УДК 621-926

УЗАГАЛЬНЕНІ ПАРАМЕТРИ СИСТЕМИ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННОГО ПРИВОДА З УДАРНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

БОРОДАЙ В.А. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри електропривода Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7721-8752, e-mail: borodai.v.a@nmu.one;

БОРОВИК Р.О. інженер, старший викладач кафедри електропривода Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5230-7747, e-mail: borovyk.r.o@nmu.one;

НЕСТЕРОВА О.Ю. канд. педагог. наук, доцент, завідувач кафедри філософії та педагогіки Національного ТУ „Дніпровська політехніка”, Дніпро, Україна, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5952-4664, e-mail: Nesterova.O.Yu@nmu.one.

Мета роботи. *Узагальнити параметри оригінальної системи керування збудженням синхронних приводів для розповсюдження їх результатів на потужні виробничі комплекси, які працюють у режимах періодичних ударних навантажень, що сприятиме ліквідації аварійності через руйнування конструкції електромагнітної системи синхронних машин механізмів даного типу.*

Методи дослідження. *Для проведення досліджень використані положення теорії електричних машин, теорії автоматичного керування, методи розв’язання оптимізаційних задач із використанням математичного пакету MATHCAD, способи та методи моделювання у середовищі MATLAB складової SIMULINK.*

Отримані результати. *Шляхом вирішення оптимізаційної задачі отримано поліноміальні залежності рівнів форсування системи збудження синхронного привода із врахуванням величини поточного навантаження і штатними параметрами пружної муфти, а також визначені параметри ПІ-регулятора із уточненням коефіцієнту інтегральної ланки, що дозволяє уникнути надлишкової коливальності процесу накиду екстремального навантаження.*

Наукова новизна. *Враховуючи технологічні умови роботи автомат-стану ТПА-350 інструменту виготовлення цільнотягнутих труб, запропоновано оригінальний підхід та отримано поліноміальні залежності узагальнення основних параметрів керування системи збудження синхронного приводу, який працює у режимі періодичних екстремальних навантажень та показано перспективу використання даної системи у складі промислових збудників засобів живлення індукторних обмоток потужних синхронних приводів металургійних і дробарно-подрібнювальних механізмів.*

Практична цінність. *Отримані поліноміальні залежності головних параметрів системи керування збудженням потужних синхронних приводів дають можливість рекомендувати виробникам та проєктувальникам конкретні значення форсування, параметри ПІ-регулятора та задавача інтенсивності, що дозволить уникнути коштовних ремонтів і простоїв автомат-стану, які супроводжуються значними фінансовими витратами.*

Ключові слова: автомат-стан; потужний синхронний привод; система збудження; розв’язання оптимізаційної задачі; математичне та структурне моделювання; лінії тренду узагальнених параметрів.

I. ВСТУП

Останнім часом досить гостро стало питання енергоощадності та енергоефективності. У світлі цього в промислове виробництво, де потужності приводів вище за 1 МВт, замість двигунів постійного струму та асинхронних двигунів впроваджують синхронні двигуни з ККД 98 %, а можливість регулювання коефіцієнта потужності дозволяє додатково здійснювати компенсацію реактивної потужності за одночасного виконання технологічного завдання.

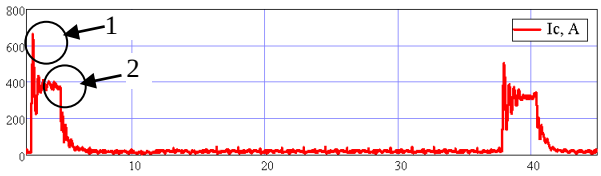
Вивчення реконструкції автомат-станів ТПА-350 виявило проблеми установки двигунів із абсолютно жорсткою механічною характеристикою, які не дозволяють використовувати кінетичні накопичувачі енергії, що призводить до суттєвого зростання ударних динамічних навантажень в режимах втягнення заготовок у валки і, власне, прокат. Наслідок – руйнування ізоляції обмоток якоря та ротора машини, що вимагає капітальних ремонтів і веде до простоїв високопродуктивного обладнання [1].

II. АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ І ПУБЛІКАЦІЙ

Висновок попереднього розділу свідчить, що причиною руйнування обмоток синхронного привода автомат-стану ТПА-350 і механізмів подібного типу [1], [2] є виникнення значних динамічних зусиль протягом часу екстремального перепаду струму якоря

© Бородай В.А., Боровик Р.О., Нестерова О.Ю., 2025
Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License **(CC-BY-CA 4.0)**
DOI: https://doi.org/10.15588/1607-6761-2025-3-3

(рис. 1), який з'являється внаслідок дії ударного прикладання навантаження.



1 – екстремальне та 2 – залишкове збурення

Рисунок 1. Діючий струм статора упродовж двох проходів заготовки стану ТПА-350

Поруч з тим встановлено, що на цей процес можливо впливати через контур збудження шляхом встановлення деякого регулятора або ступеневої зміни завдання на збудження з наперед відомими рівнем і часом нарощування струму індуктора.

Дослідженням впливу періодичних динамічних коливань в трубопрокатних агрегатах з автоматстанами і пошук шляхів зменшення їх впливу займалися Рахманов С.Р. [3] - [8], Балакін В.Ф. [9], Хацкелян І.П. [10], [11], Поворотний В.В. [12] - [14], Pavlo Krot [15], [16] та ін. Ними досліджувались процеси деформації гільзи та навантаження, що виникають в механічній частині стана, не враховуючи вплив приводного двигуна.

Традиційно головний привод прокатних станів комплектувався двигунами постійного струму, завдяки значним регулювальним можливостям. З часом, для потужних промислових механізмів, де не потрібне регулювання швидкості, зокрема, в окремих установках металургійного виробництва для механізмів з ударним навантаженням (приводи валків трубопрокатних станів, ножиці, приводи чорнових клітей тощо) почали застосовувати асинхронні двигуни із маховиком, які згодом поступово замінювали на синхронні електродвигуни, які мають низку переваг завдяки їх властивостям [17]. Такі переваги, як висока надійність, через великий повітряний зазор, можливість компенсації реактивної потужності, високий ККД, значна жорсткість механічної характеристики і, нарешті, застосування тихохідних двигунів, які допускають виключити редуктори зі складу кінематичних схем, зумовлюють унікальність конкурентних переваг цього типу двигунів [18], [19].

В режимі холостого ходу синхронний електропривод прокатного стану працює зі зниженою напругою збудження з метою зменшення нагріву обмотки і енерговитрат (рис. 1). Найбільш суттєві зміни навантаження відбуваються при захваті валками металу й виході його з кліті. При цьому автоматична система регулювання збудження забезпечує необхідну стійкість двигуна для утримання його в синхронізмі форсуванням напруги збудження. З цією метою використовують різні методи і засоби. Наприклад автори джерел [20], [21] оснащують систему збудження ємнісним накопичувачем енергії з метою компенсації постійної часу обмотки збудження; в [22] пропонується разом із застосуванням, при форсуванні, ємнісного накопичувача чергувати періоди форсування напруги з періодами гасіння поля.

Запропоновані способи забезпечують стійкість при різкому прикладанні навантаження, проте не враховують впливу електродинамічних навантажень на обмотки двигуна.

Зазвичай дію динамічних ударів компенсують механічними або електромагнітними способами. До них слід віднести наявність маховика в електромеханічних системах з м'якою механічною характеристикою двигуна, регулювання жорсткості пружних муфт і використання автоматичної системи збудження з можливістю форсування напруги.

Висока жорсткість механічної характеристики синхронного двигуна не дає змоги застосовувати маховик як демпферний механізм. Тому такий спосіб втрачає сенс, як потенційно можливий.

Є спосіб компенсації ударних навантажень введенням в кінематичну схему пружних муфт. Проте слід зазначити, що випадок застосування абсолютно жорсткого зв'язку виявив непрацездатність системи через її значну коливальность [1].

Крім механічних підходів розв'язання проблеми роботи синхронного електропривода, не слід забувати про застосування автоматичної системи керування збудженням.

