

УДК 621.771.23-52

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ БЕЗКОНТАКТНИХ ВИКОНАВЧИХ ПРИСТРОЇВ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАМЕТРАМИ ШТАБИ ПРОКАТУ

Попович М.Г., д.т.н., проф., Островерхов М.Я., к.т.н., доц.

Національний технічний університет України „Київський політехнічний інститут”

03056, Київ, пр. Перемоги, 37, НТУУ „КПІ”, ФЕА, кафедра АЕМС-ЕП

E-mail: [ostroverkhov@list.ru](mailto:ostroverkhov@list.ru)

Представлена математическая модель и результаты исследования бесконтактных исполнительных устройств систем автоматического управления параметрами листового проката.

**Ключевые слова:** бесконтактные исполнительные устройства, математическая модель.

The mathematical model and results of research of contactless executive devices of automatic-control systems of parameters of a rolled sheet is presented.

**Key words:** contactless executive devices, mathematical model.

**Вступ.** Найбільш актуальною проблемою листопрокатного виробництва є отримання високої якості штаби за критеріями форми та профілю. Розроблений метод керування розподілом механічних напружень по ширині штаби відкриває перспективи створення принципово нових систем автоматичного керування вказаними параметрами шляхом електромагнітної дії на штабу за допомогою безконтактних виконавчих пристроїв (БВП) [1-3]. Для проведення аналізу та синтезу цих систем необхідно отримати математичну модель БВП, керування зусиллям яких здійснюється частотою напруги живлення.

**Аналіз попередніх досліджень.** БВП працюють за принципом, подібним роботі індукторів лінійних асинхронних двигунів, властивості яких як електричних машин достатньо вивчено. Існуючі моделі в основному направлені на проектування та аналіз характеристик лінійних двигунів, вони у більшості випадків є числовими та містять допущення про синусоїдальний закон індукції на кожному полюсному розподілу. Розімкнутість магнітопроводу БВП призводить до відхилення від синусоїдальної форми розподілу, магнітного потоку та індукції по продовжній осі, що призводить до несиметричності електрорушійних сил та вимагає розробки відповідних математичних моделей. Для вирішення цієї задачі можуть бути використані принципові положення по розробці моделей лінійних індукторних машин на основі деталізованої до секції  $j$  стрижня схеми заміщення електричної обмотки та деталізованої до зубцевого поділу магнітної схеми заміщення [4, 5].

**Мета роботи** - розробка та дослідження математичної моделі БВП, яка забезпечить можливість синтезу та аналізу систем автоматичного керування параметрами прокату на основі електромагнітної дії на штабу.

**Матеріал і результати досліджень.** Розрахункова модель БВП є одновимірною та містить три характерні зони: активну зону індуктора в межах його геометричної довжини та дві умовні зони магнітного шунтування біля його торців при вході та виході

штаби з активної зони. Структурна схема однієї  $j$  елементарної ділянки, рівної зубцевому поділу  $tz$  активної зони, в узагальненому вигляді складається з 4-х динамічних ланок, з'єднаних відповідно до напрямку перетворення енергії, причому  $j$  змінюється від одиниці до числа пазів індуктора  $z$  (рис. 1). Ланка 1 являє собою модель елементарної електричної обмотки, входами якої є миттєві значення напруги джерела живлення  $U_j$  та магнітного потоку  $\Phi_j$ , а виходом – миттєвий струм стрижня  $I_{1j}$ . Ланка 2 описує елементарну магнітну систему, що створює миттєвий магнітний потік  $\Phi_j$  на основі струму стрижня  $I_{1j}$  та магнітних потоків сусідніх зубцевих поділів  $\Phi_{j-1}, \Phi_{j+1}$ . Ланка 3 представляє собою модель умовної елементарної короткозамкнутої електричної обмотки, в якості якої виступає метал штаби. Елементарне миттєве значення струму у цій обмотці  $I_{2j}$  визначається магнітними потоками  $\Phi_{j-1}, \Phi_j, \Phi_{j+1}$ , а також швидкістю штаби  $V$  та струмами сусідніх ділянок штаби  $I_{2j-1}, I_{2j+1}$ . Елементарне миттєве електромагнітне зусилля  $f_j$  створюється ланкою 4 на основі струму у штабі  $I_{2j}$  та магнітних потоків  $\Phi_{j-1}, \Phi_{j+1}$ . Загальне зусилля безконтактного виконавчого пристрою  $F$  складається із суми всіх елементарних зусиль  $f_j$  кожного зубцевого поділу  $tz$  активної зони та умовних зон магнітного шунтування.

