

УДК 681.513.7

О. А. Хребтова<sup>1</sup>  
С. А. Сергієнко<sup>1</sup>

## ЕЛЕКТРОПРИВІД МЕХАНІЗМУ ПІДЙМАННЯ ЗАТВОРА ЗЛИВНОЇ ГРЕБЛІ З КЕРОВАНИМ ПРОЦЕСОМ РУШАННЯ

<sup>1</sup>Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

На сьогодні актуальним є питання щодо виконання передпускової підготовки, рушання та пуску достатньо широкого класу технологічних механізмів, що характеризуються складним процесом формування моменту опору в початковий час рушання. Одним із прикладів є дводвигунний електропривод механізму підймання затвора зливної греблі. Система «електропривод механізму підймання—затвор—карман зливної греблі» складається з достатньої кількості підсистем, які взаємодіючи, визначають стан системи. Перехід системи з одного стану в інший може відбуватися неявно, безперервно або стрибкоподібно. Сучасні системи керованого електроприводу не відповідають усім вимогам виконання технологічного процесу. Це є підставою для пошуку технічних рішень, що забезпечують необхідну якість технологічного процесу з мінімальним споживанням електроенергії та зниження експлуатаційних витрат за рахунок застосування сучасних методів і засобів автоматизації.

Запропонована експертна система з нечіткою логікою формує сигнал задання частоти та напруги джерела живлення за оптимальним законом частотного керування. В результаті математичного моделювання встановлено, що процеси рушання та пуску в запропонованій системі, на відміну від систем керованого рушання з жорстко заданим законом частотного керування, характеризуються більшою тривалістю перехідного процесу, але струм набуває максимального значення лише на короткий час, що сприяє збереженню ресурсу електромеханічної системи за рахунок зменшення теплових і вібраційних навантажень.

**Ключові слова:** передпускова підготовка, рушання, експертна система, нечітка логіка.

### Вступ

Досить широкий клас електроприводів промислових механізмів зі складним технологічним процесом характеризується стохастичним, багатофакторним процесом формування навантаження на етапі рушання, розгону та руху. Одним з прикладів такого електропривода промислового механізму є дводвигунний електропривід механізму підймання затвора зливної греблі.

Така система електропривода виконується за схемою «дистанційний електричний вал» для забезпечення вирівнювання швидкісних характеристик електроприводів барабанів механізму підймання. Дводвигунний електропривід дозволяє формувати механічні характеристики спеціального виду шляхом зміни електромеханічних параметрів одного з двигунів. Недоліком цієї системи є те, що сумарна жорсткість механічної характеристики буде меншою, ніж жорсткість окремого двигуна в системі. При формуванні характеристик, відмінних від робочих, один з двигунів є переважаним. Це накладає обмеження на тривалість включення системи. Двигуни працюють переважно в режимі ПВ 15 % з діапазоном регулювання  $D = 8:1$  [1].

Головною умовою роботи системи «дистанційний електричний вал» є ідентичність параметрів пари основних електричних машин і пари допоміжних електричних машин, що знаходяться на одному валу з головними машинами та з'єднані між собою роторними ланцюгами. За відмінності параметрів хоча б однієї з пар машин спостерігається збільшення струмів роторних ланцюгів і, як наслідок, збільшення кута неузгодженості з нерівномірним розподілом навантаження. Процес підймання затвора з кармана зливної греблі супроводжується значними нерівнозначними моментами опору для кожного приводного двигуна, що призводить до «руйнування» електричного вала, зниження надійності і підвищення складності в обслуговуванні [2].

Під час проведення технологічних робіт з підймання затвора з кармана зливної греблі електроприводом механізму підймання виникають аварійні ситуації, за рахунок значних теплових і вібраційних навантажень, що є причиною частого пошкодження електромеханічного обладнання, які в більшості випадків виникають саме в момент переходу робочого механізму зі стану спокою у стан руху [3]. Головною причиною є значні сили і моменти опорів, що виникають під час рушання електромеханічної системи [4].

Процес роботи технологічного механізму під час виконання підймання затвора можна подати у вигляді такої послідовності: передпускова підготовка, кероване рушання, пуск регульованого електропривода.