Спосіб електромагнітного демпфування коливань кута навантаження здебільш завдяки контуру збудження [23] забезпечується форсуванням напруги збудження із заданими швидкістю і рівнем. Складність реалізації способу полягає у неспроможності серійних автоматичних збудників забезпечити достатній рівень форсування напруги. Крим того питання щодо стійкості обмоток двигунів за умови різкозмінного підвищення напруги не є вирішеним.

Можливо вважати перспективним спосіб підвищення протидії синхронних приводів [24] ударним навантаженням шляхом прискорення швидкості форсування збудження завдяки розряду попередньо зарядженого конденсатора. Проте і в цьому випадку питання стійкості ізоляції двигуна має суттєві обмеження.

Автоматична система збудження [25], яка компенсує коливання за рахунок нелінійних зворотних зв'язків, досить добре поглинає збурення малої амплітуди. Поруч з тим про екстремальні значення збурень такого сказати не можна.

Доцільність методу програмного керування напругою збудника показана в [26]. Суть методу - живлення обмотки збудження періодичною змінною напругою, яка одночасно зменшує періодичну складову електромагнітного моменту і частково підвищує його середню складову. Недоліком методу є необхідність

використання реверсивного збудника.

Сутність методу [27] полягає в оптимальному налагодженні регулятора та пружності системи в наперед оговорених умовах. Однак і такий спосіб лише частково відповідає вимогам компенсації екстремальних навантажень.

Метод [28], [29] демонструє потенційну можливість компенсації пускових струмів за рахунок випереджаючого збільшення напруги збудження на прогнозований провал напруги живлення. Утім, ця система збудження адаптована для роботи синхронного генератора.

Проаналізовані методи керування системою збудження мало відповідають умовам нейтралізації шкідливих зусиль в якірних котушках синхронних приводів. Тому в даній роботі поставлена задача реалізується, базуючись на публікаціях [30], [31], що за нових умов дозволить узагальнити головні параметри системи збудження потужних синхронних приводів механізмів із періодичною появою ударного навантаження.

III. МЕТА РОБОТИ

Узагальнити параметри оригінальної системи керування збудженням синхронних приводів для розповсюдження їх результатів на потужні виробничі комплекси, які працюють у режимах періодичних ударних навантажень, що сприятиме ліквідації аварійності через руйнування конструкції електромагнітної системи синхронних машин механізмів даного типу.

IV. ВИКЛАДЕННЯ ОСНОВНОГУ МАТЕРИАЛУ І АНАЛІЗ ОТРИМАННИХ РЕЗУЛЬТАТІВ

Обґрунтування оптимізації форсування і параметрів системи регулювання збудження.

Досвід досліджень джерела [31] констатує, що існуючі системи автоматичного керування синхронним приводом не спроможні компенсувати екстремальну складову струму якоря, яка виникає в наслідок різко-змінних навантажень. Тому роботу системи збудження механізмів із ударним навантаження пропонується розділити на два етапи.

Етап перший – здійснення демпфування максимального збурення (рис. 1, 1) шляхом завчасного форсування напруги збудження, де рівень форсування визначається шляхом розв'язання оптимізаційної задачі з обмеженнями:

- кратність форсування збудження 1...1,75 номінального, обмежено можливістю збудника;
- межі кратності жорсткості з'єднувальної муфти 1...4, що лімітується максимумом коливальності системи;
- можливий інтервал часу завчасного ввімкнення форсування визначається п'ятьма постійними часу обмотки збудження, що забезпечує гарантоване завершення перехідного процесу.

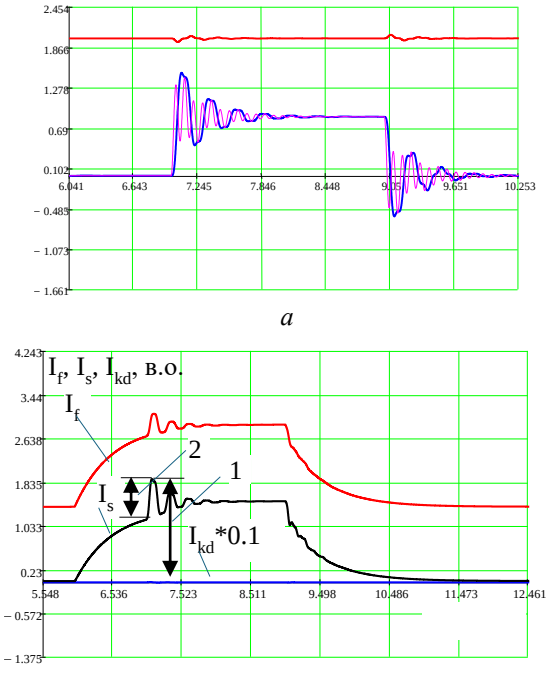
Як функцію мети запропоновано використовувати мінімум середньоквадратичного відхилення від усталеного значення струму якоря під час накиду номінального навантаження

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=0}^{n} \frac{\left(I_i - I_{уст}\right)^2}{n-1}} \qquad (1)$$

де I_i, $I_{уст}$ – миттєве і стале значення струму якоря,

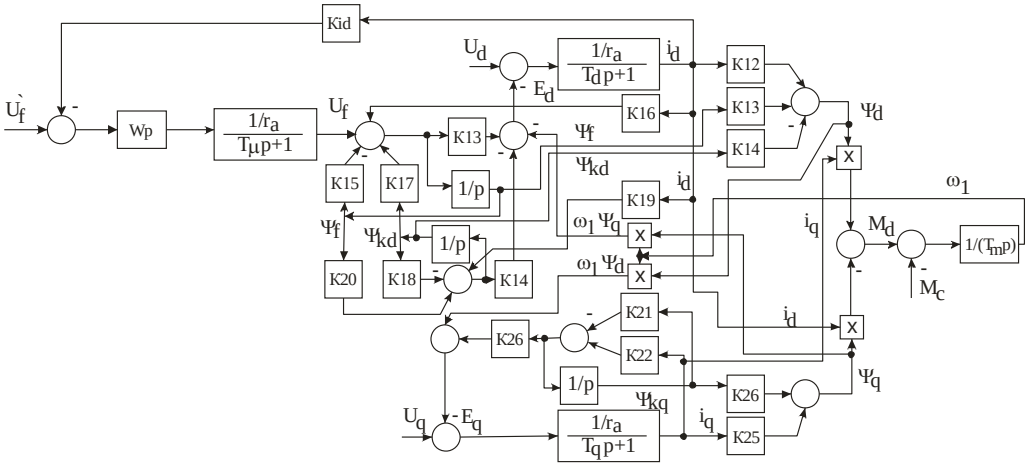
n – число дискрет.

Розв'язання задачі пропонується виконати за допомогою вбудованої функції Minimize пакета MathCAD, де використовують градієнтний спосіб пошуку оптимального рішення. Тобто рівень форсування, який відповідає цій умові і забезпечує кращій спосіб демпфування максимального збурення струму якоря (рис. 1, 1). На прикладі рис. 2 перепад струму якоря по відношенню до сталого холостого режиму вдалось зменшити приблизно до 30 %.



