

© А.В. Бубліков<sup>1</sup>, К.В. Соснін<sup>1</sup>, Ю.А. Папаїка<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

## АВТОМАТИЧНЕ КЕРУВАННЯ ВОДОВІДЛИВНОЮ УСТАНОВКОЮ ВУГІЛЬНОЇ ШАХТИ З УРАХУВАННЯМ ТРИЗОННОГО ТАРИФУ НА ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЮ

© A. Bublikov<sup>1</sup>, K. Sosnin<sup>1</sup>, Yu. Papaika<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine

## AUTOMATIC CONTROL OF THE COAL MINING DRAINAGE INSTALLATION TAKING INTO ACCOUNT THE TRISON TARIFF FOR ELECTRICITY

**Мета.** Зменшення питомих енерговитрат на відкачування води на вугільних шахтах шляхом мінімізації часових інтервалів увімкнених станів насосів у часи пік, коли вартість електроенергії максимальна.

**Методика досліджень.** Для дослідження автоматичного керування водовідливною установкою використано імітаційне моделювання процесу відкачування води з водозбірника на шахтному підприємстві. При цьому моделюється робота усієї системи автоматичного керування з використанням запропонованого алгоритму вмикання/вимикання насосів за критерієм входження у час-пік за тризонним тарифом на електроенергію з мінімальним рівнем води у водозбірнику. Для доведення ефективності роботи системи автоматичного керування за запропонованим алгоритмом за допомогою імітаційного моделювання досліджений вплив змінних характеристик притоку води у водозбірник на рівень води на момент входження у час-пік.

**Результати дослідження.** Виконаний аналіз роботи системи автоматичного керування водовідливною установкою за запропонованим алгоритмом керування підтвердив ефективність використання маневреного насосу з визначенням часу його вмикання на основі прогнозування динаміки рівня води у водозбірнику з урахуванням характеристик насосу та притоку води для забезпечення мінімального рівня води у водозбірнику на момент входження у час-пік. В залежності від характеристик насосу та притоку води встановлені умови отримання більш позитивного ефекту від використання запропонованого алгоритму керування водовідливною установкою.

**Наукова новизна.** Час, необхідний маневреному насосу для відкачування води з метою входження у зону “час-пік” з мінімальним рівнем води в водозбірнику, залежить прямо пропорційно від різниці поточного об'єму води в водозбірнику й об'єму води, що відповідає мінімальному рівню, та зворотно пропорційно від продуктивності маневреного насосу і швидкості приросту поточного об'єму води в водозбірнику. При цьому встановлено, що величина зменшення вартості споживаної електроенергії на відкачування води при переході від існуючого алгоритму керування до запропонованого залежить прямо пропорційно від тривалості часових інтервалів вимкнених станів основних насосів – чим менше ця тривалість, тим більше часовий інтервал роботи основних насосів у час-пік та, відповідно, менше величина зменшення вартості електроенергії.

**Практичне значення.** Вдосконалено алгоритм автоматичного керування водовідливною установкою на шахтному підприємстві за рахунок використання критерію, що поєднує швидкість приросту рівня води та вартість електричної енергії у різні часи доби. За допомогою імі-

таційного моделювання досліджено та доведено, що розроблений алгоритм керування за рахунок увімкнення маневреного насосу перед зонами “час-пік” з метою входження у зони з мінімальним рівнем об’єму води у водозбірнику при розрахунку вартості споживаної насосами електроенергії за тризонним тарифом дозволяє зменшити вартість споживаної електроенергії до 10% за умови притоку води менше продуктивності одного насосу, та до 5% за умови притоку води більше продуктивності одного насосу.

**Ключові слова:** енергоефективність, водовідливна установка, автоматичне керування

**Вступ.** Притік води до водозбірника шахти є змінною випадковою величиною, що залежить від багатьох складних факторів – характеру технологічних процесів у виробках, геологічних умов, методу розробки родовища, а також часу року. Тому спрогнозувати зміну даної величини практично неможливо. Так, у роботі [1] відмічається, що зміна притоку води до басейна для накопичування є нестационарною випадковою величиною, через що потребує постійного контролю. Зазначається, що одним з найголовніших завдань при керуванні водовідливом є визначення моменту включення насосів у передпіковий період навантаження шахтної енергосистеми. Підкреслюється, що величина припливу води, час початку максимального навантаження енергосистеми, довжина цього режиму в загальному випадку є величинами змінними.

У роботі [2] пропонується на основі аналізу сукупності контрольованих параметрів виконувати розпізнавання режиму роботи водовідливної агрегату для виявлення аварійного чи аномального режиму роботи. Розглянуто приклад роботи дільниці системи «насос-мережа» при пориві нагнітального трубопроводу.

У роботі [3] розроблено алгоритм вибору кількості одночасно працюючих насосів у різні часи доби при застосуванні диференційованого тарифу вартості електропостачання при врахуванні робочих параметрів насосів. Представлено приклад керування водовідливною установкою при використанні одноставочного тарифу за добою, коли виключається робота водовідливної установки у період максимального навантаження енергосистеми.

В усіх зазначених роботах не розглядається спосіб автоматичного керування водовідливною установкою за критерієм входження у короткостроковий часовий інтервал час-пік у загальній енергомережі з мінімальним рівнем води у водозбірнику з метою забезпечення вимкнених станів усіх насосів протягом часу-пік. Відповідно, не досліджений вплив характеристик насосів та притоку води на ефективність автоматичного керування водовідливною установкою за зазначеним критерієм.

**Формування цілей статті.** Метою у роботі є зменшення питомих енерговитрат на відкачування води на вугільних шахтах шляхом мінімізації часових інтервалів увімкнених станів насосів у часи пік, коли вартість електроенергії максимальна.

Для досягнення мети в роботі поставлені і розв'язані такі наукові задачі:

- розробка імітаційної моделі системи автоматичного керування водовідливною установкою, яка складається з трьох імітаційних моделей насосів, моделі імітації зміни у часі притоку води у водозбірник, а також моделі розрахунку споживаної за добу електроенергії, та її вартості;

- аналіз ефективності запропонованого алгоритму автоматичного керування водовідливною установкою у порівнянні з існуючим алгоритмом за допомогою моделювання процесу керування при різних характеристиках притоку води у водозбірник.