За проведеним аналізом конструктивних і експлуатаційних особливостей електропривода механізму підймання затвора зливної греблі визначено, що момент опору залежить від змінних фізико-хімічних властивостей ущільнювальної гуми протягом часу експлуатації, деформації елементів конструкції затвора в процесі експлуатації, засмічення напрямних [2], нелінійного характеру тертя в системі, викликаного змінним коефіцієнтом тертя спокою і початком проковзування [3], самим проковзуванням коліс затвора та дією поверхневих сил, що формуються під час взаємодії основи затвора та основи кармана зливної греблі [5].

Такі умови експлуатації приводять до того, що в початковий момент часу під час рушання затвора момент опору може перевищувати номінальне значення в декілька разів [4]. Інформацію про об'єкт керування на момент рушання [6] можна класифікувати як середнього ступеня, недетерміновану, причому характер об'єкта істотно залежить від багатьох чинників і змінюється в процесі рушання. Щодо синтезу закону керування складність об'єкта можна охарактеризувати як високу, через суттєву нелінійність і невідповідність одного пуску іншому [7]. Є можливість складання емпіричних правил, які слід виконувати для здійснення процедури передпускової підготовки та рушання.

Сказане вище об'єктивно зумовлює необхідність створення універсальної інтелектуальної системи керування з постійною структурою і загальним алгоритмом роботи, придатної для різних технологічних умов. Такі задачі знаходять своє розв'язання в класі експертних систем з нечіткою логікою.

*Метою дослідження є розробка алгоритмів роботи експертної системи автоматизованого керування з нечіткою логікою для формування режимів роботи електропривода механізму підймання затвора зливної греблі.*

### Результати дослідження

Оцінювання характеру формування сил, що викликають підвищений момент опору для електропривода, вимагає системного підходу і уявлення підйомно-транспортних механізмів як єдиної електромеханічної системи, що складається з декількох ланок, які впливають одна на одну в процесі рушання та переміщення. Статичні і динамічні характеристики ланок системи, певною мірою, визначають величину і характер зовнішніх впливів, проте ступінь інформативності їх різна.

Процес підйому «з підхопленням» виконується поетапно:

- перший етап — вибір зазорів і слабини канатів;
- другий етап — стадія рушання, коли відбувається зростання зусилля в пружному елементі до величини з нерухою масою;
- третій етап — стадія руху, що починається з руху маси, відірваної від опори.

Рушання та переміщення затвора супроводжується складними динамічними процесами в електромеханічній системі, що зумовлено значними масогабаритними показниками металоконструкції, наявністю досить протяжної і складної механічної передачі, стохастичним характером сил і моментів опорів під час руху затвора по напрямних кармана. Це приводить до нерівномірного розподілу навантажень між приводами підймальних лебідок на всіх етапах підймання і, як наслідок, до можливого перекосу та заклинювання металоконструкції затвора в кармані греблі [8].

Система керування (СК) повинна забезпечити рушання з формуванням достатнього моменту опору з мінімальним значенням струму статора та переміщенні габаритного вантажу за напрямними без перекосів і заклинювання. Такий режим простіше реалізувати почерговим вмиканням робочих машин дводвигунного позиційного електроприводу з виконанням передпускової підготовки та покроковим переміщенням сторін затвора в кармані за заданими координатами з контролем моменту опору [7].

У роботі [7] на підставі досліджень, розглянутих у [9], розроблені та запропоновані алгоритми виконання передпускової підготовки, рушання, пуску та переміщення для механізму підймання затвора. Відповідно до розробленого алгоритму запропонована автоматизована СК електроприво-

дом механізму підймання затвора греблі ГЕС на базі частотно-регульованого електроприводу.

Енергетичні та електромеханічні показники системи при частотному пуску мають достатньо високі значення і для будь-якої іншої системи пуску були б задовільні. Але особливість роботи механізму підймання потребує від СК забезпечити не тільки швидкісний режим, а й дотримання граничного діапазону прискорення кутової швидкості барабанів лебідки на всіх етапах підймання. Електропривід механізму має достатньо складну трансмісію [8], тому для координати керування значення прискорення інформативніше за значення кутової швидкості електропривода.

Математичним апаратом, який дозволяє повноцінно врахувати і відобразити ознаки декількох станів об'єкта, є теорія нечітких множин, що використовується у синтезі експертних систем [10].