а) ω – швидкість; Mu_s, M_s – пружний і моторний моменти; б) I_f – струми збудження, I_s – якоря та I_{kd} – демпферної обмоток, 1 – існуючий і 2 – запропонований перепад струму якоря

Рисунок 2. Результат вирішення оптимізаційної задачі на прикладі двигуна СДМЗ-2-64-40 УХЛ4



W_p – перехідна функція регулятора; k_p, T_μ – підсилення та постійна часу перетворювача напруги збудження; k_{id} – коефіцієнт підсилення зворотного зв'язку; К1-К26 – розрахункові коефіцієнти

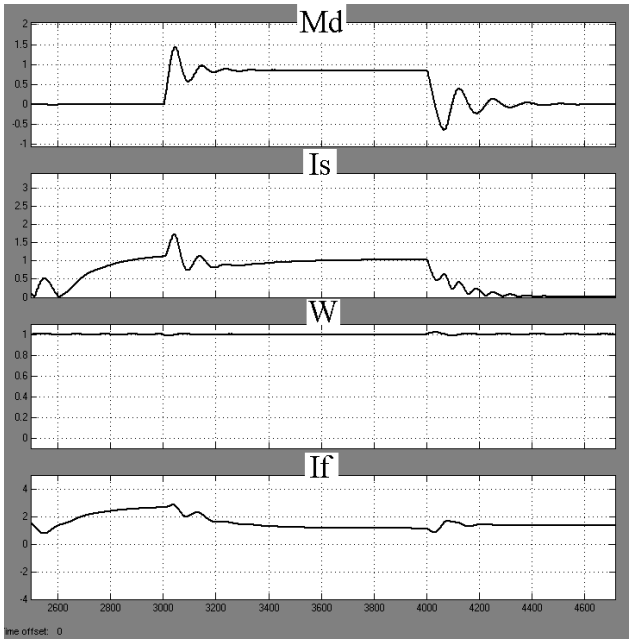
Рисунок 3. Структурна схема системи регулювання струму i_d [31]

Другий етап – компенсація залишкової коливальності струму якоря (рис. 1, 2) за допомогою класичного ПІ–регулятора шляхом стабілізації повздовжнього струму якоря засобами контуру збудження (структура рис. 3). Як згадувалось у [31], налагодження регулятора на модульний оптимум робить систему частково коливальною. Уникнути надлишкової коливальності вдалося за рахунок зменшення коефіцієнта підсилення інтегральної ланки до 22 % від розрахункового значення [31]. Додатково в системі регулювання на вході встановлюється задавач інтенсивності, який забезпечує завчасне підвищення напруги збудження за експоненціальним законом струму якоря, що суттєво знижує динаміку. Результат моделювання синхронного привода на базі двигуна СДМЗ-2-64-40 УХЛ4 за визначеними параметрами системи збудження наведено на рис. 4.

Таким чином, маємо комбіновану систему керування збудженням, яка складається з двох етапів і дозволяє максимально знизити динаміку електромеханічних систем такого типу.

Визначення рівня форсування збудження в функції навантаження (етап 1). Практика застосування наукових результатів [31] є особливо цінною у випадку її поширення на ряд класів електромеханічних систем. В нашому випадку основними механізмами, на які розраховано впровадження, є металургійні машини пластичної обробки металів та гірничі машини дробарно-подрібнювального циклу. Їх об'єднує принцип роботи, який полягає у функції хаотичного роздавлювання продуктів подрібнення або створення бажаної форми металу, що відбувається, утому числі, протягом періодичних ударних навантажень.

В основу досліджень даного етапу покладено те, що для означених механізмів, зазвичай, використовують синхронні двигуни від сотень до тисяч кіловат. Двигуни такого типу є унікальними електричними машинами, де побудова навіть двох двигунів є серією. Це дозволяє стверджувати, що для обраного ряду електродвигунів потужностей рівня 1600…4000 кВт і діапазону швидкостей 75…150 об/хв охоплення кількості унікальних двигунів є досить значним.



Md – моторний момент, в.о.; Is – струм якоря, в.о.; W – швидкість двигуна, в.о.; If – струм збудження, в.о. Розгортка по горизонталі час, в.о.

Рисунок 4. Моделювання ударного навантаження двигуна СДМЗ-2-64-40 УХЛ4 засобами Simulink

Інший аспект досліджень, на який слід звернути увагу – це те, що протягом початкових експериментів було встановлено несуттєвий вплив пружних елементів електромеханічних систем, а саме важливе у випадку модернізації існуючого обладнання, регулювання параметру пружності муфти ускладнено або неможливо зовсім в силу конструктивних особливостей пружного елементу. Тому при проведенні досліджень цього етапу було прийнято рішення до звуження переліку факторів впливу оптимізаційної задачі. Їх обмежено тільки рівнем параметру форсування контуру збудження за одночасного контролю величини середньоквадратичного відхилення поточного значення струму якоря.

У якості дослідних двигунів прийняті наступні електричні машини табл. 1: СДМЗ-2-22-34-60 УХЛ4; СДС-19-46-40 УХЛ4; СДС-19-56-40 УХЛ4; СДМЗ-2-21-64-40 УХЛ4; СДМЗ-2-24-59-80 УХЛ4. Вхідний матеріал для моделювання взято із розрахункових формулярів заводу виробника унікальних потужних електричних машин.

Також, попередніми дослідженнями установлено наявність впливу рівня навантаження на величину завдання на збудження. В програмі випробувань навантаження варіювалось у межах від 0,6 до 1 номінального, чого цілком достатньо аби охопити усі можливі варіанти навантаження. Щодо форсування, то у цьому випадку межі оптимальних значень змінювались від 0,8 до 1,75 номінального.

Для кожного типу двигуна розроблене програмне забезпечення за принципом, який показано вище (етап 1). Змінюючи по черзі вхідні дані двигунів та рівень навантаження в MathCad алгоритмі отримано фактичні результати параметру рівня форсування табл. 3 відхилення табл. 2, які далі представлені у графічній формі (рис. 5).

Таблиця 1. Головні паспортні параметри двигунів

Параметр	СДМЗ-2-22-34-60 УХЛ4	СДС-19-46-40 УХЛ4	СДС-19-56-40 УХЛ4	СДМЗ-2-21-64-40 УХЛ4	СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4
$P_н$, кВт	1600	2000	2500	3150	4000
$n_н$, об/хв	100	150	150	150	75
$J_д$, кг·м^2	23250	12750	15000	19325	250000
$J_н$, кг·м^2	6129	2621	2621	5161.2	51612
Мн , в.о.	0.832	0.863	0.856	0.859	0.853

$M_H = \dfrac{\Omega}{M_Д}$ - відносний номінальний момент навантаження,

де Ω - базова кутова швидкість, $M_Д$ - базовий номінальний момент двигуна та середньоквадратичного

Для отриманих даних табл. 2 та 3 знайдені залежності у вигляді ліній тренду, які дозволяють залежно від типу двигуна і конкретного навантаження визначити бажаний рівень збудження, який забезпечить мінімум динамічного зусилля, що діє в обмотках якоря у момент прикладання максимально ударного навантаження. Універсальне рівняння поліномів має вигляд

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \qquad (2)$$

де y – функція пошуку, a,b,c – коефіцієнти; x – рівень навантаження в долях номінального, в.о.

Параметри коефіцієнтів, для отримання значень функції пошуку (Kf – кратність форсування збудження, σ – незміщене стандартне відхилення) та коефіцієнт детермінації полінома R² зведені в табл. 4.

Таблиця 2. Матриця відповідності середньоквадратичного відхилення

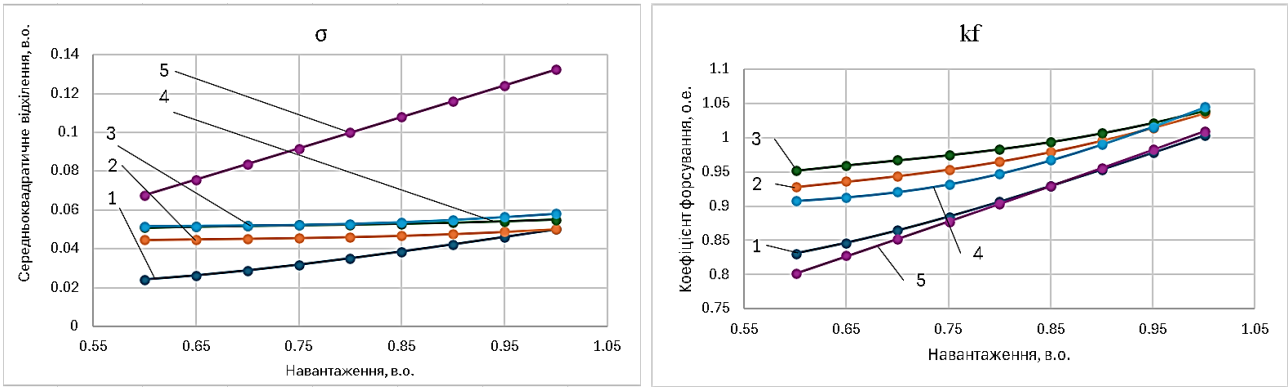
k_{mc}	СДМЗ-2-22-34-60 УХЛ4	СДС-19-46-40 УХЛ4	СДС-19-56-40 УХЛ4	СДМЗ-2-21-64-40 УХЛ4	СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4
код	1	2	3	4	5
0.6	0.02412	0.044579	0.050885	0.051538	0.067657
0.65	0.026205	0.044918	0.05141	0.051685	0.075683
0.7	0.028787	0.045229	0.05181	0.051855	0.083719
0.75	0.031771	0.045591	0.05215	0.052175	0.091775
0.8	0.035062	0.046076	0.052495	0.052747	0.099857
0.85	0.038582	0.046743	0.052906	0.05363	0.107966
0.9	0.042274	0.047632	0.053434	0.054841	0.116102
0.95	0.046095	0.048762	0.054118	0.056367	0.124261
1	0.050018	0.050136	0.054985	0.05818	0.132439