**Актуальність досліджень.** Вага витрат електроенергії на відкачування води відносно усіх енерговитрат шахтних підприємств складає у середньому 20%, а для глибоких та обводнених родовищ сягає 40% від енерговитрат всього підприємства [4, 5]. У свою чергу, для енергосистеми України існує актуальна задача зменшення нерівномірності енергоспоживання протягом доби шляхом розробки систем, які враховують режими роботи агрегатів високої потужності підприємств. Вирішення цієї задачі позитивно вплине на економічні показники підприємств та енергосистему України в цілому

Отже, з урахуванням значної потужності водовідливних установок шахтних підприємств, розробка та дослідження нових алгоритмів керування, що спрямовані на зменшення нерівномірності споживання підприємством електроенергії протягом доби, є **актуальною науково-технічною задачею**, розв'язання якої забезпечить зменшення витрат на електроенергію.

**Основна частина.** При розробці моделі системи автоматичного керування водовідливною установкою за основу взята структурна схема системи, за якою фактично здійснена декомпозиція структурної схеми моделі системи керування (рис.1).

Як бачимо з рис.1, структура моделі системи автоматичного керування водовідливною установкою повністю повторює структуру реальної системи. При цьому модель об'єкта керування є багатокомпонентною та складається з моделей насосів, моделі імітації зміни у часі притоку води та моделі водозбірника. Модель розрахунку кількості споживаної за добу електроенергії та її вартості зроблена складовою частиною моделі блоку керування, оскільки фактично ця функція виконується програмно на базі контролера.

Імітаційна модель насосу створена на основі інтегратора та підсилювальної ланки. Її вхідною величиною є дискретний керуючий сигнал на насос, а вихідною – кількість води, що відкачується насосом за одиницю часу.

Окрім моделі насосу, іншим головним елементом моделі об'єкта керування є модель імітації зміни у часі притоку води у водозбірник, що є головним збурюючим впливом для системи автоматичного керування водовідливною установкою (рис.1). У ході створення цієї моделі враховано, що потужність насосів дозволяє змінювати ємність води у водозбірнику на відносно короткому інтервалі часу, що значно менше за період зміни притоку води. Через це на короткочасному інтервалі зміна притоку води у часі може бути представлена однією з наступних елементарних закономірностей:

- постійна величина притоку води у водозбірник;
- східчаста зміна у часі притоку води у водозбірник;
- лінійна зміна у часі притоку води у водозбірник (сигнал трикутної форми).

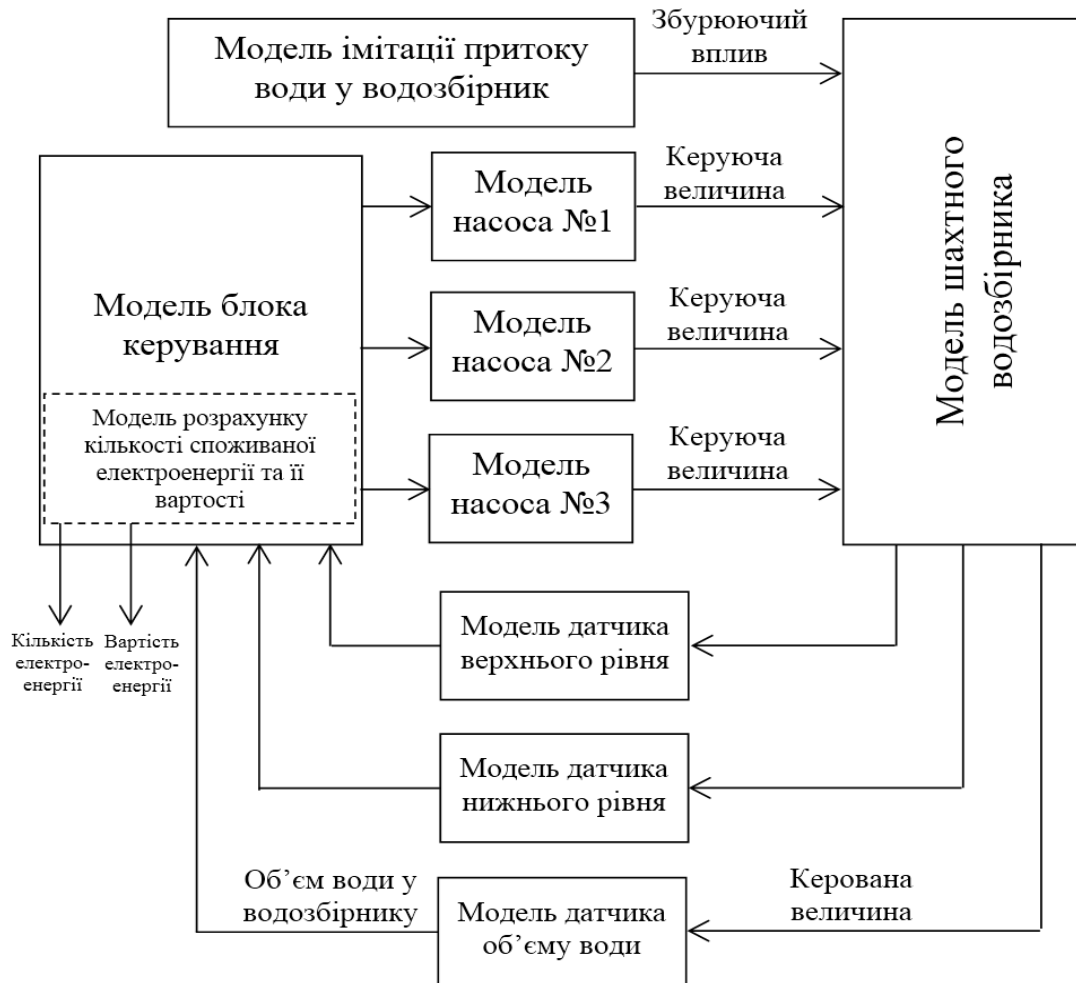


Рис. 1. Структурна схема системи автоматичного керування водовідливною установкою

Відповідно, модель імітації зміни у часі притоку води у водозбірник складається з сукупності генераторів сигналів за зазначеними закономірностями. Кожна окрема закономірність зміни у часі притоку води імітує одну конкретну ситуацію.

Модель водозбірника фактично представлена лише суматором, що реалізує баланс між кількістю води, що за певний час надійшла до водозбірника, та кількістю води, що за аналогічний час відкачується насосами:

$$V_{\text{водозб.}} = V_{\text{поч}} + V_{\text{прит}} - V_{\text{нас.1}} - V_{\text{нас.2}} - V_{\text{нас.3}}, \text{ м}^3,$$

де  $V_{\text{водозб.}}$  – поточний об’єм води у водозбірнику;  $V_{\text{поч}}$  – об’єм води у водозбірнику на початку моделювання;  $V_{\text{нас.1}}$  – об’єм води, що відкачаний насосом №1 з певного моменту часу (для нашого випадку – з моменту початку моделювання);  $V_{\text{нас.2}}$  – об’єм води, що відкачаний насосом №2 з певного моменту часу;  $V_{\text{нас.3}}$  – об’єм води, що відкачаний насосом №3 з певного моменту часу.