Для ефективної роботи експертної системи керованого рухання потрібно забезпечити такі сигнали зворотного зв'язку, як: кутова швидкість валів асинхронних двигунів технологічного механізму, кутове положення роторів приводних машин, миттєвий струм статора кожного двигуна, час роботи технологічного механізму.

Вихідні сигнали СК: напрямок обертання, амплітуда і частота напруги живлення для скалярного принципу керування перетворювачем частоти. Виходячи з цього, а також з урахуванням міркувань, викладених у [7], доцільно ввести такі вхідні лінгвістичні змінні для експертної системи, як: ковзання, швидкість вала двигуна, струм двигуна, кількість ітерацій пуску, кількість спроб в одній ітерації, величина сумарного кутового переміщення вала двигуна в під час рухання та пуску.

Вихідні лінгвістичні змінні для експертної системи: припинення пуску, частота напруги живлення; ступінь  $\beta$  у рівнянні  $U/f^{1/\beta} = \text{const}$ , що визначає співвідношення частоти та напруги живлення при частотному керуванні. Вихідні логічні змінні експертної системи: інверсія напрямку обертання, запуск і зупинка процесу рухання.

Структура та алгоритм функціонування експертної системи керованого рухання, пуску та переміщення затвора показані на рис. 1 та рис. 2, відповідно. Алгоритм керування та правила нечіткої логіки експертної системи керованого рухання (ЕСКР) для механізму підймання затвора зливної греблі має забезпечувати робочий діапазон прискорення з навантаженням з урахуванням особливостей системи електроприводу та зміни сигналу керування асинхронного двигуна залежно від моменту опору і результатів відпрацювання рухання та переміщення за заданими координатами.

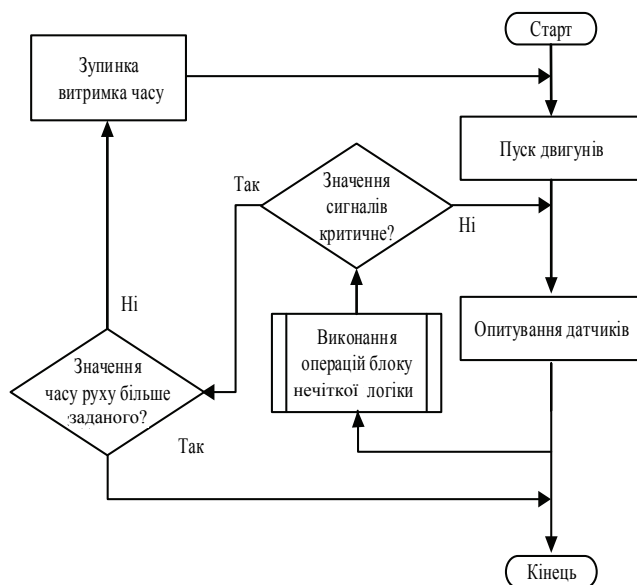


Рис. 1. Структурна схема системи керованого рухання



Рис. 2. Алгоритм роботи системи керованого рухання

Така експертна система має властивість обробляти неповну інформацію, моделювати сигнали завдання для обґрунтованого розв'язання задачі керування при спостереженні в реальному часі за технологічними процесами робочого механізму [10]. Наведений алгоритм забезпечує виконання евристичних правил для фаззи-контролерів, які є основою цієї системи та наведені в лінгвістичній формі: зі збільшенням кількості ітерацій пуску збільшити пусковий момент шляхом зменшення  $\beta$ ; чим більша швидкість, тим більше  $\beta$  наближається до стандартних значень [0,5 1 2]; кожна ітерація пуску містить кілька спроб з послідовним збільшенням пускового моменту; якщо швидкість не

нульова, то плавно збільшувати  $f$ ; якщо швидкість не нульова, ковзання високе і час пуску високий, то  $f$  знизити; якщо ковзання високе і час пуску високий, то здійснити ще одну спробу пуску; якщо швидкість не нульова і ковзання середнє, то  $f$  не змінювати; якщо швидкість не нульова і ковзання незначне, то  $f$  збільшити; якщо швидкість незначна, час пуску великий і струм великий, то пуск припинити; якщо швидкість нульова, час пуску середній і струм великий, то пуск припинити; якщо струм дуже великий, то пуск припинити.