Таблиця 3. Матриця показника форсування збудження

kf

k_{mc}	СДМЗ-2-22-34-60 УХЛ4	СДС-19-46-40 УХЛ4	СДС-19-56-40 УХЛ4	СДМЗ-2-21-64-40 УХЛ4	СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4
код	1	2	3	4	5
0.6	0.830894	0.927888	0.951465	0.907494	0.801344
0.65	0.846382	0.935692	0.959387	0.912831	0.826565
0.7	0.864411	0.9439	0.966662	0.920353	0.851891
0.75	0.884536	0.953432	0.974226	0.931503	0.87737
0.8	0.906304	0.964984	0.982931	0.946932	0.903052
0.85	0.929322	0.978948	0.993444	0.966515	0.928983
0.9	0.953268	0.995424	1.006175	0.989637	0.955195
0.95	0.977879	1.014286	1.021281	1.015507	0.981714
1	1.00294	1.035286	1.038709	1.043376	1.008551

де k_{mc} – коефіцієнт рівня навантаження від номіналу



а *б*

а) – середньоквадратичне відхилення (див. табл.2); б) – коефіцієнт форсування збудження (див. табл.3)

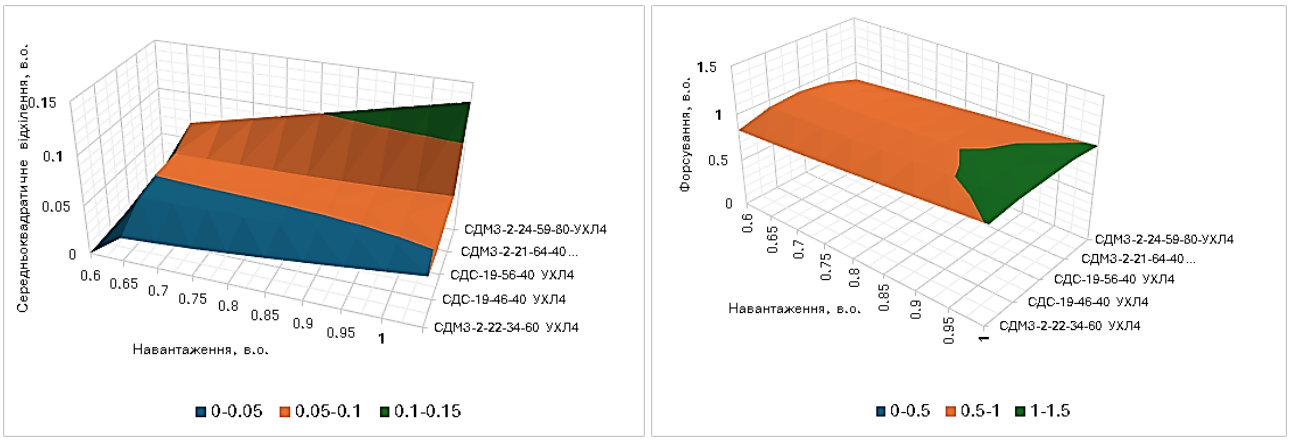
Рисунок 5. Фактичні результати моделювання

Таблиця 4. Параметри поліномів за типами двигунів і функції навантаження

Двигун, тип	Функція пошуку	Коефіцієнти поліному			R^2
		a	b	c	
СДМЗ-2-22-34-60 УХЛ4	Kf	0.2658	0.0097	0.7283	0.9998
	σ	0.0503	-0.0148	0.0147	0.9997
СДС-19-46-40 УХЛ4	Kf	0.413	-0.3961	1.0179	0.9997
	σ	0.0319	-0.0378	0.0559	0.9968
СДС-19-56-40 УХЛ4	Kf	0.413	-0.3961	1.0179	0.9997
	σ	0.0109	-0.008	0.0519	0.9919
СДМЗ-2-21-64-40 УХЛ4	Kf	0.709	-0.7927	1.1279	0.9998
	σ	0.0525	-0.068	0.0736	0.9981
СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4	Kf	0.0473	0.4418	0.5193	1
	σ	0.0048	0.1543	-0.0266	1

Найбільш зручним для аналізу, протягом виконання досліджень, є побудова отриманих даних у вигляді функції двох змінних. Тому із табличного представлення функцій (табл. 2 і 3) побудовано у середовищі програмного продукту Excel розділу 3D діаграми рис. 6.

Щодо побудови автоматичних систем керування збудженням синхронних приводів промислового типу необхідні значення форсування, як алгоритм керування мають бути завантажені у пам'ять контролера у вигляді таблиці до початку роботи привода. Вибір бажаного параметру форсування, як згадувалось, визначається типом двигуна та поточним навантаженням.



а *б*

а) – середньоквадратичне відхилення; б) – рівень форсування

Рисунок 6. Графіки функцій пошуку задачі оптимізації

Визначення параметрів складових автоматичної системи збудженням (етап 2). За запропонованим алгоритмом побудови комбінованої системи керування етап 2 передбачає визначення сімейства характеристик, які включають рівні коефіцієнтів підсилення для задавача інтенсивності та ПІ-регулятора із корегованою ланкою інтегрування. Ці параметри суттєво визначають дію залишкової коливальності струму якоря, що також впливає на динамічне зусилля в обмотках двигуна.

Відомий вплив навантаження на параметри комплексної системи керування на першому етапі має тонке налагодження. Щодо параметрів регулятора та задавача інтенсивності, то їх налагодження виконано на максимальне навантаження, що гарантовано дозволить працювати системі збудження в найважчих умовах.

За поточних досліджень прийнято, що як і у попередніх розрахунках [31], кореговане значення підсилення інтегральної ланки взято у розмірі 22 % від розрахованого за модульним оптимумом.

Параметри автоматичної системи збудження визначено також за MathCAD-алгоритмом розв'язання оптимізаційної задачі. При цьому розрахункові рівняння мають вигляд:

Підсилення задавача інтенсивності

$$k_{iz} = \frac{r_f}{x_f - x_{ad} \cdot \dfrac{x_{ad}}{x_{ed}}}; \qquad (3)$$

підсилення пропорційної ланки ПІ-регулятора

$$k_p = \frac{T_d \cdot r_a}{2k_n \left[x_{ad} \left[\dfrac{1}{x_f - x_{ad} \dfrac{x_{ad}}{x_{ed}}} - \dfrac{x_{ad}}{x_{ed}} \cdot \dfrac{1}{x_f - x_{ad} \dfrac{x_{ad}}{x_{ed}}} \right] \right] \cdot k_{id} \cdot T_\mu}; \qquad (4)$$

підсилення інтегральної ланки ПІ-регулятора

$$k_i = \frac{r_a}{2k_n \left[x_{ad} \left[\dfrac{1}{x_f - x_{ad} \dfrac{x_{ad}}{x_{ed}}} - \dfrac{x_{ad}}{x_{ed}} \cdot \dfrac{1}{x_f - x_{ad} \dfrac{x_{ad}}{x_{ed}}} \right] \right] \cdot k_{id} \cdot T_\mu}, \qquad (5)$$

де r_a, r_f – активний опір якоря і збудження, в.о.; x_{ad}, x_{ed}, x_f – реактивні опіри реакції якоря, розсіювання демпферної обмотки та обмотки збудження, в.о.; k_n, T_μ – коефіцієнт підсилення та постійна часу перетворювача напруги, в.о.; T_d – електромагнітна постійна за віссю d, в.о.

