

УДК 621.31

# Енергоефективне управління шахтною водовідливною установкою

Кальмус<sup>f</sup> Д. О., ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)  
Осадчук<sup>s</sup> Ю. Г., к.т.н. доц., ORCID [0000-0001-6110-9534](https://orcid.org/0000-0001-6110-9534)  
Криворізький національний університет, ROR [02md2kv66](https://ror.org/02md2kv66)  
Кривий Ріг, Україна

DOI: [10.20535/2523-4447.208273](https://doi.org/10.20535/2523-4447.208273)

**Анотація**—У статті наведені результати дослідження можливості практичної реалізації енергоефективного управління шахтною водовідливною установкою. Відзначено, що одним з найбільш енергоємних технологічних процесів при підземному способі видобутку корисних копалин є відкачування води на поверхню. Використання схеми багаторівневого відкачування води визначає необхідність застосування енергоефективного способу управління установками шахтного водовідливу, який би враховував диференціацію тарифів вартості електричної енергії, які існують. Регулювання продуктивності на кожному рівні водовідливу здійснюється шляхом ввімкнення та вимкнення насосних агрегатів, що збільшує число циклів вмикання та вимкнення їх приводних двигунів та сприяє зменшенню терміну безаварійної роботи обладнання. Тому розглянута можливість плавного пуску електричних двигунів, що досягається відповідним вибором параметрів Lqr-Регулятора за принципами лінійного та компромісного оптимуму. Вирішення задачі Lqr-Оптимізації забезпечує можливість прямого запуску електричних двигунів, що у перспективі дозволить перейти до практичної реалізації енергоефективного управління шахтною водовідливною установкою.

**Ключові слова** — шахта; водовідливна установка; електрична енергія; насос; електричний двигун; Lqr-регулятор.

## I. ВСТУП

Одним з найбільш енергоємних технологічних процесів при підземному способі видобутку корисних копалин є відкачування води на поверхню, тому застосування енергоефективного управління шахтними водовідливними установками дає можливість скоротити до 30% витрат у собівартості при перерахунку на тону готової продукції [1], [2]. При цьому об'єм притоку води до шахти складає не менш як 8000 м<sup>3</sup> за добу. Глибини шахт, що досягнуті на сьогодні гірничими роботами, належать до зон де практично відсутній природний водообмін, а води класифікуються як застійні. Тому рух та переміщення підземних вод можливі тільки шляхом дії шахтного водовідливу[3].

На сучасних шахтах застосовується схема ступінчастого перекачування води на поверхню. Задля досягнення цієї мети на шахтах використовуються головні й допоміжні водовідливні установки, а також насосні установки, що відкачують води на окремих виробітках[2].

Використання схеми багаторівневого відкачування води визначає необхідність застосування енергоефективного способу управління установками шахтного водовідливу, який би враховував диференціацію тарифів вартості електричної енергії, яка існує, коли у період максимальної завантаженості енергосистеми власник сплачує за спожиту електри-

чну енергію за максимальним тарифом, а у періоди «міжпікових пауз» – за мінімальним.

*Метою роботи є* дослідження можливості практичної реалізації енергоефективного управління шахтною водовідливною установкою.

## II. МАТЕРІАЛ ТА РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Схема водовідливної установки шахти показана на рис. 1. Вона складається з водовідливних установок, які відкачують води з п'яти водоносних горизонтів шахти на поверхню. Водовідливні установки оснащені відцентровими насосами типу ЦНС–300 з приводними високовольтними асинхронними електричними двигунами з короткозамкненим ротором серії А4. Задля зменшення навантаження на енергосистему, з причини великої сукупної потужності встановленого обладнання установок водовідливу, їх робота можлива лише в періоди «міжпікових пауз», тобто у моменти між проміжками часу коли енергосистема максимально завантажена. Головним критерієм регулювання водовідливу в часи «міжпікових пауз» є максимально можливий об'єм води, що відкачується з водозабірників до початку періоду максимальної завантаженості енергосистеми.

Сучасні способи управління шахтними водовідливними установками спираються на прогнозування притоку води у водозабірники та розрахунок очікуваних обсягів води, що надходять з усіх рівнів водовідливу[4].