Параметри керування та розроблені алгоритми функціонування системи є ідентичними для обох приводів механізму підймання, тому дослідження режимів роботи частотно-регульованого електропривода з виконанням вимог керування проводилися на одному з двох приводів. Для аналізу роботи системи розроблена математична модель частотно-регульованого привода однієї лебідки механізму підймання (рис. 3).

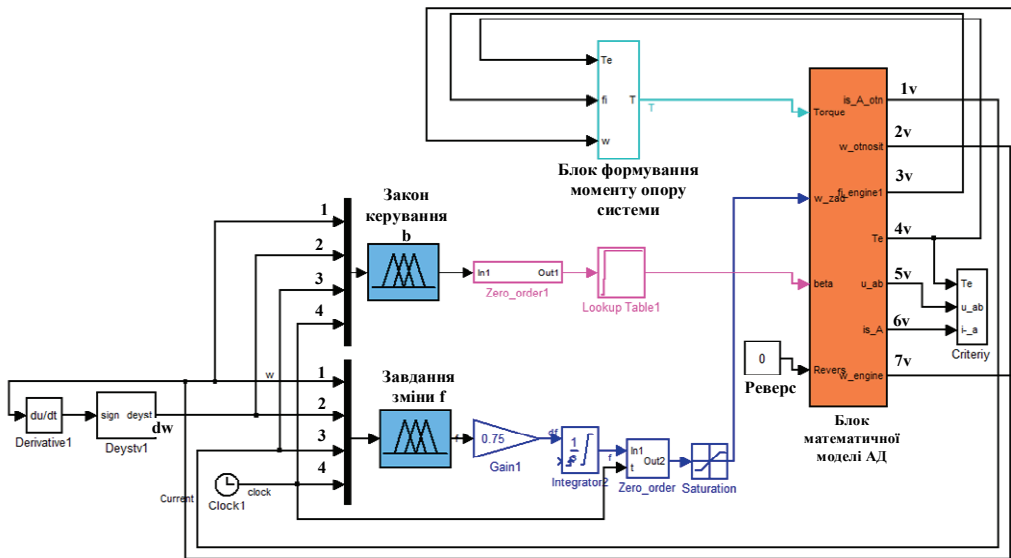


Рис. 3. Математична модель експертної системи керування рушення в програмному середовищі Matlab

Математична модель експертної системи має блок математичної моделі асинхронного двигуна в трифазній системі координат з урахуванням властивостей контуру намагнічування [9], із якого для налаштування зворотного зв'язку виведено сигнали (див. рис. 3): миттєве значення струму статора (1v); частота електромагнітного поля статора (2v); кут повороту вала (3v); електромагнітний момент двигуна (4v); напруга та струм фази статора (5v, 6v) і кутова швидкість електроприводу (7v). Показники сигналів зворотного зв'язку є вхідними сигналами для фаззи-блока, що формує сигнал керування зміни швидкості та фаззи-блока для формування закону керування за евристичними правилами.

Фаззи-регулятор налаштований на наступні вхідні сигнали (рис. 3): частота електромагнітного поля статора (1); прискорення (2); миттєве значення струму статора (3); час спрацювання (4). Математична модель ураховує зміну моменту опору в функції повороту вала та наявність складного моменту опору під час рушення та за нерівномірного розподілу вантажу на лебідках механізму підймання.

На рис. 4 показано графічне зображення термів фаззи-регулятора для формування закону керування завданням залежно від: швидкості, прискорення, струму, часу та значення вихідної величини.