Виходячи із визначених параметрів і моделі, яку побудовано на структурі рис. 3, виконано перевірку

працездатності синхронного привода.

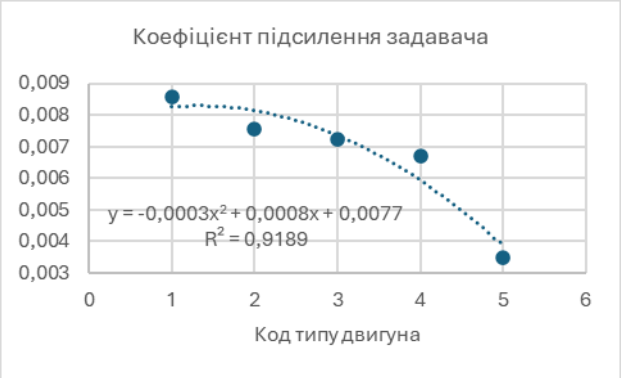
Кінцевий результат визначення кількісних значень коефіцієнтів підсилення при побудові ліній тренду ставляться у залежність від коду двигуна із переліку табл. 5.

Розрахунки, які проведені для кожного типу двигуна, дали змогу визначити увесь перелік необхідних коефіцієнтів системи керування синхронного приводу (табл. 5). На основі цих даних виконано побудову лінії тренду, що зображено на рис. 7. Усі діаграми мають рівняння математичного опису ліній тренду з оцінкою якості у вигляді коефіцієнта детермінації. Їх значення є таким, що дорівнюють величині 0,9, що цілком задовольняє рівню точності необхідного для технічних розрахунків.

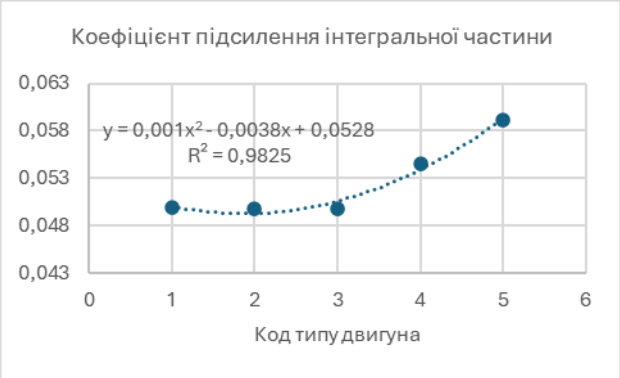
Проведений цикл досліджень свідчить про принципову можливість мінімізації динамічних зусиль в обмотках якоря для окресленого переліку електродвигунів. Як наслідок, це може сприяти захисту конструкцій синхронних приводів від аварій, пов'язаних із руйнуванням обмоток якоря, а дані можуть бути рекомендовані для використання у проєктній та експлуатаційній практиці.

Таблиця 5. Відповідність типу двигуна, коду і коефіцієнтів підсилення

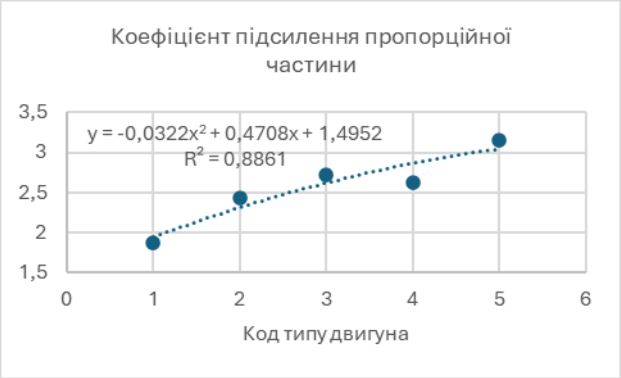
Тип двигуна	Код двигуна	Коефіцієнти підсилення		
		kiz, задавач інтенсивності	ki, інтегр-на частина	kp, пропор-на частина
СДМЗ-2-22-34-60 УХЛ4	1	0.0086	0.0499	1.8598
СДС-19-46-40 УХЛ4	2	0.0076	0.0498	2.4228
СДС-19-56-40 УХЛ4	3	0.0072	0.0498	2.7166
СДМЗ-2-21-64-40 УХЛ4	4	0.0067	0.0545	2.6160
СДМЗ-2-24-59-80 УХЛ4	5	0.0035	0.0592	3.1507



а



б



в

Коефіцієнти підсилення а) – задавача; б) – інтегральної і в) – пропорційної частини

Рисунок 7. Результати цифрового експерименту

V. ВИСНОВКИ

- Тенденція розвитку потужних технологічних машин металургійного та дробано-подрібнювального циклу супроводжується впровадженням переважно синхронного приводу, який має абсолютно жорстку механічну характеристику. У цьому випадку, використання інерційних

компенсаторів ударних навантажень втрачає сенс, а відсутність системи депфування різко-змінних навантажень викликає суттєві динамічні зусилля в обмотках двигуна, що руйнує їх конструкцію.

- Попередніми дослідженнями встановлено, що відомі автоматичні системи керування збудженням синхронних двигунів неспроможні компенсувати екстремальні навантаження. Тому для досягнення мети компенсації ударних навантажень, система керування збудженням повинна працювати порізному на інтервалі екстремального збурення і на інтервалі залишкової коливальності.
- Оригінальна послідовність, яка успішно сприяє компенсації ударних навантажень, передбачає завчасне форсування напруги збудження, рівень якої визначається розв'язанням оптимізаційної задачі і відповідним налагодженням коефіцієнтів підсилення задавача інтенсивності та ПІ-регулятора збудження, який стабілізує повздовжній струм якоря.
- Механізми пластичної обробки металів застосовують виключно унікальні потужні електричні двигуни, де серією вважається побудова навіть двох електричних машин. Тому обраний перелік із п'яти серійних двигунів цілком може вважатись таким, що охоплює достатню кількість об'єктів для отримання узагальненого значення форсування та параметрів автоматичної системи керування збудженням.
- При визначені узагальнених параметрів систем збудження встановлено, що пружність з'єднувальних муфт між двигуном та механізмом мають обмеження стосовно можливості їх регулювання, а на існуючих об'єктах – їх регулювання неможливе взагалі. Тому умови визначення узагальнених параметрів обмежено фактором впливу, який базується виключно на зміні напруги збудження при фіксації штатної пружності з'єднувальної муфти.
- Узагальнені параметри форсування суттєво залежать від типорозміру труби прокатки. Тому цей параметр оптимізації визначається із врахуванням ряду навантажень у межах від 0,6 до 1 номінального, чого цілком достатньо для охоплення усього можливого спектру.
- Узагальнені параметри підсилення задавача інтенсивності та ПІ-регулятора розраховуються для максимального навантаження, що забезпечить гарантовану працездатність системи збудження для найважчих умов.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

[1] Розробка рекомендацій з експлуатації синхронного двигуна головного приводу автомат-стану прокатки труб ООО "ІНТЕРПАЙП НІКО ТЬЮБ": Звіт з НДР (заключ.) / Державний ВНЗ «НГУ»; Науково-дослідна робота виконана згідно договору №1120/030383 від 04.12.2012 м. - Дніпро, 2013. - 34 с. іл.

[2] Гречаний О., Васильченко Т., Власов А., Кармазін М. Аналіз можливих шляхів підвищення продуктивності обладнання потокових ліній прокатних цехів / О. Гречаний, Т. Васильченко, А. Власов, М. Кармазін // Вісник Херсонського національного технічного університету. - 2021. - № 3. - С. 36-42. URL: https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2021.3.4.

[3] Рахманов С.Р. Динаміка стрижневої системи механізму утримання оправки прошивного стану трубопрокатного агрегату / С. Рахманов // Матеріали Міжнародної конференції «Сучасні напрями виробницва зварних і безшовних труб із чорних і кольорових металів», Дніпропетровськ. – 2007. С.45 – 51.

