

В.Й. Лобов, К.В. Лобова

## ЗАДАТЧИК ІНТЕНСИВНОСТІ ДЛЯ ПРИСТРОЮ ПЛАВНОГО ПУСКУ ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЗАГЛИБНОГО НАСОСА

*Розглядається задача побудови задатчика інтенсивності для формування зміни кута відкриття тиристорів регулятора напруги. Це дозволяє змінювати по складній траєкторії напругу живлення на статорі електродвигуна заглибного насоса, забезпечуючи цим потрібний час плавного прискорення обертання ротора. Для реалізації задатчика інтенсивності апаратними засобами автоматизації надано блок-схему, а програмним шляхом – математичні вирази. Бібл. 9, табл. 1, рис. 2.*

*Ключові слова:* заглибний насос, асинхронний електродвигун, тиристорний регулятор напруги, кут відкриття тиристорів, задатчик інтенсивності, пуск, час прискорення.

*Рассматривается задача построения задатчика интенсивности для формирования изменения угла открывания тиристоры регулятора напряжения. Это позволяет менять по сложной траектории напряжение питания на статоре электродвигателя погружного насоса, обеспечивая, тем самым, нужное время плавного ускорения вращения ротора. Для реализации задатчика интенсивности аппаратными средствами автоматизации представлена блок-схема, а программным путем – математические выражения. Библ. 9, табл. 1, рис. 2.*

*Ключевые слова:* погружной насос, асинхронный электродвигатель, тиристорный регулятор напряжения, угол открывания тиристоры, задатчик интенсивности, пуск, время ускорения.

**Вступ.** Зростання як житлового, так і промислового будівництва останнім часом зробило стабільне та якісне водопостачання одним із першочергових завдань. Найбільш перспективним його способом є використання підземних джерел за допомогою свердловин різної глибини, яка є складною гідротехнічною спорудою, що вимагає кваліфікованого підходу до облаштування та надійного обладнання – свердловинних насосів. Ці агрегати спеціально розроблені для роботи в досить складних умовах. Вони є коштовні та, в силу специфіки монтажу, їх ремонт пов'язаний зі значними труднощами і витратами. Тому при підборі такого обладнання слід звертати увагу на ряд деталей та практичних моментів, які допоможуть збільшити термін безперебійної роботи устаткування і максимально знизити експлуатаційні витрати.

Один з таких ключових параметрів – це спосіб пуску асинхронного електродвигуна заглибного насоса (АЕЗН), який є одним з найбільш несприятливих режимів для електродвигуна, водопідйомних труб і водозахватної частині свердловини. Електродвигун насоса в цей період на короткий час піддається піковому навантаженню, тому його пусковий струм у 4-7 разів перевищує значення номінального при відносно невисокому пусковому моменті. Це веде до підвищеного теплового зносу ізоляції обмоток статора, від якого суттєво залежить надійність і довговічність електродвигуна. Шкідливий такий запуск і для агрегату і свердловини в цілому, оскільки часто супроводжується гідроударом, що руйнує трубопровід, арматуру та сам насос. Найбільш ефективним вирішенням усіх цих проблем є забезпечення плавного пуску АЕЗН.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Створення та дослідження систем керованого пуску електродвигунів змінного струму досить широко висвітлено у вітчизняній і зарубіжній літературі. Як правило, для забезпечення цієї мети використовуються наступні способи: переключення із схеми «зірка» у схему «трикутник» або включення електродвигуна за допомогою пускового трансформатора, або шляхом фазового

управління напругою на статорі або використання перетворювачів частоти [1-9]. Як показує практика для АЕЗН, економічно обґрунтованими є відносно прості пристрої з параметричним фазовим керуванням. Для цього використовуються тиристорні регулятори напруги (ТРН), що є найбільш широко поширеними, їх експлуатація буде застосовуватися і в майбутньому для електродвигунів малої та середньої потужності [1-3, 6, 8].