DOI: 10.20535/2523-4455.me.208273

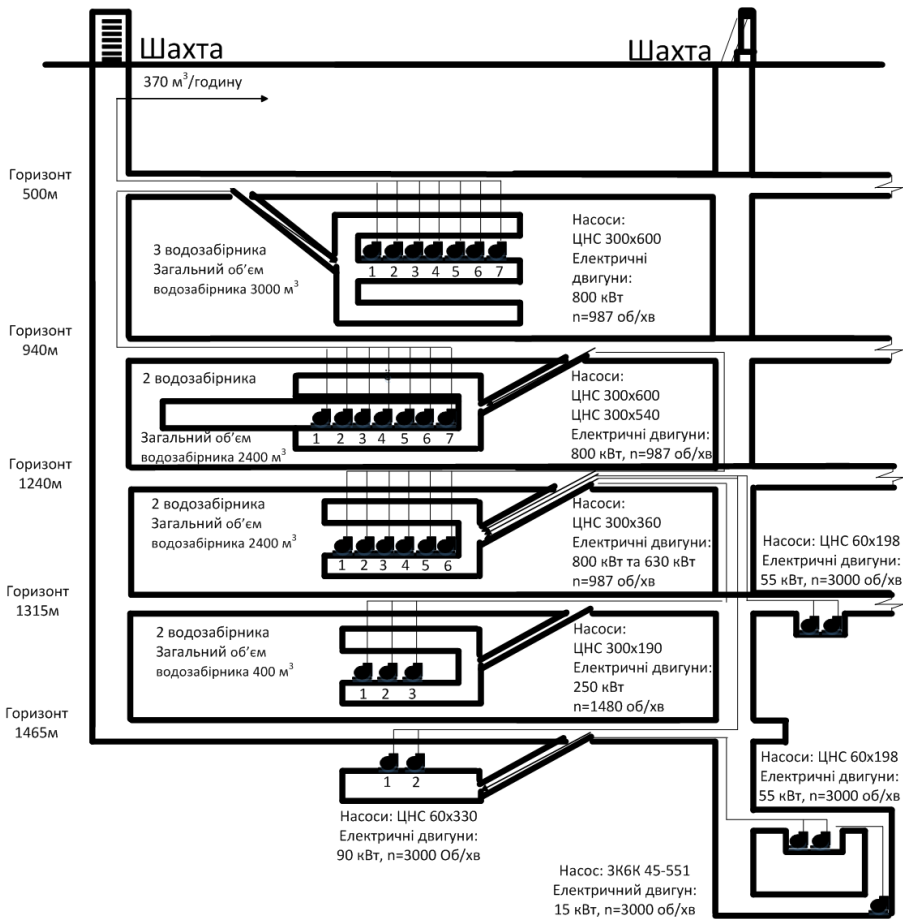


Рис. 1 Схема водовідливної установки шахти

Схема багаторівневого водовідливу шахти показана на рис. 2. До неї входять рівні водовідливу та блоки управління ними, які утворюють систему управління водовідливом шахти. Блоки управління мають по два інформаційні входи на які надходять сигнали про прогнозований об'єм води з  $(i-1)$  рівню водовідливу (вхід 1) та фактичний об'єм води у  $i$ -му водозабірнику (вхід 2). 3 – й інформаційний вихід блоку управління використовується для керування насосними агрегатами, а 4 – й інформаційний вихід є сигналом завдання для  $(i+1)$  блоку управління.

Регулювання продуктивності на  $i$ -му рівні водовідливу здійснюється шляхом ввімкнення та вимкнення насосних агрегатів. Необхідність дотримання умови забезпечення середньої продуктивності упродовж періоду відкачування води на фіксованому рівні може призвести до тимчасової зміни режиму роботи насосних агрегатів, що у свою чергу підвищить частоту вмикання та вимкання їх приводних двигунів, а відтак сприятиме зменшенню терміну безаварійної роботи обладнання[5].