[4] Рахманов С.Р., Морозова Л.А. Динаміка лінії приводу стану гвинтової прокатки труб. / С. Р. Рахманов, Л.А Морозова // Вібрації в техніці та технологіях, 2009. - № 2 (54). - С. 76-82.

[5] Рахманов С.Р. Дослідження динаміки процесу прошивки трубної заготовки на прошивному стані / С. Р. Рахманов // Вібрації в техніці та технологіях. - 2011. - № 1. - С. 46-52. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/vvtt_2011_1_10

[6] Рахманов С. Р., Лагутин Б. Н., Тополов В. Л., Байджанов С.М. Особливості функціонування і шляхи зниження динамічних навантажень в лінії привода автоматичного стану трубопрокатного агрегату з зазором в зчленуваннях / С. Р. Рахманов, Б. Н. Лагутин, В. Л. Тополов, С.М. Байджанов // Вібрації в техніці та технологіях, 2013. - №(3), С. 85-91.

[7] Рахманов С. Р.Особливості функціонування головної силової лінії автоматичного стану трубопрокатного агрегату з врахуванням зазорів в зчленуваннях / С. Р. Рахманов // Металургійна і гірничорудна промисловість. - 2015. - № 6. - С. 106-113. - Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/MGRP_2015_6_24

[8] Рахманов С. Р., Вишинський В. Т. Дослідження динаміки робочої кліті автоматичного стану трубопрокатного агрегату / С. Р. Рахманов, В. Т. Вишинський // Металургійна і гірничорудна промисловість. - 2018. - № 4. - С.74-80.

[9] Балакін В.Ф., Перчаник В.В., Богдан Д.А., Угрюмов Ю.Д., Кадилишков С.В. Шляхи розвитку процесів гарячої прокатки труб / В.Ф. Балакін, В.В.Перчаник, Д.А.Богдан, Ю.Д.Угрюмов, С.В. Кадилишков // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць, 2018. - Випуск 3(116). – С.104–109.

[10] Хацкелян І.П., Поворотній В.В., Вишинський В.Т., Рахманов С.Р. Дослідження напружено-деформованого стану робочої кліті автоматичного стану ТПА 350 із застосуванням інформаційних технологій / І.П.Хацкелян, В.В.Поворотній, В.Т.Вишинський, С.Р. Рахманов // Комп'ютерне моделювання: аналіз, управління, оптимізація. – 2019. – № 2 (6). – С.83-90.

[11] Рахманов С. Р., Хацкелян И. П., Гармашов Д. Ю. Дослідження динаміки перехідних процесів на автоматичному стані трубопрокатного агрегату / С. Р.Рахманов, И. П.Хацкелян, Д. Ю Гармашов // Пластична деформація металів. – 2017. – С.203-209.

[12] Рахманов С.Р., Поворотний В.В. Динаміка елементів робочої кліті автоматичного стану ТПА 350 / С.Р.Рахманов, В.В. Поворотний // Металургійна та гірничорудна промисловість, 2020. - № 1 – С.57-70. DOI: 10.34185/0543-5749.2020-1-57-7

[13] Рахманов С.Р., Поворотний В.В. Дослідження динаміки елементів робочої кліті автоматичного стану ТПА 350 / С.Р.Рахманов, В.В. Поворотний // Чорна металургія. Бюлетень науково-технічної і економічної інформації. 2020. Т. 76. № 8. С. 830-840. Doi: 10.32339/0135-5910-2020-8-830-840

[14] Поворотній В. В. Підвищення ефективності роботи станів холодної прокатки труб шляхом раціонального синтезу деталей робочих клітей: дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.05.08 - Машини для металургійного виробництва. Дніпро, 2021. 203 с.

[15] Krot P., Prykhodko I., Raznosilin V., Zimroz R. Model Based Monitoring of Dynamic Loads and Remaining Useful Life Prediction in Rolling Mills and Heavy Machinery // Ball A., Gelman L., Rao B. (eds) Advances in Asset Management and Condition Monitoring. Smart Innovation, Systems and Technologies, 2020. - vol 166.

[16] Krot P.V. Dynamics and diagnostics of the rolling mills drivelines with non-smooth stiffness characteristics / P.V. Krot // Proc. of the 3rd Int. Conf. on Nonlinear Dynamic, ND-KhPI2010, September 21-24, 2010, Kharkov, Ukraine. P. 115-120.

[17] Райхман Э.Н. Стан та перспективи впровадження синхронного електропривода в металургії. М.: Інформелектро, ТС-8, 1980. - 51 с.

[18] Демпфування ударних навантажень гірничо-металургійних механізмів засобами синхронного привода / Бородай В.А., Боровик Р.А., Котлярова Е.В. // Гірнича електромеханіка та автоматика: Наук.-техн. зб. – 2015. – Вип. 95. – С. 47-50.

[19] Borodai V. Efficient Transient Modes of Synchronous Drive for Mining and Smelting Mechanisms [Text] / V. Borodai, R. Borovyk, O. Nesterova. // Mechanics, Materials Science & Engineering. – 2017. –Vol.8. – No.8. – P. 133-142.

[20] Бялобржеський О. В. Система керування динамічними режимами збудження синхронного двигуна / О. В. Бялобржеський, Д. В. Слободенюк / Гірнича електромеханіка та автоматика : наук. - техн. зб. / [гол. ред. Г. Г. Півняк] ; М-во освіти і науки, молоді та спорту України, Держ. вищий навч. закл. "Нац. гірн. ун-т" - Дніпропетровськ : НГУ, 2013. - Вип. 91. – С. 94-98. http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/158000

[21] Чугунов Д.В., Нізімов В.Б. Забезпечення стійкості роботи синхронних двигунів при посадці напруги в мережі або прикладанні значного навантаження / Д.В.Чугунов, В.Б. Нізімов // Збірник наукових праць ДДТУ, 2024. - № 2(45). С.112-116. http://sj.dstu.dp.ua/article/view/318277/308644

[22] Хоменко В. І., Нізімов В. Б., Количев С. В. Підвищення стійкості роботи синхронної машини шляхом удосконалення системи збудження. / В. І.Хоменко, В. Б. Нізімов, С. В. Количев // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2015. - 1/8(73). – P. 31–36. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.36498

[23] Линьков С.А. Аналіз систем управління синхронних електроприводів [Текст] / С.А. Линьков, А.С. Сарваров, І.В. Бачурін // ЕСіК. Серія „Теорія і практика автоматизованого електропривода". – 2014. – №2(23). – С. 25-28.

[24] Слободенюк Д.В. Ємнісний накопичувальний пристрій у контурі збудження синхронної машини для форсування та гасіння поля [Текст] / Д.В. Слободенюк, О.В. Бялобржеський // Електротехніка і Електромеханіка. – 2015. – №2. – С. 16-20.

[25] Babaei M. Nonlinear feedback control of chaos in synchronous reluctance motor drive systems [Text] / M. Babaei, J. Nazarzadeh, J. Faiz // IEEE International Conference. – 2008. – 4 p. doi: 10.1109/ ICIT. 2008.4608524.

[26] Кириченко В.І. Програмно керований збудник синхронних двигунів [Текст] / В.І. Кириченко, М.І. Школа, В.В. Кириченко, Р.О. Боровик // Наука та інновації. – К., 2006. – Т2. №3. – С. 28-37.

[27] Задорожня І.Н. Синтез електромеханіченої системи граничної ступені стійкості і мінімальної коливальності пружної механічної підсистеми [Текст] / І.Н. Задорожня, Н.А. Задорожній // Вісник НТУ «ХПІ». – 2017. – 27(1249). – С. 150-155.

[28] Пат. 62904 Україна, МПК (2010) H02M 1/08. Спосіб випереджаючого коригування генератором, що працює на асинхронний двигун / В.М. Рябенький, О.О. Ушкаренко, О.Я. Дубовик, А.В. Крилов; Заявник і патентовласник НУК ім. акад. Макарова. Заяв. №U201100491 від 26 вересня 2011 р.