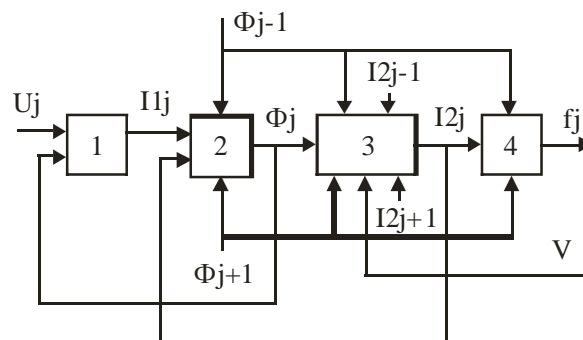


Рисунок 1 – Структурна схема елементарної ділянки активної зони БВП

При виконанні обмотки БВП у вигляді трифазної системи змінного струму за схемою „зірка”, без нульового провідника, баланс напруг має вид:

$$L_1 \frac{dI_{1A}}{dt} + R_1 I_{1A} - L_1 \frac{dI_{1B}}{dt} - R_1 I_{1B} = U_{AB} + E_A - E_B$$

$$+ 2L_1 \frac{dI_{1B}}{dt} + 2R_1 I_{1B} + L_1 \frac{dI_{1A}}{dt} + R_1 I_{1A} = U_{BC} + E_B - E_C$$

а ЕРС фаз обмотки визначаються наступним виразом:

$$E = -W_1 \frac{d\Phi}{dt},$$

де:  $R_1, L_1$  – активний електричний опір та індуктивність фази обмотки;  $I_{1A}, I_{1B}, U_{AB}, U_{BC}$  – миттєві лінійні струми та напруги;  $W_1$  – число витків в пазу обмотки. На основі наведених рівнянь будується структурна схема моделі електричної обмотки, що представляє ланку 1 на рис. 1. Проте при заданій схемі обмотки вона є загальною для всієї активної зони, тому потребує доповнення у вигляді клемної панелі для з'єднання котушок. Наприклад, при одній парі полюсів  $p=1$  та числі пазів на полюс  $i$  фази  $q=2$ , кількість пазів дорівнює  $z = brq = 6 \cdot 1 \cdot 2 = 12$ , а розподіл елементарних струмів  $I_{ij}$  по пазах здійснюється у відповідності до теорії електричних машин.

Рівняння магнітного балансу елементарного магнітного кола має вид:

$$(L_{m1} + L_{m2}) \frac{d\Phi_j}{dt} + (R_{m1} + R_{m2})\Phi_j + R_b(\Phi_j - \Phi_{j-1}) + R_b(\Phi_j - \Phi_{j+1}) = W_1 I_{1j} + W_2 I_{2j}$$

де:  $L_{m1}, L_{m2}, R_{m1}, R_{m2}$  – умовні магнітні індуктивності та магнітні опори ярма індуктора БВП та штаби;  $R_b$  – магнітний опір повітряного зазору;  $W_2=1$  – кількість витків умовної короткозамкнутої обмотки штаби. На основі цього рівняння будується структурна схема, що описує елементарну магнітну систему одного зубцевого поділу, що позначена на рис. 1 ланкою 2. Відповідно до типу електричної обмотки на основі елементарних потоків формуються різниці магнітних потоків фаз для ланки 1.