Керування пусковими режимами електроприводів за допомогою ТРН найбільш просто виконувати шляхом формування задатчиками інтенсивності необхідних законів зміни у часі напруги, що живить обмотки статора. Прикладену до статора напругу живлення регулюють за допомогою кута  $\alpha_s$  відкриття тиристорів ТРН, що включені в статорні ланцюги електродвигуна. Виконується пуск при сталій або безперервній (по лінійному або експонентному закону) зміні кутів  $\alpha_s$ , що формуються за допомогою апаратних або програмних задатчиків інтенсивності. При значному статичному навантаженні на валу механізму вдається регулювати у широкому діапазоні час пуску електродвигуна, що дозволяє знизити пускові струми та величини ударних електромагнітних моментів [2, 3, 6, 7]. Однак, відомі закони регулювання кута  $\alpha_s$  не дозволяють виконати керований пуск АЕЗН, за технічними вимогами яким необхідно мати час розгону не менше 20 с і більше. АЕЗН відноситься до малоінерційних електроприводів, так як він має не значний сумарний момент інерції  $J_s \leq 2J_e$ , ( $J_e$  – момент інерції електродвигуна) і статичний момент на валу  $M_s \leq 0,4M_n$  ( $M_n$  – номінальний момент). Тому при пуску АЕЗН відомими способами достатньо напруги зворушення  $U_s$ , щоб електродвигун розігнався до швидкості, близької до номінальної. Цей пуск є не керований і виконується за час, що дорівнює 0,4-0,8 с та не регулюється в часі. Подальше збільшення напруги живлення до номінальної не робить суттєвого впливу на плавність

пуску, так як швидкість електродвигуна міняється в невеликому діапазоні [8, 9].

**Мета роботи** – теоретичне обґрунтування, розробка та реалізація регульованого плавного пуску асинхронного електродвигуна заглибного насоса при використанні ТРН із задатчиком інтенсивності, який по раціональному закону буде змінювати кут відкриття тиристорів, що дозволить ефективно впливати на напругу живлення статорних обмоток електродвигуна для забезпечення в широкому діапазоні зміни часу плавного пуску та збільшити термін безперебійної роботи гідротехнічної споруди і максимально знизити експлуатаційні витрати.

**Результати досліджень.** Плавний пуск АЕЗН пропонується виконувати наступним способом. У початковий момент часу на обмотки статора електродвигуна подається напруга зворушення  $U_s$ . Під дією цієї напруги ротор електродвигуна починає розганятися. Одночасно, напруга зворушення  $U_s$  зменшується за час пуску  $t_1$  за експоненціальним законом до мінімальної напруги  $U_{\min}$ . При цій напрузі ротор електродвигуна продовжує ще стійко обертатися. Починаючи з моменту часу  $t_1$  і досягнення мінімальної напруги  $U_{\min}$ , напруга на статорних обмотках електродвигуна збільшується по експоненціальному закону до номінального значення напруги живлячої мережі  $U_{sn}$ . Цей пуск протікає плавно за потрібний час  $t_2$  до встановлення номінальної швидкості обертання ротора електродвигуна.

Для реалізації цього способу пуску апаратним пристроєм використовується задатчик інтенсивності, блок-схема якого надана на рис. 1.