[29] Пат. 62906 Україна, МПК (2010) H02M 1/08. Спосіб випереджаючого коригування генератором, що працює на асинхронний двигун / В.М. Рябенький, О.О. Ушкаренко, О.Я. Дубовик; Заявник і патентовласник НУК ім. акад. Макарова. Заяв. №U201100496 від 26 вересня 2011 р.

[30] Пат. № 123955 Україна. СПОСІБ РЕГУЛЮВАННЯ ЗБУДЖЕННЯ СИНХРОННИХ МАШИН / О.С. Бешта, В.А. Бородай, О.В. Балахонцев, Р.О. Боровик; заявник і власник патенту НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"; опубл. Бюл. № 26 30.06.2021.

[31] Бородай В.А. Компенсація різко-змінного струму якоря потужних синхронних приводів засобами автоматичної системи збудження із нестандартним алгоритмом керування [Текст] / В.А. Бородай, Р.О. Боровик, О.Ю. Нестерова //Електротехніка та електроенергетика. – 2018. – № 1 – С. 72-80. DOI 10.15588/1607-6761-2018-1-8.

Надійшла (Received) 04.08.2025;
Прийнята (Accepted) 12.09.2025;
Опублікована (Published) 22.10.2025;

GENERALIZED PARAMETERS OF THE EXCITATION SYSTEM OF A SYNCHRONOUS DRIVE WITH IMPACT LOAD

BORODAI V.A. Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0009-0007-7721-8752, e-mail: borodai.v.a@nmu.one;

BOROVYK R.O. Engineer, Senior Lecturer of the Department of Electric Drive, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5230-7747, e-mail: borovyk.r.o@nmu.one;

NESTEROVA O.YU. PhD, Associate Professor, Head of the Department of Philosophy and Pedagogy, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, https://orcid.org/0000-0002-5952-4664, e-mail: Nesterova.O.Yu@nmu.one.

Purpose. *To generalize the parameters of the original excitation control system for synchronous drives for the dissemination of their results to powerful production complexes operating in periodic shock load modes, which will contribute to the elimination of accidents due to the destruction of the electromagnetic system structure of synchronous machines of mechanisms of this type.*

Methodology. *The research used the provisions of the theory of electrical machines, the theory of automatic control, methods for solving optimization problems using the mathematical package MATHCAD, methods and techniques of structural modelling in the MATLAB environment of the SIMULINK component.*

Findings. *By solving the optimization problem, polynomial dependences of the forcing levels of the excitation system of the synchronous drive were obtained, taking into account the magnitude of the current load and the standard parameters of the elastic coupling, and also the parameters of the PI controller are determined with the refinement of the integral link coefficients, which allows avoiding excessive oscillations in the extreme load rollover process.*

Originality. *Taking into account the technological conditions of operation of the TPA-350 automatic machine tool for the production of solid-drawn pipes, an original sequence was proposed and polynomial dependences of the generalization of the main control parameters of the excitation system of a synchronous drive operating in the mode of periodic occurrence of extreme loads were obtained and the prospect of using this system as part of industrial exciters for powering inductor windings of powerful synchronous drives of metallurgical and crushing and grinding mechanisms is shown.*

Practical value. *The obtained polynomial dependences of the main parameters of the excitation control system forpowerful synchronous drives make it possible to recommend specific forcing values to manufacturers and designers, parameters of the PI controller and the intensity setter, which will avoid expensive repairs and downtime of the machine, which are associated with significant financial costs.*

Keywords: automatic state machine; powerful synchronous drive; excitation system; solution of optimization problem; mathematical and structural modelling; trend lines of generalized parameters.

REFERENCES

[1] Development of recommendations for the operation of the synchronous motor of the main drive of the automatic pipe rolling mill of OOO “INTERPIPE NIKO TUBE”: Research report (final) [Rozrobka rekomendacij z ekspluatacii' synhron-nogo dvyguna

golovnogo pryvodu avtomat-stanu prokatky trub OOO “INTERPAJP NIKO T"JuB”: Zvit z NDR (zakljuch.)]. *State University "NGU"; Research work was carried out under contract No. 1120/030383 dated 04.12.2012 - Dnipro, 2013. - 34 p. ill.* (in Ukrainian).

[2] Grechany O. M., Vasylchenko T., Vlasov A. O., Karmazin M. O.(2021). Analysis of possible ways to increase the productivity of equipment of rolling mill production lines [Analiz mozhlyvyh shljahiv pidvyshhennja produk-tyvnosti obladnannja potokovyh linij prokatnyh cehiv]. *Bulletin of Kherson National Technical University, 3, 36-42.* (in Ukrainian).

[3] Rakhmanov S.R. (2007). Dynamics of the rod system of the mandrel holding mechanism of the piercing mill of the pipe rolling unit.[Dynamika stryzhnevoi' systemy me-hanizmu utrymannja opravky proshyvnogo stanu truboprokatnogo agregatu]. *Materials of the International Conference "Modern Trends in the Production of Welded and Seamless Pipes from Ferrous and Nonferrous Metals", Dnipropetrovsk, 76-82.* (in Ukrainian).

[4] Rakhmanov S.R., Morozova L.A. (2009). Dynamics of the drive line of a screw pipe rolling mill. [Dynamika linii' pryvodu stanu gvyntovoi' prokat-ky trub.]. *Vibrations in Engineering and Technologies, 2 (54), 76-82.* (in Ukrainian).

[5] Rakhmanov S.R. (2011). Research into the dynamics of the piercing process of a pipe billet on a piercing mill. [Doslidzhennja dynamiky procesu proshyvky trub-noi' zagotovky na proshyvnomu stani]. *Vibrations in Engineering and Technologies,1, 46-52.* (in Ukrainian).

[6] Rakhmanov, S.R., Lagutin, B.N., Topolov, V.L., & Baidzhanov, S.M. (2013). Features of functioning and ways to reduce dynamic loads in the drive line of an automatic pipe rolling unit with a gap in the joints. [Osoblyvosti funkcionuvannja i shljahy znyzhennja dynamichnyh navantazhen' v linii' pryvoda avto-matychnogo stanu truboprokatnogo agregatu z za-zorom v zchlenuvannjah]. *Vibrations in Engineering and Technologies,3, 85-91.* (in Ukrainian).

[7] Rakhmanov, S.R. (2015). Features of the functioning of the main power line of the automatic pipe rolling unit, taking into account the gaps in the joints. [Osoblyvosti funkcionuvannja golovnoi' sylovoi' linii' avtomatychnogo stanu truboprokatnogo agre-gatu z vrahuvannjam zazoriv v zchlenuvannjah] *Metallurgical and mining industry,6, 106-113.* (in Ukrainian).

[8] Rakhmanov S. R., Vyshinsky V. T. (2018). Research on the dynamics of the working stand of an automatic pipe rolling mill [Doslidzhennja dynamiky robochoi' kliti avtomatych-nogo stanu truboprokatnogo agregatu]. *Metallurgical and mining industry, 4, 74-80.* (in Ukrainian).

[9] Balakin V.F., Perchanyk V.V., Bohdan D.A., Ugryumov Yu.D., Kadilyshkov S.V. (2018). Development paths of hot pipe rolling processes [Shljahy rozvytku procesiv garjachoi' prokatky trub]. *System technologies. Regional interuniversity collection of scientific papers, Dnipro, 3(116), 104–109.* (in Ukrainian).

[10] Khatskelyan I.P., Povorotniy V.V., Vyshinsky V.T., Rakhmanov S.R. (2019). Doslidzhennja napruzheno-deformovanogo stanu robochoi' kliti avtomatychnogo stanu TPA 350 iz zastosuvannjam informacijnyh tehnologij. [Doslidzhennja napruzheno-deformovanogo stanu robochoi' kliti avtomatychnogo stanu TPA 350 iz zastosuvannjam informacijnyh tehnologij]. *Computer modeling: analysis, control, optimization, 2 (6,83-90.* (in Ukrainian).