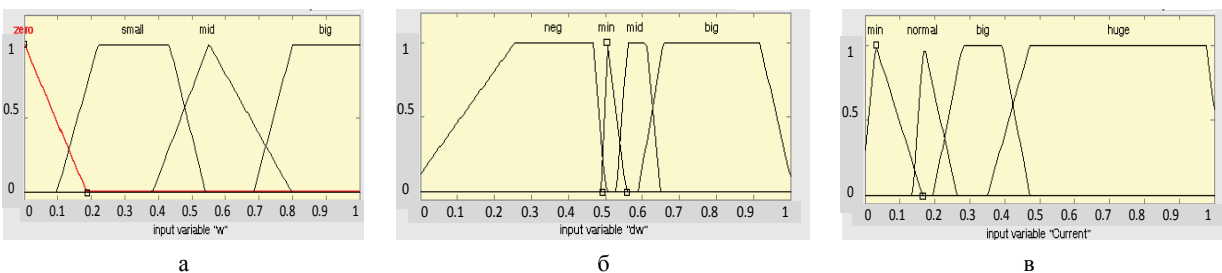
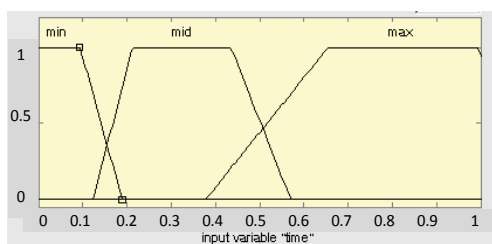
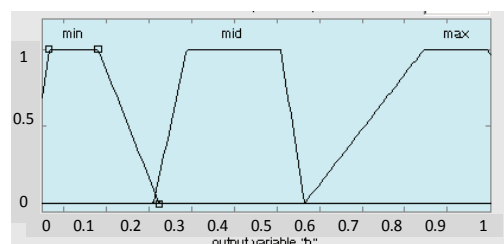


Рис. 4. Графічне зображення термів фаззи-регулятора формування закону керування завданням залежно від вхідних параметрів: а — швидкості; б — прискорення; в — струму (current)



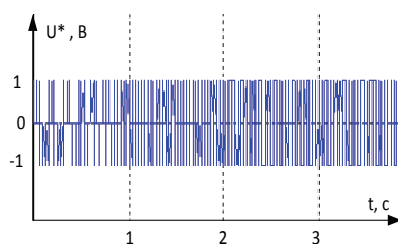
г



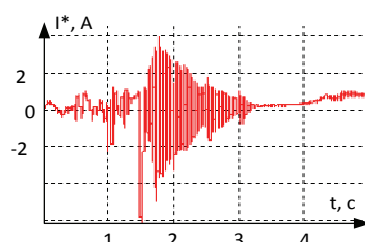
д

Продовження рис. 4. Графічне зображення термів фаззи-регулятора формування закону керування завданням залежно від вхідних параметрів: г — часу; д — значення вихідної величини

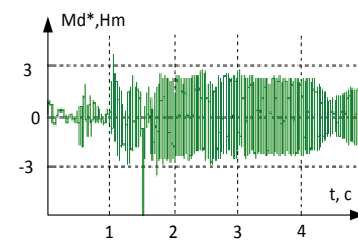
Математичне моделювання виконано в середовищі MatLAB, результати показано на рис. 5. Основним завданням системи керування є слідкування щодо заданого параметра відносного відхилення швидкості під час роботи привода.



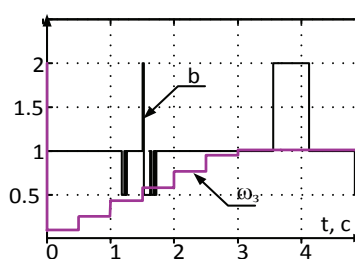
а



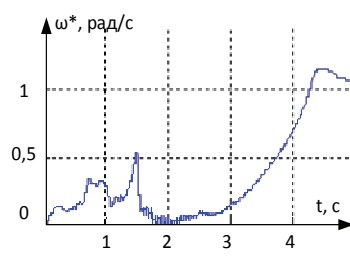
б



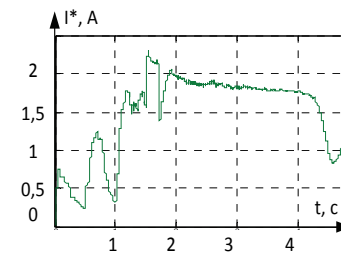
в



г



д



е

Рис. 5. Дослідження керованого пуску та роботи системи електропривода механізму підіймання:

а — формування напруги; б — струм двигуна; в — електромагнітний момент; г — задання швидкості та ступеневого показника; д — кутова швидкість; е — діюче значення струму

Також слід зазначити що, на відміну від систем керованого рушання з жорстко заданим законом частотного керування, система відрізняється універсальністю, тобто не потребує ручної корекції законів частотного керування залежно від зміни характеристик технологічного процесу, тому що закон формується фаззи-регулятором самої системи.