В моделі “Обчислення електроенергії та її вартості” на рис.1 визначення вартості електроенергії відбувається на основі тризонного тарифу на електроенергію [6]. Особливістю тризонного тарифу є те, що тривалість так званої зони часів-

пік (від 2 до 4 годин) є сумірною з часом відкачування води насосами, на відміну від нічного тарифу. Згідно з цим тарифом, вводиться коригувальний коефіцієнт [6], на який множиться базова вартість електроенергії за 1 кВт·год (прийнята 2,62 грн – вартість електроенергії для юридичних осіб 1 класу станом на 1 квартал 2021 року [7]).

Звернемо увагу на ще одну особливість. В моделі об'єкта керування, з оглядом на високу швидкість вимірювання відстані до поверхні води, датчик прийнятий безінерційним елементом. Але вихідною величиною датчика прийнятий об'єм води у водозбірнику, оскільки модель будується саме на основі цієї фізичної величини (продуктивність насосу, притік води та кількість води у водозбірнику аналітично зв'язані через цю фізичну величину). Таким чином, приймається, що вихідною величиною датчика є не рівень води у водозбірнику, а її об'єм. Перейти від однієї фізичної величини до іншої не складно – між ними існує аналітична залежність, в якій враховується тримірний профіль водозбірника, що є незмінним.

В основу моделі блоку керування на рис.1 закладений алгоритм автоматичного керування водовідливною установкою, що наведений на рис.2.

За допомогою схеми на рис.2 розглянемо існуючий наразі алгоритм керування водовідливною установкою, що полягає у наступному [2].

За умови першого запуску системи (блок 1 на рис.2) у блоці 2 перевіряється умова запуску Насосу №1, якою є перевищення фактичним об'ємом води у водозбірнику верхнього рівня. Якщо умова виконується, у блоці 3 відбувається вмикання Насосу №1.

Далі у блоці 4 перевіряється умова запуску Насосу №2, якою є перевищення фактичним об'ємом води у водозбірнику верхнього рівня ТА проходження з моменту запуску Насосу №1 60-ти секунд. Якщо умова виконується, у блоці 5 відбувається вмикання Насосу №2.

Після цього у блоці 6 перевіряється умова запуску Насосу №3, якою є перевищення фактичним об'ємом води у водозбірнику верхнього рівня ТА проходження з моменту запуску Насосу №2 60-ти секунд. Якщо умова виконується, у блоці 7 відбувається вмикання Насосу №3.

Умовою вимикання усіх трьох насосів, що перевіряється у блоці 8, є досягнення об'єму води у водозбірнику нижнього рівня. При виконанні умови у блоці 8 усі три насоси вимикаються (блок 9).

У новому запропонованому алгоритмі автоматичного керування водовідливною установкою закладено ідею контролю системою керування часу, що залишився до входу у найближчу зону “час-пік”, та порівняння цього часу з часом, який необхідний Насосу №3 для відкачування об'єму води, що дорівнює різності поточного об'єму води у водозбірнику, та об'єму води, що відповідає нижній межі контрольованого діапазону зміни об'єму води. Якщо час, що залишився до входу у найближчу зону “час-пік”, стає менше часу, який необхідний Насосу №3 для відкачування зазначеного вище об'єму води, Насос №3 вмикається. Це забезпечує входження у “час-пік” з мінімальним об'ємом води у водозбірнику, що гарантує мінімальний час роботи насосів у “час-пік”, коли електроенергія коштує дорого.

За умови розрахунку часу, який необхідний Насосу №3 для відкачування об'єму води, що дорівнює різниці поточного об'єму води у водозбірнику, та об'єму води, що відповідає нижній межі контрольованого діапазону зміни об'єму води, враховується динаміка об'єму води у водозбірнику.