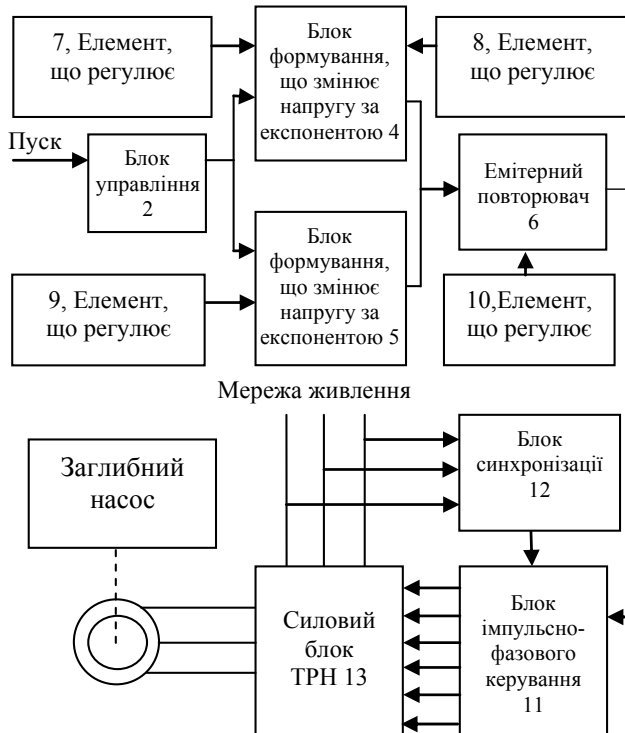


Рис. 1. Блок – схема задатчика інтенсивності для плавного пуску електродвигуна типу АЕЗН

При реалізації цього способу програмними засобами використовують математичний вираз (1):

$$U_{sn} = \begin{cases} U_s e^{-t_1/t_n}, & \text{при } 0 \leq t \leq t_1; \\ U_s + U_{\min} (1 - e^{-t_2/t_n}), & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2, \end{cases} \quad (1)$$

де  $t_1, t_2$  – сталі часу,  $t_n$  – загальний час пуску АЕЗН.

Кут відкриття тиристорів силового блоку ТРН визначається через початковий кут відкриття  $\alpha_{(0)}$ :

$$\alpha_s = \begin{cases} \alpha_{(0)} (1 - e^{-t_1/t_n}), & \text{при } 0 \leq t \leq t_1; \\ \alpha_{(0)} e^{-t_2/t_n}, & \text{при } t_1 \leq t \leq t_2. \end{cases} \quad (2)$$

Напруга зворушення і мінімальна напруга у виразі (1) відповідно визначаються за формулами:

$$U_s = U_{sn} \frac{\sqrt{M_s^0}}{M_n}, \quad (3)$$

$$U_{\min} = U_{sn} \frac{\sqrt{M_s^1}}{M_s}, \quad (4)$$

де  $M_s^0$  – статичний момент при нерухомому роторі електродвигуна;  $M_n$  – пусковий момент електродвигуна при номінальній напрузі живлення;  $M_s^1$  – статичний момент навантаження при мінімальній частоті обертання ротора електродвигуна;  $M^s$  – момент електродвигуна при номінальній напрузі живлення та мінімальній частоті обертання ротора електродвигуна.

Стала часу  $t_1$  виразах (1) і (2) визначається з основного рівняння руху електроприводу та механічної характеристики електродвигуна:

$$t_1 \approx J_{\Sigma} \omega_r^s \ln \left| \frac{(M_{\alpha} + M_s^0) \omega_{\min} - M_s^0 \omega_r^s}{M_s^0 \omega_r^s} \right|, \quad (5)$$

де  $J_{\Sigma}$  – приведений момент інерції електроприводу;  $\omega_r^s, \omega_{\min}$  – синхронна та мінімальна частоти обертання ротора електродвигуна;  $M_{\alpha}$  – електромагнітний момент, що визначається за механічною характеристикою електродвигуна.

Підстановка числових даних дає значення  $t_1$  (5), що не перевищує п'яти періодів мережевої напруги, та розраховується для конкретного електроприводу. Стала часу  $t_2$  у тих же виразах (1) і (2) вибирається у межах одного або двох значень заданого часу пуску. Це викликано тим, що напруга живлення є достатньою для розгону АЕЗН у зоні робочих швидкостей, визначає плавність пуску, істотно нижче номінальної напруги та розраховується із урахуванням параметрів конкретного електроприводу. Тому для збільшення часу розгону АЕЗН у зоні робочих швидкостей, необхідно збільшити сталу часу  $t_2$ .