Рівняння балансу елементарного електричного кола у металі штаби після вибору кроку розбиття БВП по подовжній координаті  $x$ , рівного зубцевому поділу, матиме вигляд:

$$-W_2 \frac{\partial \Phi_j}{\partial t} - W_2 V(\Phi_{j+1} - \Phi_{j-1}) / 2tz = L_2 \frac{\partial I_{2j}}{\partial t} + L_2 V(I_{2j+1} - I_{2j-1}) / 2tz + R_2 I_{2j}$$

На основі рівняння будується структурна схема, яка описує ланку 3 на рис. 1.

Елементарне електромагнітне зусилля на одному зубцевому поділі після вибору кроку розбиття БВП по продовжній координаті, рівного зубцевому поділу, визначається наступним виразом:

$$f_j = (\Phi_{j+1} - \Phi_{j-1}) W_2 I_{2j} / 2tz.$$

На основі цього рівняння будується структурна схема, що описує ланку 4 (рис. 1).

Об'єднання структурних схем всіх ланок дозволяє отримати структурну схему елементарної ділянки БВП, рівної одному зубцевому пазу.

Модель елементарних ділянок зон магнітного шунтування мають аналогічну структуру, проте значення напруги  $U_j$  та струму  $I_{ij}$  прирівнюються до нуля. Структурна схема всього БВП будується шляхом з'єднання структурних схем кожного пазу всіх трьох зон. Входом розробленої математичної моделі служить трифазна змінна напруга живлення та швидкість штаби, а виходом є зусилля у штабі.

Перевагою отриманої достатньо складної математичної моделі БВП є врахування подовжніх крайових ефектів, обумовлених розімкнутістю магнітопроводу, можливість детального аналізу роботи в цілому та по кожному зубцевому поділу окремо. По точності модель на основі деталізованих схем заміщення займає проміжне місце між моделями за методом інтегральних схем заміщення та числовим методом кінцевих різниць для розрахунку магнітного поля.

З метою перевірки адекватності розробленої математичної моделі, визначення ступеню негативного впливу на якість керування зусиллям у штабі крайових ефектів внаслідок розімкнутості магнітопроводу, оцінки динамічних властивостей по характеру перехідних процесів проведено дослідження БВП шляхом моделюванням у середовищі Simulink на прикладі приводу частини штаби заданої маси  $m$ . Цей рух описується наступним рівнянням:

$$m \frac{dV}{dt} = F m F_c.$$

За допомогою зміни величини та знаку зовнішнього зусилля  $F_c$  промодельовано характерні режими роботи БВП, зокрема, ідеальний холостий хід, рушійний режим та режим рекуперативного гальмування.

На рис. 2 представлено перехідний процес зусилля у штабі під час пуску в холосту БВП, який має тільки одну пару полюсів  $p=1$ . По закінченні перехідного процесу мають місце коливання зусилля, обумовлені розімкнутістю магнітопроводу. При цьому зусилля у штабі відповідно до математичної моделі складається з зусилля, що створює активна зона індуктора БВП (рис. 3) та двох зусиль, які виникають в зонах магнітного шунтування на торцях індуктора при вході та виході штаби з активної зони під час руху (рис. 4 та рис. 5). Як видно з рисунків, всі три складові також мають коливальний характер.

Це обумовлює пульсації швидкості під час усталеного руху штаби при роботі БВП вхолосту, як представлено на рис. 6. Вказані коливання зусилля та швидкості виникають внаслідок несиметричності магніторушійних сил фаз БВП, показаних на рис. 7. Така несиметрія пов'язана те тільки з особливістю

конструкції БВП у вигляді розімкнутого магнітопроводу, а й обумовлена наявністю лише пари магнітних полюсів зразка БВП, що досліджувався.