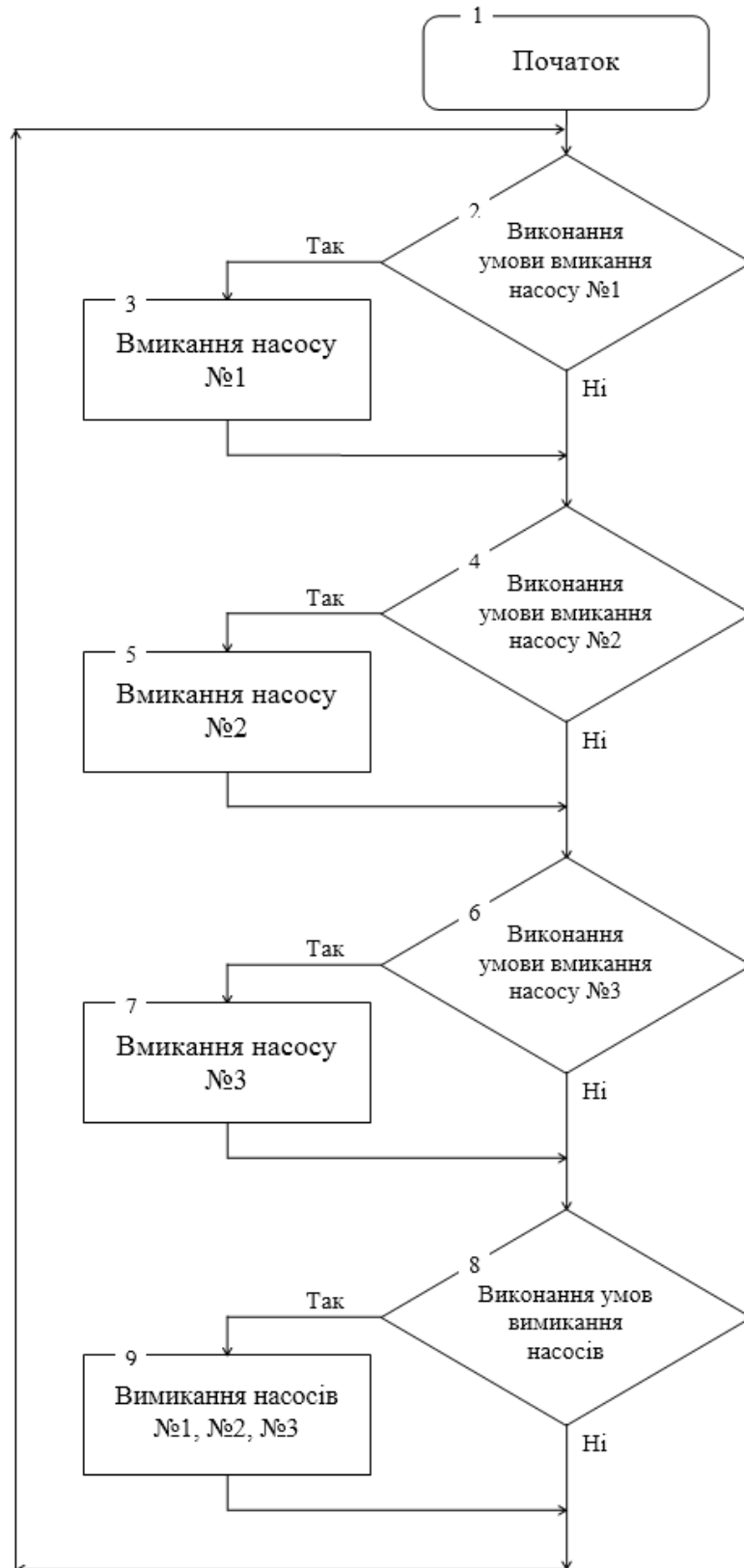


Рис. 2. Схема алгоритму керування водовідливною установкою

При цьому додаткова умова вмикання Насосу №3 буде такою:

$$\frac{V_{\text{водозб.}}(i) - V_{\text{водозб.}}(i-10)}{10} \cdot t + \frac{300}{3600} \cdot t \geq V_{\text{водозб.}}(i) - V_{\text{водозб. min}},$$

де  $V_{\text{водозб.}}(i)$  – поточний об'єм води у водозбірнику, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{водозб.}}(i-10)$  – об'єм води у водозбірнику 10 с назад, м<sup>3</sup>;  $V_{\text{водозб. min}}$  – об'єм води у водозбірнику, що відповідає нижній межі контрольованого діапазону зміни об'єму води, м<sup>3</sup>;  $t$  – змінна, що поступово збільшується з кроком 1 с, доки не виконається нерівність, після чого обчислюється абсолютний час вмикання Насосу №3:

$$T_{\text{вм.нас}} = T_{\text{поч.час-пік}} - t,$$

де  $T_{\text{поч.час-пік}}$  – абсолютний час початку найближчої зони “час-пік”.

На основі запропонованої імітаційної моделі системи автоматичного керування водовідливною установкою проведено моделювання роботи системи за умови керування насосами за існуючим алгоритмом та незначного та незмінного притоку води у водозбірник (рис. 3).

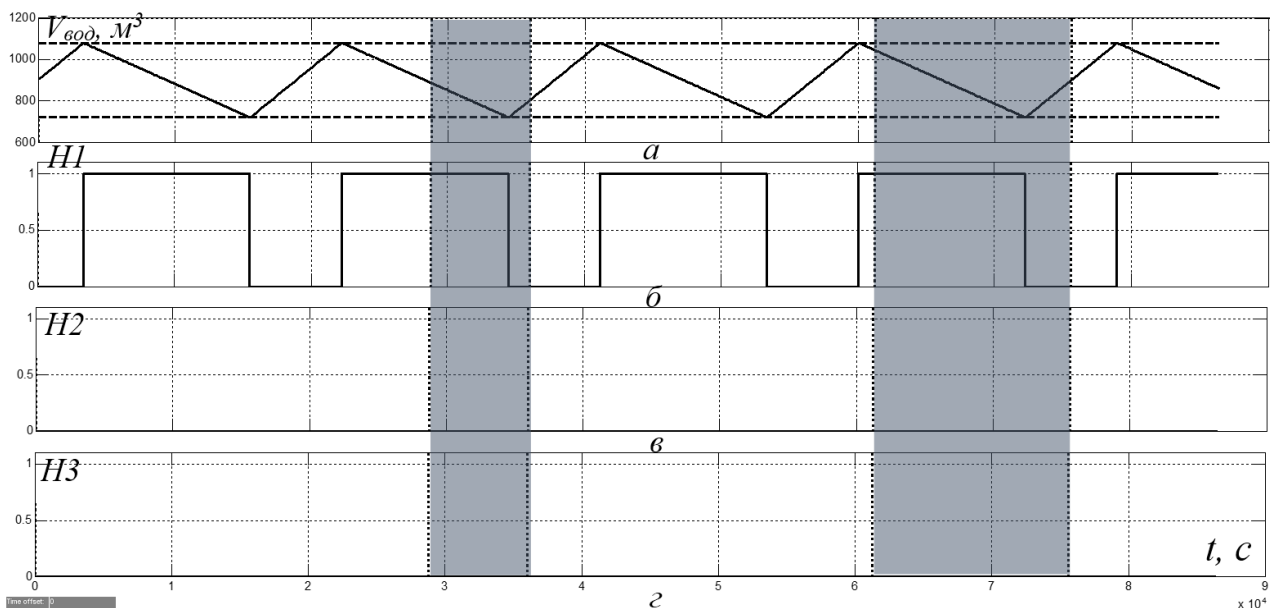


Рис. 3. Зміна у часі: *a* – об'єму води у водозбірнику; *б* – керуючого сигналу на насос №1; *в* – керуючого сигналу на насос №2; *г* – керуючого сигналу на насос №3 за умови постійного та незначного притоку води (насос №1 справляється) при старому алгоритмі керування

На рис.3 заливкою відмічені часові інтервали, що відповідають зонам “час-пік” (згідно з [6]).

З рис.3 видно, що для підтримки об'єму води у заданому діапазоні достатньо роботи Насосу №1. При цьому ми бачимо, що час роботи Насосу №1 практично повністю перекриває як першу зону “час-пік”, так і другу. Той факт, що часовий інтервал простою Насосу №1 приходить на зони “час-пік” говорить про не ефективність існуючого алгоритму керування насосами з точки зору вартості споживаної електроенергії.

На основі імітаційної моделі системи автоматичного керування водовідливною установкою (рис.1) проведено моделювання роботи системи за умови керування насосами за запропонованим алгоритмом та незначного та незмінного притоку води у водозбірник (рис.4).