В таблиці надані значення, а на рис. 2 – залежності  $U_s = f(t/t_n)$  при зміні сталих часу  $t_1, t_2$  і напруги  $U_s$ , що розраховувалась за виразом (1). На графіках значення напруги  $U_s$  представлені у частках номінальної напруги мережі  $U_{sn}$ , а поточний час – у частках часу при прямому пуску асинхронної машини із номінальною напругою мережі, а  $T_{ss}$  – є період зміни напруги живлячої мережі  $U_{sn}$ .

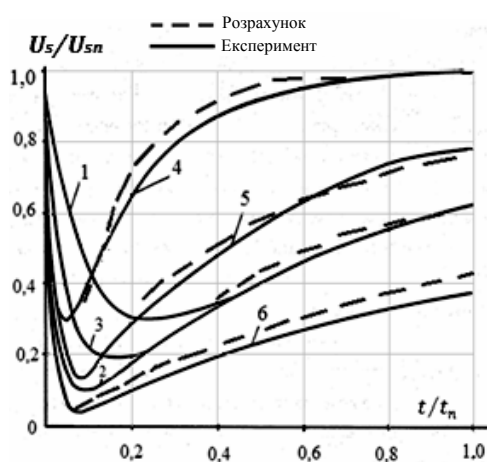
Із отриманих результатів випливає, що при збільшенні сталої часу  $t_2$  від 5 до 25  $T_{ss}$  мінімальна напруга  $U_{\min}$  на обмотках статора електродвигуна досягає

величини, рівної  $0,3U_{sn}$  (рис. 2,а). Збільшення сталої часу  $t_2$  від значення, необхідного часу  $t_n$  пуску електроприводу до значення, рівного  $10t_n$  приводить до того, що ця напруга значно зменшується та досягає величини, рівної  $0,05U_{sn}$ .

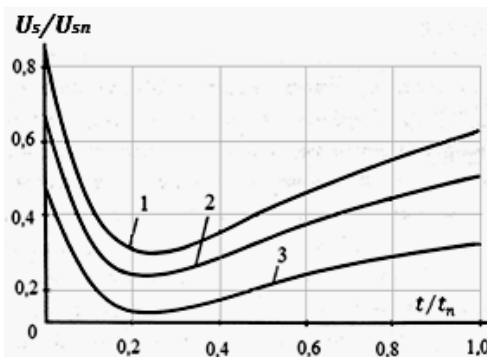
Таблиця

Залежності  $U_s / U_{sn} = f(t/t_n)$

№ характеристики (рис. 2,а)	$t_1$	$t_2$	№ характеристики (рис. 2,б)	$U_s$
1	$5t_n$	$25T_{ss}$	1	0,85
2	$5t_n$	$5T_{ss}$	2	0,65
3	$5t_n$	$12,5T_{ss}$	3	0,5
4	$t_n$	$5T_{ss}$		
5	$3t_n$	$5T_{ss}$		
6	$10t_n$	$5T_{ss}$		



а



б

Рис. 2. Залежності  $U_s / U_{sn} = f(t/t_n)$

При зменшенні  $U_s$  до  $0,5U_{sn}$  (рис. 2,б третя крива) ця функція протягом часу, рівного  $t/t_n = 1$  досягає величини, рівної  $0,35U_s/U_{sn}$ , при  $U_s = 0,8U_{sn}$  (друга крива) –  $0,43U_s/U_{sn} = 0,43$  (рис. 2,б). У той же час при  $U_s/U_{sn}$  (перша крива) функція досягає вже величини 0,62. Зниження напруги  $U_s$  призводить до більш тривалого наростання функції  $U_s/U_{sn} = f(t/t_n)$ .