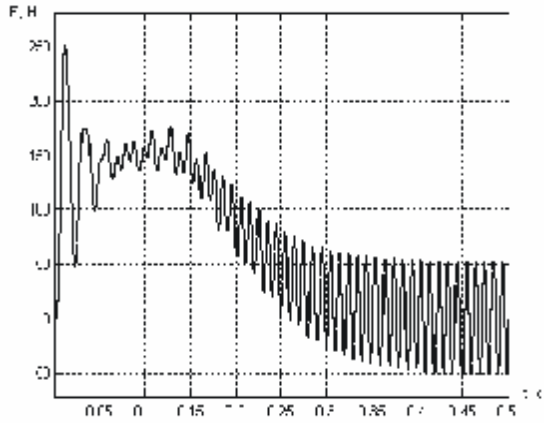


Рисунок 2 – Перехідний процес зусилля у штабі

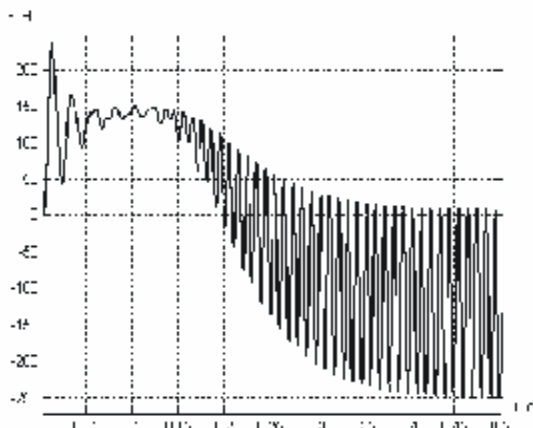


Рисунок 3 – Перехідний процес зусилля активної зони

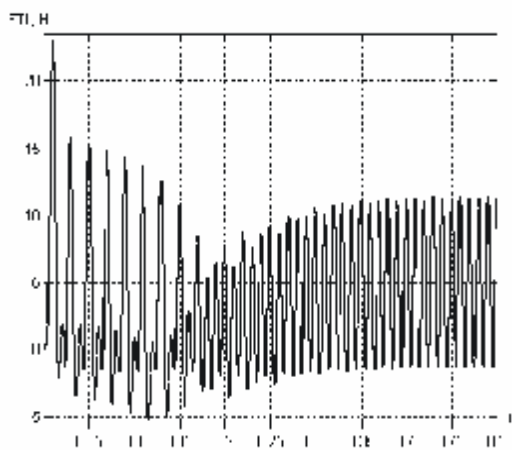


Рисунок 4 – Перехідний процес зусилля зони шунтування на вході в індуктор

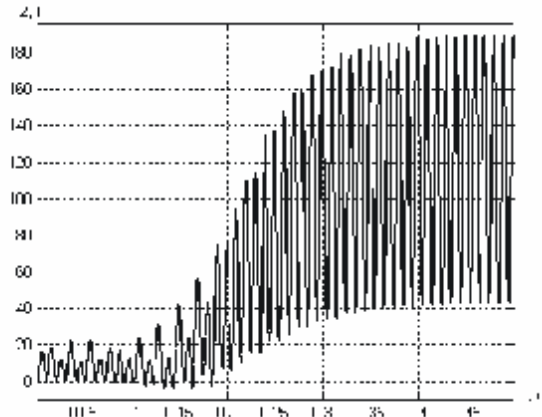


Рисунок 5 – Перехідний процес зусилля зони шунтування на виході з індуктора

На рис. 8 та рис. 9 показано графіки швидкості та зусилля у штабі під час переходу БВП в рушійний режим при дії протилежно направлено зовнішнього зусилля  $F_c=50$  Н через 0,5 с після пуску. Як видно з рисунків, коливання швидкості та зусилля продовжуються. При цьому середнє значення зусилля встановлюється на рівні 50 Н, а швидкість зменшується з 6,8 до 6,1 м/с відповідно до жорсткості механічної характеристики БВП.