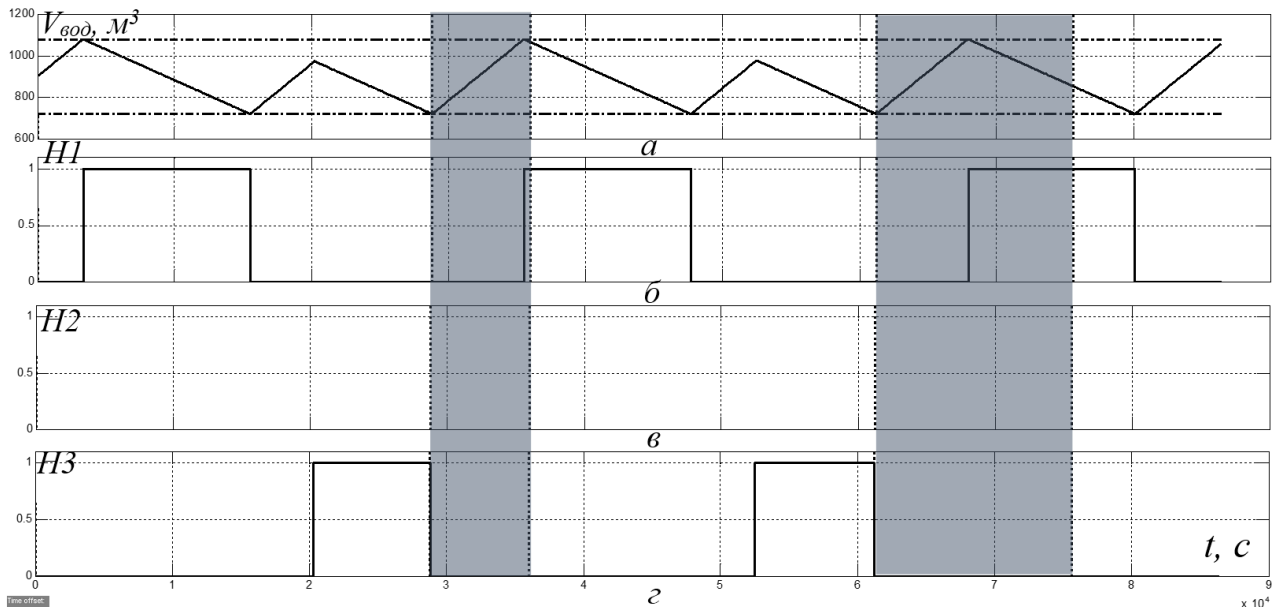


Рис. 4. Зміна у часі: *a* – об’єму води у водозбірнику; *б* – керуючого сигналу на насос №1; *в* – керуючого сигналу на насос №2; *г* – керуючого сигналу на насос №3 за умови постійного та незначного притоку води (насос №1 справляється) при новому алгоритмі керування

З рис.4 видно, що Насос №3 вимикається якраз за умов початку зон “час-пік”, а фактичний об’єм води при цьому знаходиться на мінімальному рівні. Це говорить про правильність реалізації ідеї у запропонованому алгоритмі. З рис.4 видно, що завдяки входу у зони “час-пік” з мінімальним фактичним об’ємом води у водозбірнику на початку зон спостерігаються часові інтервали з вимкненим станом Насосу №1, тобто без споживання електроенергії насосами.

На основі запропонованої імітаційної моделі системи автоматичного керування водовідливною установкою проведено моделювання роботи системи за умови керування насосами за існуючим алгоритмом та східчастої зміни у часі незначного притоку води у водозбірник (рис.5).

На рис.5 маємо приклад парної роботи Насосу №1 та Насосу №2 навіть за умови незначного притоку води (60 с не вистачає Насосу №1, щоб зменшити об’єм води у водозбірнику нижче верхнього рівня). При цьому на цей раз для зон “час-пік” маємо різні ситуації – для першої зони обидва насоси працюють у зоні, чого можна б було запобігти, а для другої зони при вході у зону спостерігався практично мінімальний об’єм води у водозбірнику, що означає правильний вхід у зону та є збігом обставин.



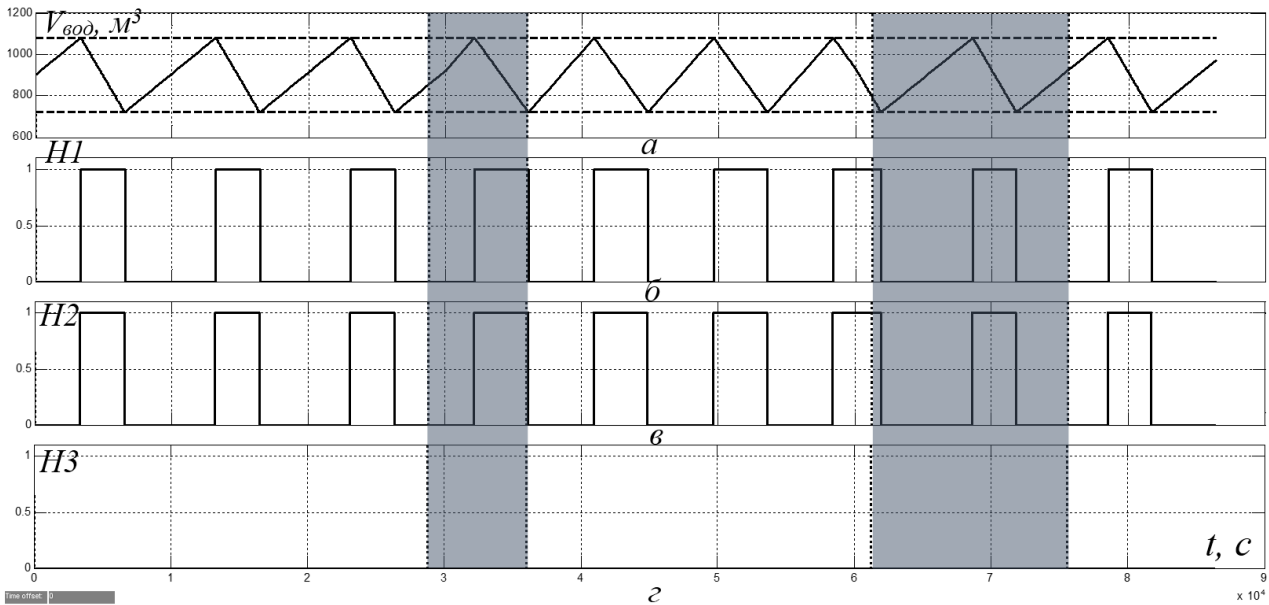


Рис. 5. Зміна у часі: *a* – об'єму води у водозбірнику; *б* – керуючого сигналу на насос №1; *в* – керуючого сигналу на насос №2; *г* – керуючого сигналу на насос №3 за умови незначного притоку води (насос №1 справляється), що змінюється східчасто, при старому алгоритмі керування

На основі імітаційної моделі системи автоматичного керування водовідливною установкою (рис.1) проведено моделювання роботи системи за умови керування насосами за запропонованим алгоритмом та східчастої зміни у часі незначного притоку води у водозбірник (рис.6).