Можливість плавного пуску електричних двигунів, що досягається відповідним вибором параметрів  $Lqr$ -регулятора, була розглянута у роботі[6]. Процедура вибору регулятора за принципами лінійного та компромісного оптимуму детально викладена у роботах[7]–[10]. Для вирішення таких задач, коли у просторі стану неперервна система описується рівняннями (1), у програмі MATLAB® використо-

вують оператори  $[K,S,E]=lqr(A,B,Q,R,N)$  та  $[K,S,E]=lqr(Ps,Q,R,N)$ , які мінімізують функціонал (2), що є мірою коливальності вектору стану  $x$  у процесі регулювання та мірою кількості енергії, що використовується на управління  $u$ [11], [12].  $Ps=(A,B,C,D)$  – модель об'єкту управління лінійною стаціонарною системою, що задається векторно-матричними рівняннями. Результатом розрахунку буде матриця  $K$  розміру  $(m \times n)$  оптимальних зворотніх зв'язків по змінних стану системи  $x$ , рішення рівняння Ріккати  $S$  та власні значення замкненої системи управління  $E=eig(A-BK)$ .

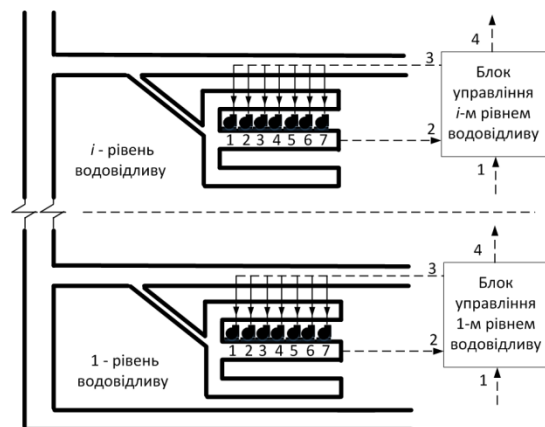


Рис. 2 Схема багаторівневого водовідливу шахти



$$\frac{dx}{dt} = Ax + Bx; y = Cx + Du; u = -Kx, \quad (1)$$

де матриці:  $A$  – стану;  $B$  – входу;  $C$  – виходу;  $D$  – приймається рівною нулю;  $K$  – коефіцієнтів зворотних зв'язків за змінними стану.

$$J_x = \int_0^{\infty} (x^T Qx + u^T Ru + 2x^T Nu) dt \rightarrow \min, \quad (2)$$

де  $Q$  та  $R$  – симетричні позитивно визначені матриці розміру  $(n \times n)$  та  $(m \times m)$  відповідно;  $N$  – вхідний параметр, який зводиться до мінімуму, а тому приймається нульовим.

Вибір значень матриць  $Q$ ,  $R$ ,  $N$ , на практиці, відбувається методом експертних оцінок. Управління у цьому випадку  $u = Kx = -(R^{-1}B^T Sx)$ .

Розглянемо синтез  $Lqr$ -регулятора в просторі стану [9], [10].

Об'єкт керування, асинхронний електричний двигун А4-450У6МУ3 (номінальні потужність, лінійна напруга, швидкість обертання валу, активний та індуктивний опори ротора, момент інерції та крутний момент відповідно:  $P_H=800$  кВт,  $U_H=6$  кВ,  $n_H=987$  об/хв,  $r_2=1,495$  Ом,  $L_2=0,0456$  Гн,  $J=54$  кг·м<sup>2</sup>,  $M_H=7846$  Н·м). Представимо його у вигляді матриць:

$$A = \begin{bmatrix} -38.3432 & 0.711 & 0 \\ 0 & -251.8892 & 379.068 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 50000 \end{bmatrix}; C^T = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; D = 0. \quad (4)$$

За змінні стану приймаємо:  $x_1$  – кутова швидкість, с<sup>-1</sup>;  $x_2$  – струм двигуна, А;  $x_3$  – напруга перетворювача, В. Елементи матриць:

$$a_{11} = -\frac{U_H}{\omega_0 \cdot r_2 \cdot J}; a_{12} = \frac{\omega_H \cdot J}{M_H}; a_{22} = -\frac{r_2}{L_2} \quad (5)$$

$$a_{23} = \frac{\omega_H \cdot U_H}{M_H \cdot L_2} + \frac{\omega_H \cdot r_2}{L_2}; a_{33} = \frac{1}{T_{II}}; b_{31} = \frac{K_{II}}{T_{II}} \quad (6)$$

де  $\omega_0$  – синхронна швидкість двигуна;  $K_{II}$ ,  $T_{II}$  – відповідно коефіцієнт передачі та стала часу перетворювача.