## Висновки

Розроблена система керування забезпечує рушання, пуск і роботу механізму підіймання зі змінним моментом опору з урахуванням фізичних властивостей робочих елементів (затвора та кармана зливної греблі). Властивість системи щодо самостійного навчання під час виконання рушання з першої спроби дозволить скласти базу знань для подальшої роботи системи керованого рушання і, таким чином, зменшити час виконання процесу рушання за рахунок уже набутих системою навичок спрацювання. Запропонована експертна система керованого рушання може бути вдосконалена за рахунок розширення евристичних правил з використанням додаткових параметрів, що характеризують стан електромеханічної системи, і реалізації на базі нейронних мереж.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Унгру Ф. Системы согласованного вращения асинхронных электродвигателей / Унгру Ф., Иордан И. — М. : Энергия, 1971. — 182 с.
2. Гладырь А. И. Особенности трогания кранового электропривода подъема затвора сливной плотины / Андрей Иванович Гладырь, Оксана Анатольевна Хребтова // Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт». Тематический выпуск 30. Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. — 2009. — 250 с. — ISSN 2079-8024.
3. Клепиков В. Б. Динамика электромеханических систем с нелинейным трением : монография / Владимир Борисович Клепиков. — Х. : изд-во «Підручники НТУ «ХП», 2014. — 408 с. — ISBN 978-617-687-029-6 : 24.00.
4. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов : монография / [Алексей Петрович Черный, Андрей Иванович Гладырь, Юрий Григорьевич Осадчук и др.]. — Кременчук : ЧП Щербатых А. В., 2006. — 280 с. — SBN 966-7320-00-6: 15.00.
5. Д. Израелашвили. Межмолекулярные и поверхностные силы / Джейкоб Израелашвили. — М. : Научный мир, 2011. — 456 с. — ISBN 978-5-91522-222-8.
6. Гребінник В. А. Трикомпонентна модель подання знань для проектування інтелектуальних агентів та експертних систем : автореф. дис... канд. техн. наук: спец. 05.13.23 «Системи та засоби штучного інтелекту» / Василь Анатолійович Гребінник ; Харківський національний ун-т радіоелектроніки. — Х., 2003. — 19 с. : рис.
7. Хребтова О. А. Управление троганием асинхронного электропривода грузоподъемного механизма / Оксана Анатольевна Хребтова, Владимир Витальевич Ченчевой, Андрей Иванович Гладырь // Електромеханічні і енергозберігаючі системи : щоквартальний науково-виробничий журнал. — Кременчук: КрНУ, 2014. — Вип. 4/2014 (28). — 106 с. — ISSN 2072—2052.
8. Хребтова О. А. Дослідження властивостей системи електропривода механізму підйому затвору зливної греблі / Оксана Анатоліївна Хребтова, Сергій Анатолійович Сергієнко // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. — Кременчук : КрНУ, 2012. — Вип. 4/2012 (20). — 142 с. — ISSN 2072—2052.
9. Хребтова О. А. Определение момента асинхронного двигателя при трогании / Оксана Анатольевна Хребтова, Владимир Витальевич Ченчевой, Вита Александровна Огарь // Електромеханічні і енергозберігаючі системи : щоквартальний науково-виробничий журнал. — Кременчук : КрНУ, 2013. — Вип. 4/2013 (24). — 106 с. — ISSN 2072—2052.
10. Золотухин А. Б. Применение теории нечетких множеств к количественной и качественной оценке риска / Анатолий Борисович Золотухин, Гудмestad Уве-Тобиас // International Journal of Offshore and Polar Engineers (IJOPE). — 2002. — Т. 12, № 4 — С. 288—296. — ISSN 1053-5381.

Рекомендована кафедрою відновлювальної енергетики та транспортних електричних систем і комплексів ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 23.02.2017

**Хребтова Оксана Анатоліївна** — старший викладач кафедри «Системи автоматичного управління та електропривід», e-mail: 34092@ukr.net ;

**Сергієнко Сергій Анатолійович** — канд. техн. наук, доцент кафедри «Системи автоматичного управління та електропривід».