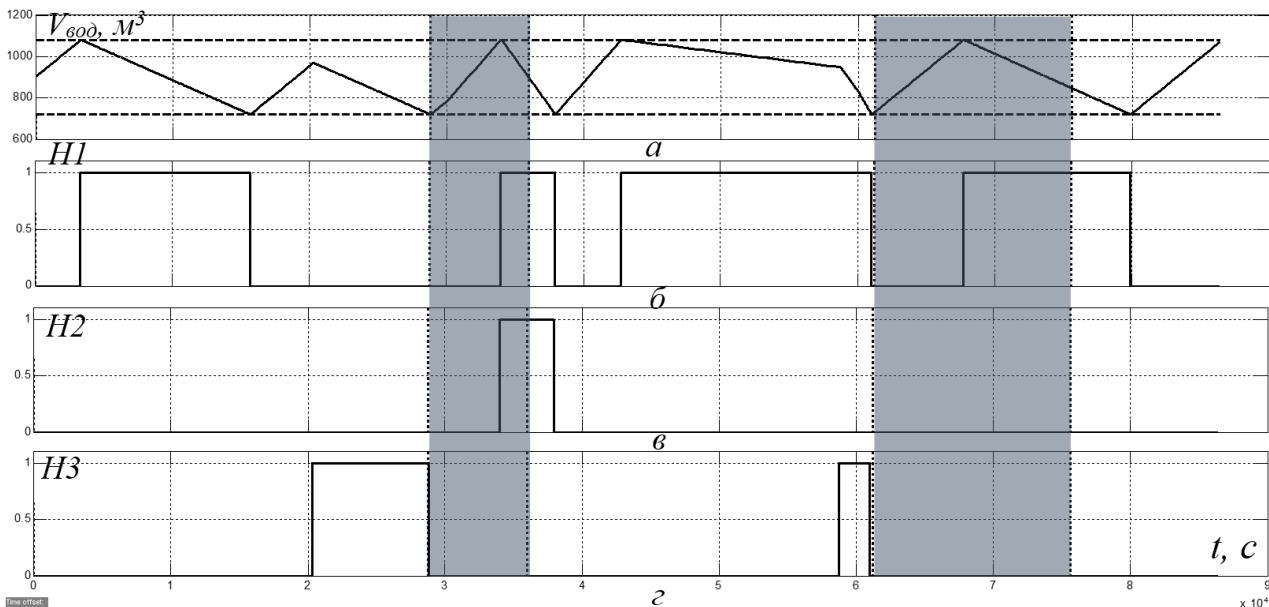


Рис. 6. Зміна у часі: *a* – об'єму води у водозбірнику; *б* – керуючого сигналу на насос №1; *в* – керуючого сигналу на насос №2; *г* – керуючого сигналу на насос №3 за умови незначного притоку води (насос №1 справляється), що змінюється східчасто, при новому алгоритмі керування

З рис.6 видно, що вмикання Насосу №3 перед зонами “час-пік” забезпечило відсутність споживання електроенергії насосами на більшій половині першої зони та протягом практично половини другої зони, що підтверджує ефективність запропонованого алгоритму.

На основі запропонованої імітаційної моделі системи автоматичного керування водовідливною установкою проведено моделювання роботи системи за умови керування насосами за існуючим алгоритмом та лінійної зміни у часі незначного притоку води у водозбірник (рис.7).

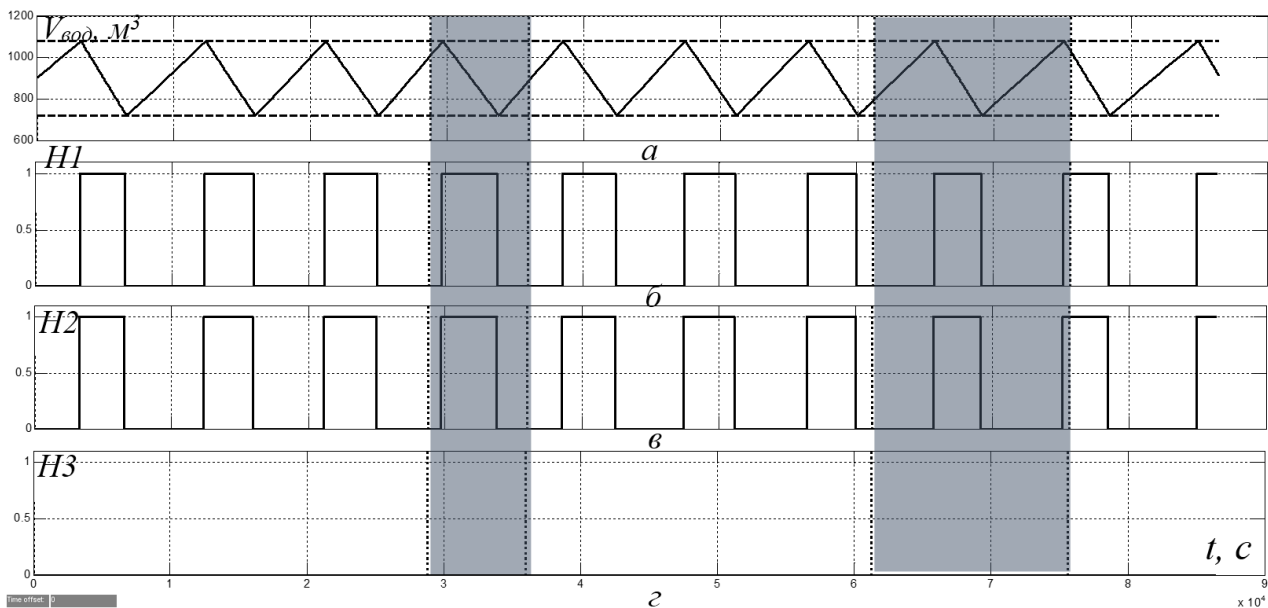


Рис. 7. Зміна у часі: *a* – об’єму води у водозбірнику; *б* – керуючого сигналу на насос №1; *в* – керуючого сигналу на насос №2; *г* – керуючого сигналу на насос №3 за умови незначного притоку води (насос №1 справляється), що змінюється лінійно, при старому алгоритмі керування

Результати на рис.7 практично такі ж, як і на рис.5, коли притік води змінювався у часі східчасто. Маємо невдале керування насосами протягом першої зони “час-пік”, та за збігом обставин входження у другу зону “час-пік” з майже мінімальним об’ємом води у водозбірнику.