При вирішенні задачі приймаємо матрицю  $Q$  діагональною. Під час моделювання було виявлено що мінімальне значення елементів матриць  $R=14$ , а  $Q=diag[0.001 \ 0.001 \ 0.001]$ .

Результати розрахунків:

$$K = [0 \ 0.0205 \ 0.0201]; \quad (7)$$

$$S = \begin{bmatrix} 0.0001 & 0 & 0 \\ 0 & 0.001 & 0.0003 \\ 0 & 0.0003 & 0.0003 \end{bmatrix}; \quad (8)$$

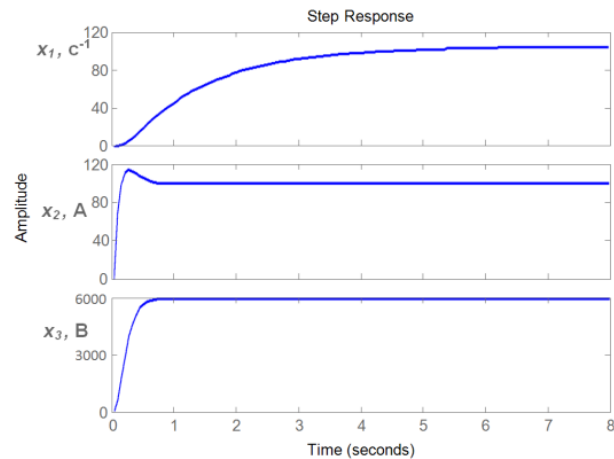


Рис. 3 Перехідні процеси з оптимальним  $Lqr$ -регулятором

$$E = \begin{bmatrix} -38.34 \\ -577.55 + 530.99i \\ -577.55 + 530.99i \end{bmatrix}. \quad (9)$$

На рис. 3 представлені перехідні процеси змінних стану. З графіків видно, що запуск електричного двигуна відбувається плавно, струм при пуску не перевищує номінального значення, що свідчить про стійкість системи за завданням.

#### ВИСНОВКИ

- 1) Необхідність підтримувати продуктивність на  $i$ -му рівні водовідливу на фіксованому рівні призводить до необхідності підвищення частоти вмикання – вимикання насосних агрегатів, що у свою чергу ставить під сумнів можливість практичної реалізації розглянутого способу управління водовідливом шахти.
- 2) Вирішення задачі  $Lqr$ -оптимізації дозволяє розрахувати коефіцієнти жорстких зворотних зв'язків, що забезпечують прямий запуск електричних двигунів без пристроїв плавного пуску, що у перспективі надає можливість перейти до практичної реалізації енергоефективного управління шахтною водовідливною установкою.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] I. O. Sinchuk, I. V. Kasatkina, A. N. Yalovaya, and N. N. Yurchenko, "Otsenka napravleniy povysheniya energoeffektivnosti dobyichi zhelezorudnogo syrya podzemnym sposobom," *J. KryvyiRihNatl. Univ.*, vol. 42, pp. 145–151, 2016, URL: <http://visnykknpu.com.ua/wp-content/uploads/file/42/BKHU-42.pdf>.
- [2] O. M. Sinchuk, S. M. Boiko, F. I. Karamanyts, I. A. Kozakevych, M. L. Baranovska, and A. M. Yalova, *Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprists electricity supple systems*. Warsaw: iScience Sp. z.o.o., 2018.
- [3] I. O. Sinchuk et al., *Brief commentaries on the problem of power consumption management at iron ore underground mines*. Warsaw: iScience Sp. z.o.o., 2019.
- [4] G. V. Kutov and Y. G. Osadchuk, "Pat. na kory`snu model' 74583 Ukrainy, MPK G05D 9/00. Sposib upravlinnya bagatostupinchaty`m vodovidlyv`vom shakty`," 2012.