[11] Rakhmanov S.R., Hatskelyan I.P., Harmashov D.Yu. (2017). Study of the dynamics of transient processes on an automatic stand of a pipe rolling unit [Doslidzhennja dynamiky perehidnyh procesiv na avtomatychnomu stani truboprokatnogo agregatu]. *Plastic deformation of metals. 203-2209.* (in Ukrainian).

[12] Rakhmanov S.R., Povorotny V.V. (2020). Dynamics of the working frame elements of the automatic state TPA 350 [Dynamika elementiv robochoi' kliti avtomatychno-go stanu TPA 350]. *Metallurgical and mining industry, 1, 57-70.* (in Ukrainian).

[13] Rakhmanov S.R., Povorotnyi V.V. (2020). Study of the dynamics of the working frame elements of the automatic mill TPA 350 [Doslidzhennja dynamiky elementiv robochoi' kliti avtomatychnogo stanu TPA 350]. *Ferrous Metallurgy. Bulletin of Scientific, Technical and Economic Information. 76, 8, 830-840.* (in Ukrainian).

[14] Povorotny V.V. (2021). Increasing the efficiency of cold pipe rolling mills through rational synthesis of work stand parts [Pidvyshhennja efektyvnosti roboty staniv holod-noi' prokatky trub shljahom racional'nogo synte-zu detalej robochyh klitej], *dis. ... candidate of technical sciences: special. 05.05.08 - Machines for metallurgical production. Dnipro, 203.* (in Ukrainian).

[15] Krot, P., Prykhodko, I., Raznosilin, V., Zimroz, R. (2020). Model Based Monitoring of Dynamic Loads and Remaining Useful Life Prediction in Rolling Mills and Heavy Machinery. In: Ball, A., Gelman, L., Rao, B. (eds) Advances in Asset Management and Condition Monitoring. Smart Innovation, Systems and Technologies, vol 166. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57745-2_34

[16] Krot, P.V. (2010). Dynamics and diagnostics of the rolling mills drivelines with non-smooth stiffness characteristics. *Proc. of the 3rd Int. Conf. on Nonlinear Dynamic, ND-KhPI2010, September 21-24, 2010, Kharkov, Ukraine,. 115-120.* (in

Ukrainian).

[17] Reichman, E.N.(1980). Status and prospects of implementing synchronous electric drives in metallurgy [Stan ta perspektyvy vprovadzhennja synhronnogo elektropryvoda v metalurgii']. *M.: Informelektro, TS-8, 51.* (in Russian).

[18] Boroday V.A., Borovyk R.O., Kotlyarova E.V. (2015). Damping of shock loads of mining and metallurgical mechanisms by means of a synchronous drive [Dempfuvannja udarnyh navantazhen' girnycho-metalurgijnyh mehanizmiv zasobamy synhronno-go pryvoda]. *Mining electromechanics and automation: Scientific and technical collection, 95, 47-50.* (in Ukrainian).

[19] Borodai V., Borovyk R., Nesterova O. (2017). Efficient Transient Modes of Synchronous Drive for Mining and Smelting Mechanisms. *Mechanics, Materials Science & Engineering.Vol.8,8, 133-142.* (in Austrian).

[20] Byalobrzesky, O. V., Slobodenyuk D. V. (2013). Dynamic excitation control system for a synchronous motor [Systema keruvannja dynamichnymy rezhymamy zbudzhennja synhronnogo dvyguna]. *Mining electromechanics and automation: scientific - technical collection / [ed. chief. G. G. Pivnyak]; Ministry of Education and Science, Youth and Sports of Ukraine, State Higher Educational Institution "National Mining University" - Dnipropetrovsk: NGU, 91, 94-98.* (in Ukrainian).

[21] Chugunov D.V., Nizimov V.B. (2024). Ensuring the stability of synchronous motors during voltage drops in the network or when applying a significant load [Zabezpechennja stijkosti roboty synhronnyh dvyguniv pry posadci naprugy v merezhi abo prykladanni znachnogo navantazhennja]. *Collection of scientific works of DSTU, 2(45),*112-116. (in Ukrainian).

[22] Khomenko, V. I., Nizimov, V. B., & Kolychev, S. V. (2015). Increasing the stability of the synchronous machine by improving the excitation system. [Pidvyshhennja stijkosti roboty synhronnoi' ma-shyny shljahom udoskonalennja systemy zbudzhennja]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1/8(73), 31–36.* (in Ukrainian).

[23] Linkov S.A., Sarvarov A.S., Bachurin I.V. (2014). Analysis of control systems for synchronous electric drives [Analiz system upravlinnja synhronnyh elektropryvodiv]. *ESiK. Series "Theory and Practice of Automated Electric Drive", 2(23), 25-28.* (in Ukrainian).

[24] Slobodenyuk D.V., Bialobrzhesky O.V. (2015). Capacitive storage device in the excitation circuit of a synchronous machine for field forcing and quenching. [Jemnisnyj nakopychuval'nyj prystrij u konturi zbudzhennja synhronnoi' mashyny dlja forsuvannja ta gasinnja polja]. *Electrical Engineering and Electromechanics, 2, 16-20.* (in Ukrainian).

[25] Babaei M., J. Nazarzadeh, J. Faiz. (2008).Nonlinear feedback control of chaos in synchronous reluctance motor drive systems. *IEEE International Conference,4.* (in Russian).

[26] Kyrychenko V.I., Shkola M.I., Kyrychenko V.V., Borovyk R.O. (2006). Program-controlled exciter for synchronous motors [Programno kerovanyj zbudnyk synhronnyh dvyguniv]. *Science and Innovation, – K., T2, 3, 28-37.* (in Ukrainian).

[27] Zadorozhnya I.N., Zadorozhnyi N.A. (2017). Synthesis of an electromechanical system with a limiting degree of stability and minimal oscillation of an elastic mechanical subsystem [Syntez elektromehanichenoi' systemy granychnoi' stupeni stijkosti i minimal'noi' kolyval'nosti pruzhnoi' mehanichnoi' pidsystemy]. *Bulletin of NTU "KhPI", 27(1249), 150-155.* (in Ukrainian).

[28] Ryabenkyi V.M., Ushkarenko O.O., Dubovik O.Ya., Krylov A.V. (2010). Pat. 62904 Ukraine, MPK (2010) H02M 1/08. Method of forward correction by a generator operating on an asynchronous motor [Pat. 62904 Ukrai'na, MPK (2010) N02M 1/08. Sposib vyperedzhajuchogo koryguvannja genera-torom, shho pracjuje na asynhronnyj dvygun]. *Applicant and patent owner: NUK named after Acad. Makarov. Application No. U201100491 dated September 26, 2011.* (in Ukrainian).

[29] Ryabenky V.M., Ushkarenko O.O., Dubovyk O.Ya. (2010). Pat. 62906 Ukraine, MPK (2010) H02M 1/08. Method of forward correction by a generator operating on an asynchronous motor [Pat. 62906 Ukrai'na, MPK (2010) N02M 1/08. Sposib vyperedzhajuchogo koryguvannja genera-torom, shho pracjuje na asynhronnyj dvygun]. *Applicant and patent owner: NUK named after Acad. Makarov. Application No. U201100496 dated September 26, 2011.* (in Ukrainian).

[30] Beshta O.S., Borodai V.A., Balakhontsev O.V., Borovik R.O. (2021). Pat. No. 123955 Ukraine. Method of regulating excitation of synchronous machines [Pat. № 123955 Ukrai'na. Sposib reguljuvannja zbudzhennja synhronnyh mashyn]. *Applicant and patent owner National technical university "dnipro polytechnic"; publ. Bull. No. 26 06.30.2021.* (in Ukrainian).

[31] Boroday V.A., Borovyk R.O., Nesterova O.Yu. (2018). Compensation of sharply alternating armature current of powerful synchronous drives by means of an automatic excitation system with a non-standard control algorithm [Kompensacija rizko-zminnogo strumu jakorja potuzhnyh synhronnyh pryvodiv zasobamy avtomatychnoi' systemy zbudzhennja iz nestandartnym algorytmom keruvannja]. *Electrical Engineering and Power Engineering, 1, 72-80.* (in Ukrainian).