На основі імітаційної моделі системи автоматичного керування водовідливною установкою (рис.1) проведено моделювання роботи системи за умови керування насосами за запропонованим алгоритмом та лінійної зміни у часі незначного притоку води у водозбірник (рис.8).

На відміну від попередніх випадків, з рис.8 ми бачимо, що при вході у першу зону “час-пік” Насос №3 не вмикається. Це пов’язане з тим, що поки працював Насос №1 час на відкачування води у водозбірнику до мінімального рівня було достатньо, тому Насос №3 не вмикався. Але, коли Насос №1 вимкнувся, через різке зменшення кількості води, що видаляється з водозбірника, часу, що залишився до входу у зону “час-пік”, Насосу №3 не вистачило для зменшення об’єму води у водозбірнику до мінімального рівня. Але, навіть за цієї умови на більшій частині першої зони маємо вимкнені стани насосів.

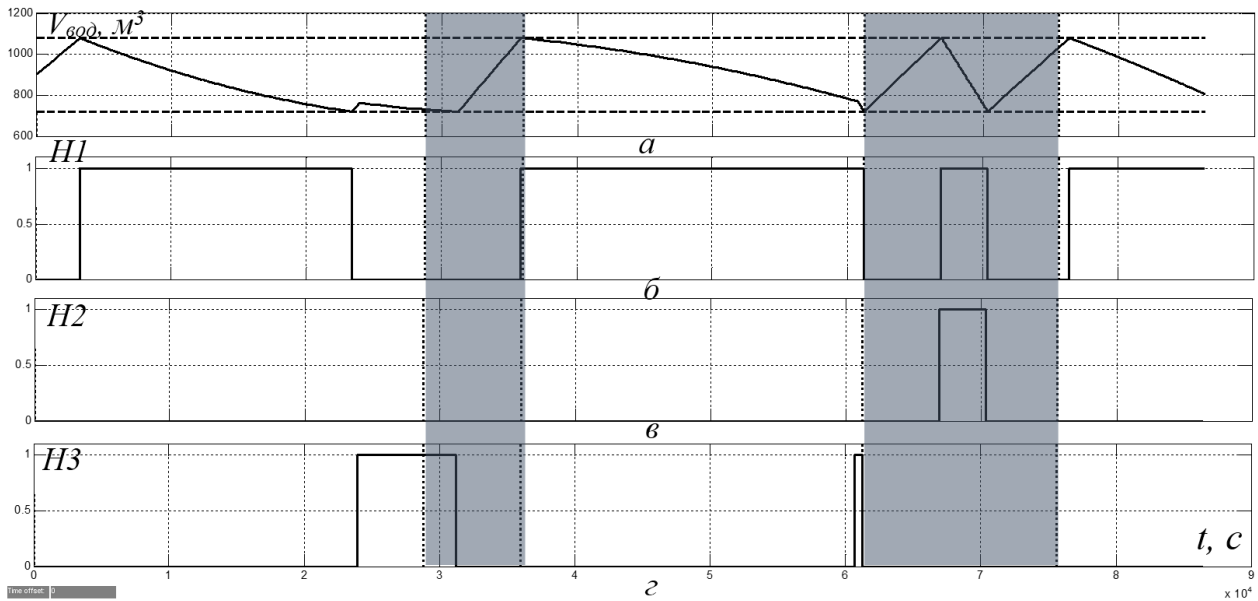


Рис. 8. Зміна у часі: *a* – об’єму води у водозбірнику; *б* – керуючого сигналу на насос №1; *в* – керуючого сигналу на насос №2; *г* – керуючого сигналу на насос №3 за умови незначного притоку води (насос №1 справляється), що змінюється лінійно, при новому алгоритмі керування

Аналогічним чином проведені дослідження за умови значного притоку води у водозбірник при його зміні у часі за схожими закономірностями. Результати цих досліджень у вигляді добової кількості споживаної електроенергії та її вартості з урахуванням тризонного тарифу на електроенергію представлені у табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз старого та нового алгоритмів автоматичного керування водовідливною установкою при різних характерах притоку води у водозбірник

Характер притоку води	Добова кількість споживаної електроенергії (старий алгоритм), кВт·год	Добова кількість споживаної електроенергії (новий алгоритм), кВт·год	Вартість споживаної електроенергії за добу (старий алгоритм), грн	Вартість споживаної електроенергії за добу (новий алгоритм), грн	Результат порівняння вартості електроенергії за умови переходу від старого алгоритму до нового
Постійний незначний притік	5465	5234	14700	12800	На 10% менше
Східчаста зміна у часі незначного притоку	6177	5978	17314	15082	На 11,1% менше
Лінійна зміна у часі незначного притоку	6915	6817	17099	15595	На 8,1% менше
Постійний значний притік	12020	11940	31636	30285	На 3,8% менше
Східчаста зміна у часі значного притоку	10500	10340	27230	26095	На 2,8% менше
Лінійна зміна у часі значного притоку	12030	12050	32864	30899	На 6,5% менше

**Висновки.** Увімкнення резервного насосу перед зонами “час-пік” з метою входження у зони з мінімальним рівнем об’єму води у водозбірнику при розрахунку вартості споживаної насосами електроенергії за тризонним тарифом дозволяє зменшити вартість електроенергії до 10% за умови притоку води менше продуктивності одного насосу, та до 5% за умови притоку води більше продуктивності одного насосу. Це пов’язано зі зменшенням пауз у роботі насосів при збільшенні притоку води (вода заповнює водозбірник швидше). Отже, навіть за умови входження у зону “час-пік” з мінімальним рівнем об’єму води, відношення часового інтервалу вимкнених насосів до тривалості зони пропорційно зменшується при збільшенні притоку води. У такому разі для збереження позитивного економічного ефекту запропонованого алгоритму керування насосами потрібно збільшувати продуктивність насосів.

Час вмикання маневреного насосу з метою входження у зони з мінімальним рівнем об’єму води у водозбірнику розраховується на основі рівності часу, що залишається до входження у зону “час-пік”, та часу, необхідного резервному насосу для відкачування ємності води, що дорівнює різності поточного об’єму води у водозбірнику, та об’єму води, що відповідає мініимальному рівню контрольованого діапазону зміни об’єму води.