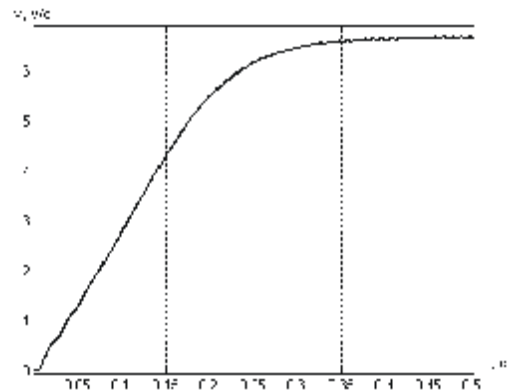


Рисунок 6 – Перехідний процес швидкості штаби

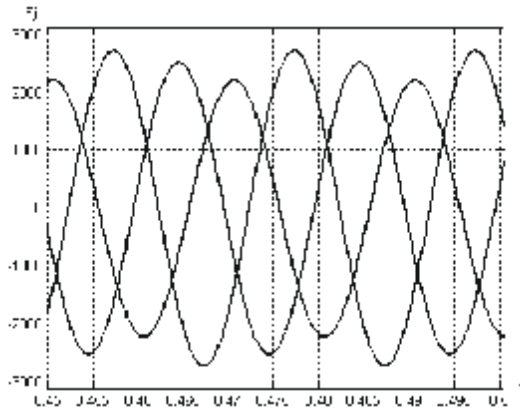


Рисунок 7 – Магніторушійні сили фаз в усталеному режимі

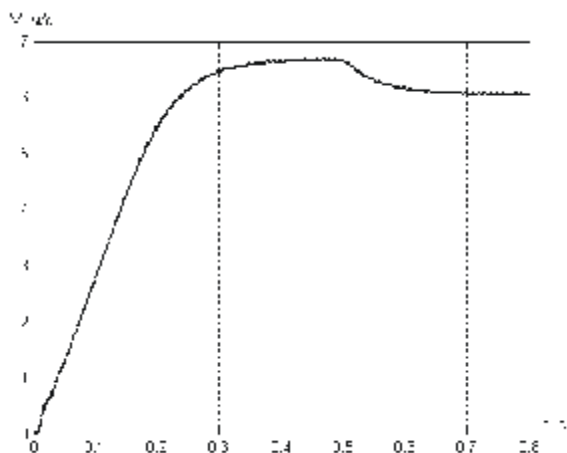


Рисунок 8 – Перехідний процес швидкості штаби під час переходу БВП в рушійний режим роботи

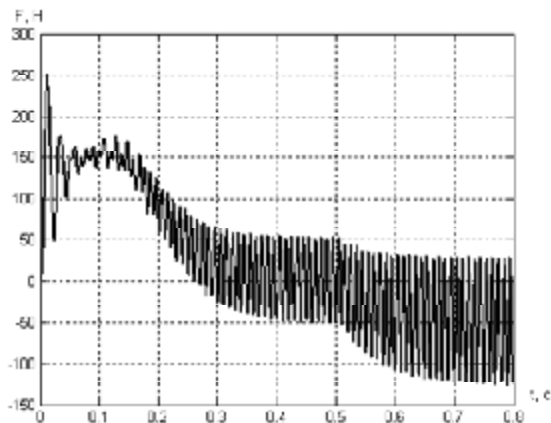


Рисунок 11 – Перехідний процес зусилля у штабі під час переходу БВП в рекупераційне гальмування

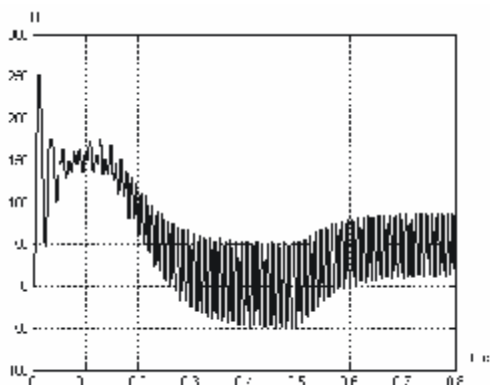


Рисунок 9 – Перехідний процес зусилля у штабі під час переходу БВП в рушійний режим роботи