- [5] Cherny A.P., A. I. Gladar, Y. G. Osadchuk, I. R. Kurbanov, and A.N.Oshun, *Starting systems of unregulated electric drives*, Scherbatyk. Kremenchug: Scherbatykh AV, 2006.
- [6] V. V. Kibardin, O. A. Kovaleva, and V. N. Yazev, "Kriterii optimalnogo upravleniya i lqr-optimizatsiya v elektroprivode," *Vestn. KrasGAU*, vol. 12, pp. 61–73, 2015.
- [7] V. I. Klyuchev, *Teoriya ehlektroprivoda: ucheb. dlya vuzov. – 2-e izd. pere-rab. i dop.* M.: Ehnergoatomizdat, 1998.
- [8] A. I. Egorov, *Osnovy teorii upravleniya*. M.: FIZMATLIT, 2004.
- [9] V. V. Kibardin, O. A. Kovaleva, and V. N. Yazev, "Issledovanie kompromissnogo optimuma v MATLAB," *Vestn. KrasGAU*, vol. 8, pp. 201–206, 2014.
- [10] B. T. Polyak and P. S. Shcherbakov, *Robastnaya ustojchivost' i upravlenie*. M.: Nauka, 2002.
- [11] I. V. Chernykh, *Modelirovaniye elektrotekhnicheskikh ustroystv v MATLAB. SimPowerSystems i Simulink [Simulation of electrical devices in MATLAB. SimPowerSystems and Simulink]*. Moskow, Rusiian Federation: DMK Press, 2007.
- [12] V. M. Perel'muter, *Pakety rasshireniya MATLAB. Control System Toolbox i Robust Control Toolbox*. M.: SOLON-Press, 2008.

Надійшла до редакції 17 липня 2020 р.

UDC 621.31

## Power Effective Control of Pumping Out Water from the Mine

D. O. Kalmus<sup>f</sup>, ORCID [0000-0001-7604-8631](https://orcid.org/0000-0001-7604-8631)

Yu. G. Osadchuk<sup>s</sup>, PhD Assoc.Prof., ORCID [0000-0001-6110-9534](https://orcid.org/0000-0001-6110-9534)

Kryvyi Rih National University, ROR [02md2kv66](https://ror.org/02md2kv66)

Kryvyi Rih, Ukraine

**Abstract**—In the article the results of research of possibility of practical realization power of the effective adjusting of pumping out of water are presented from a mine. It is marked that one of the most power-hungry technological processes at the underground method of mining is pumping out of water on a surface, on the depth of mine the natural exchange of water is practically absent, therefore moving of underwaters is possible only through the special equipment that is intended for the pumping-over of mine waters. Effective management of equipment that moves groundwater to the surface will reduce the cost of finished products.

The use of chart of the incremental pumping out of water determines the necessity of application power of effective method of control an equipment that is intended for the pumping-over of mine waters. Such method must take into account differentiation of tariffs of cost of electric energy. The system of pumping out of water from a mine consists of equipment that pumps out water from five levels of mine on a surface. A basic equipment that is intended for the pumping-over of mine waters are chempumps with high-voltage asynchronous electric motors with a short-circuited rotor.

Adjusting of the productivity at every level of pumping out is executed by an on-off pumps, it promotes frequency of including and disconnecting of electric motors that with them is connected, that assists reduction of term of work of equipment without breakages. Possibility of smooth start of electric motors is therefore considered, that is arrived at by the choice of parameters of Lqr- regulator on principles of linear and compromise optimum. For the decision of this problem corresponding operators in the program MATLAB<sup>®</sup>, by means of that a functional that was offered is minimized, are used, on the vector of the state of the system. The result of calculations is a matrix of optimal feed-backs on state of the system variables. On charts transitional the processes of state of the system variables can be seen, that the start of electric motor takes place fluently, a current at starting does not exceed a basic value, it testifies to stability of the system on a task. The decision of problem of Lqr- Optimization provides possibility of direct start of electric motors, that in a prospect will allow to pass to practical realization power of the effective adjusting pumping out of water from a mine.

**Keywords** — mine; equipment for pumping out; electrical energy; pump; electric motor; Lqr- regulator.