#### Перелік посилань

1. Волотковский, С.А., Крюков, Д.К., Разумный Ю.Т. (1990). *Электрификация стационарных установок шахт*. Недра
2. Толпежников, Л.И. (1985). *Автоматическое управление процессами шахт и рудников*. Недра.
3. Попов, В.М. (1990). *Водоотливные установки*. Недра.
4. Разумный, Ю.Т., & Рухлов, А.В. (2012). *Аспекти вирішення проблем нерівномірності споживання електричної енергії*. Національний гірничий університет
5. Рухлова, Н.Ю. (2015). *Повышение энергоэффективности работы главного водоотлива угольной шахты в режиме потребителя-регулятора*. (Дис. канд. тех. наук). Національний гірничий університет.
6. Омелян, А. (2019, Лютий 2). *Цена электроэнергии для предприятий в Украине*. Відновлено з <https://axiomplus.com.ua/news/tarifyi-dlya-predpriyatiy/>
7. ДТЕК ДНІПРОВСЬКІ ЕЛЕКТРОМЕРЕЖІ (2021, Березень 1). *Ціни на універсальні послуги*. Відновлено з <https://yasno.com.ua/business/b2b-tariffs>

#### АННОТАЦИЯ

**Цель.** Уменьшение удельных энергозатрат на откачку воды на угольных шахтах путем минимизации временных интервалов включенных состояний насосов в часы-пик, когда стоимость электроэнергии максимальна.

**Методика исследований.** Для исследования автоматического управления водоотливной установкой использовано имитационное моделирование процесса откачки воды из водосборника на шахтном предприятии. При этом моделируется работа всей системы автоматического управления с использованием предложенного алгоритма включения/отключения насосов по критерию входения в час-пик по трех-зонному тарифу на электроэнергию с минимальным уровнем воды в водосборнике. Для доказательства эффективности работы системы автоматического управления по предложенному алгоритму с помощью имитационного моделирования

исследовано влияние переменных характеристик притока воды в водосборник на уровень воды на момент вхождения в час пик.

**Результаты исследования.** Выполненный анализ работы системы автоматического управления водоотливной установкой по предложенному алгоритму управления подтвердил эффективность использования маневренного насоса с определением времени его включения на основе прогнозирования динамики уровня воды в водосборнике с учетом характеристик насоса и притока воды для обеспечения минимального уровня воды в водосборнике на момент вхождения в час-пик. В зависимости от характеристик насоса и притока воды установлены условия получения более положительного эффекта от использования предложенного алгоритма управления водоотливной установкой.

**Научная новизна.** Время, необходимое маневренному насосу для откачки воды с целью вхождения в зону "час-пик" с минимальным уровнем воды в водосборнике, зависит прямо пропорционально от разности текущего объема воды в водосборнике и объема воды, соответствующего минимальному уровню, и обратно пропорционально от производительности маневренного насоса и скорости прироста текущего объема воды в водосборнике. При этом установлено, что величина уменьшения стоимости потребляемой электроэнергии на откачку воды при переходе от существующего алгоритма управления к предлагаемому зависит прямо пропорционально от длительности временных интервалов отключенных состояний основных насосов – чем меньше эта длительность, тем больше временной интервал работы основных насосов в час-пик и, соответственно, меньше величина уменьшения стоимости электроэнергии.

**Практическое значение.** Усовершенствован алгоритм автоматического управления водоотливной установкой на шахтном предприятии за счет использования критерия, в котором учитываются скорость прироста уровня воды в водосборнике и стоимость электрической энергии в разное время суток. С помощью имитационного моделирования исследовано и доказано, что разработанный алгоритм управления за счет включения маневренного насоса перед зонами "час-пик" с целью вхождения в зоны с минимальным уровнем объема воды в водосборнике, при расчете стоимости потребляемой насосами электроэнергии по трех-зонному тарифу, позволяет уменьшить стоимость потребляемой электроэнергии до 10% при условии притока воды меньше производительности одного насоса, и до 5% при условии притока воды больше производительности одного насоса.

**Ключевые слова:** энергоэффективность, водоотливная установка, автоматическое управление

#### ABSTRACT

**Objective is** to reduce the specific energy consumption for dewatering in coal mines by minimizing time intervals of the switched-on pumps during the peak load hours when the electric energy cost reaches its maximum.

**Research methodology.** Simulation modelling of water pumping from a water intake facility at a mining enterprise has been used to study automotive control of a water-removal plant. In this context, simulation of the whole system of automatic control is performed involving the proposed algorithm of pump switching on/off in terms of the criteria of entering the peak load hours according to the seasonal electric energy tariff with minimal water level in a water intake facility. The simulation modeling has helped analyze the effect of changeable characteristics of water inflow into the water intake facility upon the water level at the moment of entering the peak load hours to prove the efficient

operation of the automatic control system according to the proposed algorithm with the help of simulation modelling.

**Findings.** The carried out analysis of the operation of an automatic system to control a dewatering plant according to the proposed control algorithm has proved the efficiency of the use of a movable pump with the determination of its switch-on time on the basis of prognosis of water level dynamics in a water intake facility taking into account the pump characteristics and water inflow to provide minimal water level in a water intake facility at the moment of entering the peak load hours. The conditions of getting more positive effect from the use of the proposed algorithm for the dewatering plant control have been specified depending on the pump characteristics and water inflow.

**Originality.** The time necessary for a movable pump for dewatering aimed at entering the “peak load hours” zone with the minimal water level in a water intake facility is directly proportional to the difference between the current water volume in a water intake facility and the water volume, corresponding to a minimal level, and inversely proportional to the movable pump output as well as the rate of current water volume increment in a water intake facility. In this context, it has been identified that in terms of the transfer from the available control algorithm to the proposed one, the value of reduction of the consumed electric energy costs and the pumped water costs is in direct proportional dependence upon the duration of time intervals of the switched-on states of main pumps – the shorter that duration is, the longer time interval of the operation of main pumps during the peak load hours is, and, correspondingly, the lower value of the reduction of electric energy cost is.

**Practical implications.** An algorithm of automatic control of a dewatering plant at a mining enterprise involving the criterion that combines the rate of water level increment and electric energy cost at different day parts has been improved. The simulation modeling has made it possible to study and confirm the following: the developed algorithm of control at the expense of switching-on of a movable pump before the “peak load hours” zones aimed at entering the zones with minimal water volume level in a water inlet facility while calculating the costs of electric energy consumed by the pumps in terms of seasonal tariffs helps reduce the consumed energy costs by 10%, if water inflow is less than the one-pump output, and by 5%, if water inflow is more than the one-pump output.

**Keywords:** *energy efficiency, dewatering plant, automatic control*