Для зменшення пульсації зусилля та швидкості доцільно конструювати БВП з більшою кількістю пар полюсів. При цьому властивості БВП з розімкнутим магнітопроводом наближаються до властивостей обертальних електродвигунів з замкнутим магнітопроводом [6]. На рис. 12 та рис. 13 показано перехідні процеси швидкості та зусилля у штабі під час пуску вхолосту безконтактного виконавчого пристрою, що має дванадцять пар полюсів  $p=12$ . Як видно з рисунків, по закінченні перехідних процесів коливання практично відсутні. Робота БВП в рушійному режимі після 0,5 с та режимі рекупераційного гальмування після 0,8 с з моменту пуску під дією зовнішньої сили  $\pm 50$  Н також відбувається без пульсації швидкості та зусилля.

На рис. 10 та рис. 11 представлено графіки швидкості та зусилля під час переходу БВП в режим рекупераційного гальмування при дії однаково направлено зовнішнього зусилля  $F_c=50$  Н через 0,5 с після пуску. Як видно з рисунків, коливання швидкості та зусилля продовжуються. При цьому амплітуда коливань зусилля зростає. Середнє значення зусилля встановлюється на рівні  $-50$  Н, а швидкість збільшується з 6,7 до 7,4 м/с.

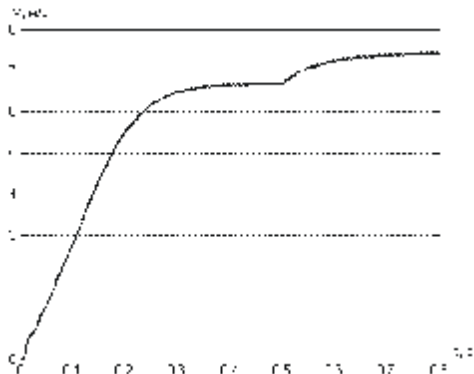


Рисунок 10 – Перехідний процес швидкості штаби під час переходу БВП в рекупераційне гальмування

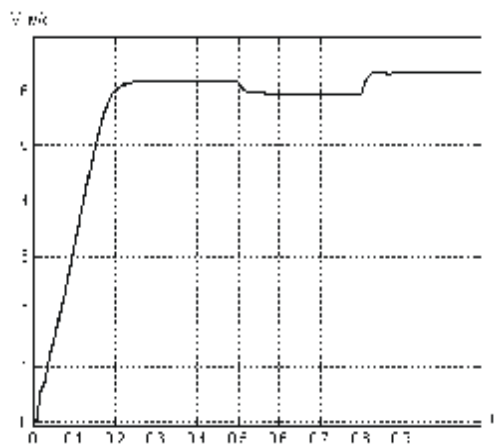


Рисунок 12 – Перехідний процес швидкості штаби під час переходу БВП в різні режими роботи при  $p=12$

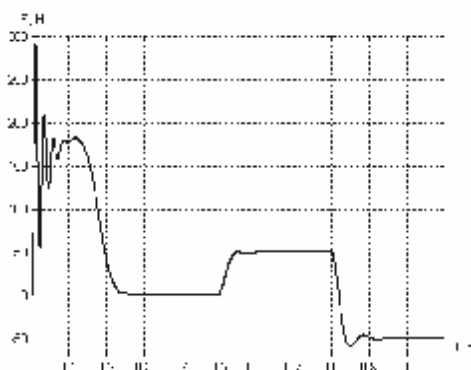


Рисунок 13 – Перехідний процес зусилля у штабі під час переходу БВП в різні режими роботи при  $\rho=12$

Дослідження роботи БВП в складі системи автоматичного керування розподілом натягу штаби здійснюється при русі штаби з усталеною швидкістю 6,12 м/с (рис. 14), що забезпечує режим холостого ходу БВП при живленні його напругою частотою 50 Гц. При зменшенні на 0,5 с частоти напруги живлення на 4 Гц, БВП переходить в режим рекуперації, створюючи гальмівне зусилля 86 Н (рис. 15).