#### Висновки.

1. Доведена необхідність використання в широкому діапазоні часу прискорення ротора асинхронного електроприводу заглибного насоса ТРН із задатчиком інтенсивності, який має дві сталі часу, що змінюються по експоненціальному закону і враховує величину напруги зворушення ротора електроприводу. При зміні в розробленому задатчику інтенсивності

сталі часу і величини напруги зворушення ротора виходить сімейство характеристик живлячих напруг із ТРН, які можуть подаватися на статорні обмотки для формування пускових режимів асинхронного електроприводу заглибного насоса та збільшити термін безперебійної роботи гідротехнічної споруди і максимально знизити експлуатаційні витрати.

2. Розроблений задатчик інтенсивності може бути використаний в перетворювачах частоти для формування пускових режимів, що використовуються, наприклад, в електроприводах конвеєрних машин для випалювання котунів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лобов В.Й., Лобова К.В. Метод определения времени пуска и торможения асинхронных электродвигателей с резисторно-тиристорными модулями // *Электротехника і електромеханіка*. – 2015. – №4. – С. 40-44. doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.07.
2. Петрушин В.С., Якимец А.М., Бангула В.Б. Анализ пуска асинхронного двигателя с помощью тиристорного преобразователя напряжения // *Электротехника і електромеханіка*. – 2012. – №6. – С. 31-33. doi: 10.20998/2074-272X.2012.6.06.
3. Браславский И.Я., Ишматов З.Ш., Поляков В.Н. Энергосберегающий асинхронный электропривод. – М.: Издательство «Академия», 2004. – 256 с.
4. Фигаро Б.И., Васильев Д.С. Применение устройств плавного пуска и торможения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором в электроприводах крановых механизмов передвижения // *Электротехнические и компьютерные системы*. – 2011. – №4. – С. 30-38.
5. Lobov V., Lobova K. Choice of braking method of asynchronous electric motor for using in electric drives of conveyor equipment // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – №8. – pp. 6-12.
6. Lobov V. Method for research of parametric control schemes by asynchronous motor // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – №6. – pp. 102-108.
7. Черный А.П., Гладырь А.И., Осадчук Ю.Г. Пусковые системы нерегулируемых электроприводов: Монография. – Кременчуг: ЧП Щербатых А.В., 2006. – 280 с.
8. Лобов В.И. Исследование пусковых и тормозных режимов асинхронных электроприводов с тиристорным параметрическим управлением: дис. ... к. техн. наук. – М. ВНИИ Электропривод, 1983. – 269 с.
9. Бродский Ю.А., Егорова С.А., Лобов В.Й., Швец С.А. А.с. СССР №1108589. Способ пуска малоинерционного асинхронного электродвигателя, МПК Н 02 Р 1/26. Опубл. 15.08.1984. Бюл. № 30. – 4 с.

#### REFERENCES

1. Lobov V.I., Lobova K.V. Method of determining the start time of induction motors in the control of resistor-thyristor modules. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2015, no.4, pp. 40-44. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2015.4.07.
2. Petrushin V.S., Yakimets A.M., Bangula V.B. Analysis of a thyristor voltage converter fed induction motor start. *Elektrotehnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.6, pp. 31-33. (Rus). doi: 10.20998/2074-272X.2012.6.06.
3. Braslavskiy I.Ya., Ishmatov Z.S., Polyakov V.N. *Energosberegayushchiy asinkhronnyy elektroprivod* [Energy-saving asynchronous electric]. Moscow, Academiya Publ., 2004. 256 p. (Rus).