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук

**O. A. Khrebtova<sup>1</sup>**  
**S. A. Sergienko<sup>1</sup>**

## Electric Gate Lifting Mechanism to Drain the Dam with Controlled Process of Starting

<sup>1</sup>Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

*Currently, the important issues for the implementation of pre-training, pick-up and start-up sufficiently broad class technological mechanisms are characterized by a complex process of formation of resistance since the initial pick-up time. The example of such a mechanism is electric industrial twin engined electric lifting mechanism shutter to drain the dam. The system of "electric lifting mechanism—gate—pocket drainage dam" is complex and consists of a sufficient number of interacting subsystems, and the state of the system depends on the state of its elements, transition system from one state to another can occur implicitly, continuously or abruptly. Existing systems of controlled electric drive does not satisfy all the requirements of the manufacturing process as well as efficient and trouble-free operation regimes of electric technological mechanism. This is the basis for finding technical solutions that ensure the required quality of the process with minimal power consumption and reduce operating costs through the use of modern techniques and automation. The proposed expert system with fuzzy logic implemented on the two fuzzy-regulators on heuristic rules under the weight parameters input signals forms the signal job frequency and voltage source of nourishment for the optimal frequency management law. In the analysis of research on the mathematical model there has been found that the processes of movement start and start-up of the proposed system, unlike systems controlled pick-up of rigidly-defined law of frequency management is characterized by longer duration of the transition process, but the current value and, consequently, power consumption acquire their maximum values only at a short time, which saves resources and drive motor system as a whole by reducing heat and vibration loads. The proposed expert system controlled pick-up can be*

*improved by extending the heuristic rules with additional parameters that describe the state of the electromechanical system, and implementation based on neural networks.*

**Keywords:** pre-launch preparations, drive off, expert system, fuzzy logic.

**Khrebtova Oksana A.** — Senior Lecturer in of the Chair of System of Automatic Control and Electromechanic; e-mail: 34092@ukr.net ;

**Sergiienko Sergii A.** — Assistant Professor of the Chair of System of Automatic Control and Electromechanic

**О. А. Хребтова<sup>1</sup>**  
**С. А. Сергиенко<sup>1</sup>**

## **Электропривод механизма подъема затвора сливной плотины с управляемым процессом трогания**

<sup>1</sup>Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

*В настоящее время актуальным является вопрос о выполнении предпусковой подготовки, трогания и пуска достаточно широкого класса технологических механизмов, которые характеризуются сложными процессами формирования момента сопротивления в начальный момент трогания. Одним из примеров является двухдвигательный электропривод механизма подъема затвора сливной плотины. Система «электропривод механизма подъема—затвор—карман сливной плотины» состоит из большого количества взаимодействующих подсистем, при этом состояние системы определяется состояниями ее элементов, переход системы из одного состояния в другое может происходить неявно, непрерывно или скачкообразно. Существующие системы управляемого электропривода не удовлетворяют все требования технологического процесса и не обеспечивают эффективные и безаварийные режимы работы электропривода самого технологического механизма. Это является основанием для поиска технических решений, обеспечивающих необходимое качество технологического процесса при минимальном потреблении электроэнергии и снижении эксплуатационных расходов за счет применения современных методов и средств автоматизации. Предложенная экспертная система с нечеткой логикой по эвристическим правилам формирует сигнал задания частоты и напряжения источника питания по оптимальным законом частотного управления. При анализе результатов исследования на математической модели установлено, что процессы трогания и пуска в предложенной системе в отличие от систем управляемого трогания с жестко заданным законом частотного управления характеризуются значительной продолжительностью переходного процесса, но значения тока достигают своих максимальных значений только на короткий период времени, что способствует сохранению ресурса приводного двигателя и системы в целом за счет уменьшения тепловых и вибрационных нагрузок. Предложенная экспертная система управляемого трогания может быть усовершенствована за счет расширения эвристических правил с использованием дополнительных параметров, характеризующих состояние электромеханической системы, и реализации её на базе нейронных сетей.*

**Ключевые слова:** предпусковая подготовка, трогание, экспертная система, нечеткая логика.

**Хребтова Оксана Анатольевна** — старший преподаватель кафедры «Системы автоматического управления и электропривод», e-mail: 34092@ukr.net ;

**Сергиенко Сергей Анатольевич** — канд. техн. наук, доцент кафедры «Системы автоматического управления и электропривод»