Збільшення частоти з 50 до 54 Гц призводить до переходу в рушійний режим та створення у штабі зусилля на рівні 84 Н (рис. 16).

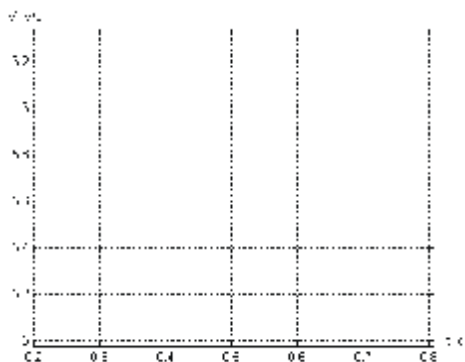


Рисунок 14 – Графік усталеної швидкості штаби

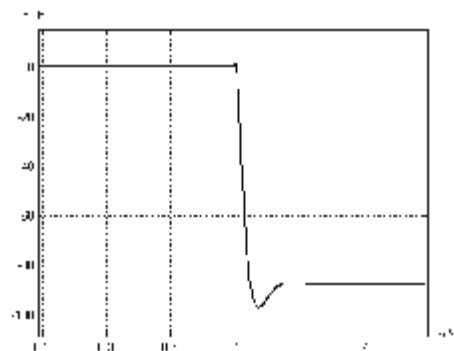


Рисунок 15 – Перехідний процес зусилля у штабі при зменшенні частоти напруги

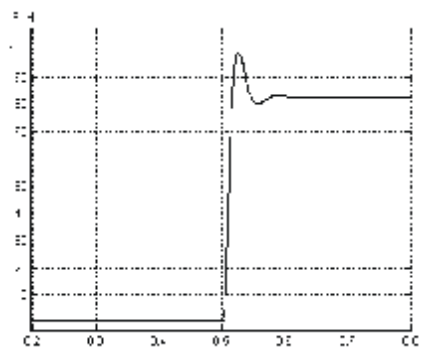


Рисунок 16 – Перехідний процес зусилля у штабі при збільшенні частоти напруги

### Висновки.

1. Одержана та досліджена математична модель безконтактних виконавчих пристроїв, яка дозволяє оцінити вплив окремих складових зусилля.
2. Форма математичної моделі забезпечує отримання висновків про раціональні параметри БВП для різних умов роботи.
3. Отримані результати можуть бути покладені в основу при розробці та дослідженні систем автоматичного керування параметрами прокату з електромагнітною дією на штабу.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Попович Н.Г., Островерхов Н.Я., Боровский В.В. Электромеханическая система автоматического управления планшетностью прокатываемых полос металла на основе бесконтактных электромагнитных устройств // Сб. международной конференции по электромеханике и электротехнике, МКЭЭ-01, Кременчуг. – 2001. – С. 3-6.
2. Пат. 18745 Україна, МПК В21 В37/00. Пристрій для керування профілем штаби прокату / Попович М.Г., Островерхов М.Я. – Опубл. 15.11.2006, Бюл. № 11.
3. Пат. 14507 Україна, МПК В21 В37/00. Пристрій для автоматичного керування планшетністю штаби прокату / Попович М.Г., Островерхов М.Я. – Опубл. 15.05.2006, Бюл. № 5.
4. Веселовский О.Н., Коняев А.Ю., Сарапулов Ф.Н. Линейные асинхронные двигатели. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 256 с.
5. Иванушкин В.А., Сарапулов Ф.Н., Шымчак П. Структурное моделирование электромеханических систем и их элементов. – Щецин, 2000. – 310 с.
6. Вилнитис А.Я., Дриц М.С. Концевой эффект в линейных асинхронных двигателях. Задачи и методы решения. – Рига: Зинатне, 1981. – 325 с.

Стаття надійшла 12.04.2008 р.