4. Figaro B.I., Vasilyev D.S. Application of squirrel-cage induction motor soft starting and braking in the electric drives of crane travel mechanisms. *Elektrotekhnichni ta kompiuterni systemy – Electrotechnic and computer systems*, 2011, no.4, pp. 30-38. (Rus).
5. Lobov V., Lobova K. Choice of braking method of asynchronous electric motor for using in electric drives of conveyor equipment. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no.8, pp. 6-12.
6. Lobov V. Method for research of parametric control schemes by asynchronous motor. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015, no.6, pp. 102-108.
7. Chernyi A.P., Gladyr A.I., Osadchuk Y.G. *Puskovye sistemy nereguliruemyykh elektropriwodov: Monografiia* [Starting unregulated electric system: Monograph]. Kremenchuk: PP Cherbatyh A.V. Publ., 2006. 280 p. (Rus).
8. Lobov V.I. *Issledovanie puskovykh i tormoznykh rezhimov asinkhronnykh elektropriwodov s tiristornym parametricheskim upravleniem*. Diss. kand. techn. nauk [Research of starting and braking modes of asynchronous electric drives with thyristor parametric-hydraulic control. Cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 1983. 269 p. (Rus).
9. Brodsky Y.A., Egorova S.A., Lobov V.I., Shvets S.A. *Sposob puskа maloinertsionnogo asinkhronnogo elektrodvigatelia* [Method of starting a fast-response induction motor]. USSR Certificate of Authorship, no.1108589, 1984. (Rus).

*Поступила (received) 10.02.2016*

Лобов Вячеслав Иосифович<sup>1</sup>, к.т.н.,  
 Лобова Карина Витальевна<sup>1</sup>, студентка,  
<sup>1</sup> Государственное высшее учебное заведение  
 «Криворожский Национальный университет»,  
 50027, Кривой Рог, ул. XXII Партсъезда, 11,  
 тел/phone +38 0564 4090635,  
 e-mail: lobov.vjcheslav@yandex.ru

V.I. Lobov<sup>1</sup>, K.V. Lobova<sup>1</sup>  
 SIHE «Kryvyi Rih National University»,  
 11, XXII Partz'izdu Str., Kryvyi Rih, 50027, Ukraine.

#### **Intensity setter for a device of smooth start of submersible pump electric motor.**

**Purpose.** Development of an intensity setter, which in a rational law changes the opening thyristor the voltage regulator and effectively to changing power supply voltage stator windings of the electric pump deepening, ensuring a smooth start in a wide range.

**Methodology.** Electric submersible pump belongs to the small inertia electric, since it is not significant total moment of inertia, not exceeding two moments of inertia of the motor and static moment on the shaft does not exceed forty percent of the nominal torque. For technical requirements that electric acceleration time should have no less than twenty seconds or more. Office starting modes of electric submersible pumps economically justified using thyristor voltage regulator by forming the dial changes the intensity of the necessary legislation in time voltage feeding the stator windings. This ensures a smooth start right rotor of the electric submersible pump. **Results.** A block diagram of the intensity setter that is: with control unit, two units that form the exponential voltage supply emitter follower and regulatory elements. The mathematical expressions for voltage at the stator windings of the motor, changing exponentially, opening the angle of thyristor power unit thyristor the voltage regulator, which is determined through the initial angle of opening. Provided formula for pick-up voltage and minimum voltage, time constants, which are determined from the basic equations of motion and mechanical characteristics of the electric motor. Analytical investigated by the voltage dependence violation by changing the time constant flowing and growing exhibitor supply voltage stator electric circuit deepening pump.

**Originality.** Proposed in the initial time on the stator windings of the electric pick-up voltage is applied. Under the influence of this voltage, motor rotor begins to accelerate. At the same time, pick-up voltage decreases the minimum startup voltage varies exponentially in which the rotor of the electric motor continues to rotate more steadily. Now the voltage at the motor stator windings increases exponentially to the nominal voltage of the supply network. This start flowing smoothly for the right time to establish nominal rotor speed of the motor. **Practical value.** Developed dial allows you to increase the intensity of the electric motor acceleration time and reduce the dynamic loads of the electric submersible pump. References 9, tables 1, figures 2.

**Key words:** submersible pump, induction motor, thyristor voltage regulator, opening angle of thyristor, intensity setter, start-up, acceleration time.