer numeric controlled machine tools is considered. The use of mathematic modelling for the examination of the frequency range of the control systems of the electric drives is justified. The dynamics of the automatic control system is researched when using different types of current and speed controllers. The utility of choosing the law of control in complete electric drives according to the frequency range of the workflow is proved.

Key words: mathematical modelling, control system, computer numerical control (CNC) machine tool, complete electric drive, speed controller, current controller, control range.