

# ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНІ КОМПЛЕКСИ ТА СИСТЕМИ

УДК 622.233.6:-83:68.3

**А.О. Кожевников, д-р техн. наук, проф.,**  
**В.С. Хілов, д-р техн. наук, доц.,**  
**О.А. Борисевич, О.П. Бельчицький**

Державний вищий навчальний заклад „Національний гірничий  
університет“, м. Дніпропетровськ, Україна,  
e-mail: ABelchitskij@gmail.com

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ БУРІННЯ З ІМПУЛЬСНИМ ОБЕРТАННЯМ ІНСТРУМЕНТУ

**A.A. Kozhevnykov, Dr. Sci. (Tech.), Professor,**  
**V.S. Khilov, Dr. Sci. (Tech.), Associate Professor,**  
**O.A. Borysevych, O.P. Belchitskiy**

State Higher Educational Institution „National Mining University“,  
Dnepropetrovsk, Ukraine, e-mail: ABelchitskij@gmail.com

## EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE BORING TECHNOLOGY WITH PULSATING INSTRUMENT ROTATION

**Мета.** Визначення якісних і кількісних показників режимних параметрів технології руйнування гірничої породи при використанні імпульсного обертання долота.

**Методика.** В основу досліджень покладено апробований та визнаний метод натурального експерименту.

**Результати.** Запропоновано й проаналізовано режимні параметри технології буріння при змінній частоті обертання породоруйнівного інструменту. Зміна частоти обертання здійснювалась електромеханічним перетворювачем шляхом задання швидкості на зовнішній контур регулювання. Встановлено, що така технологія руйнування безпосередньо впливає на енергетичні параметри електромеханічної системи. Зроблено аналіз режимних параметрів електромеханічного привода обертання породоруйнівного інструменту. Враховано вплив зусилля подачі на енергетичні характеристики. У привідній системі враховано динамічні властивості швидкодіючого регульованого електропривода за системою перетворювач частоти-асинхронний двигун зі смугою пропускання контуру частоти обертання до ста радіан за секунду. Знайдено, що при застосуванні технології буріння з імпульсним обертанням інструменту зменшується енергоємність процесу руйнування. Одночасно підвищується механічна швидкість проходки свердловини. Встановлено, що енергоємність процесу буріння з імпульсною швидкістю обертання на різних матеріалах зменшується порівняно з постійною швидкістю обертання. Знайдено, що механічні швидкості буріння з імпульсною швидкістю обертання на різних матеріалах зростають порівняно з постійною швидкістю обертання. Встановлено, що запропонований задавач імпульсного обертання породоруйнівного інструменту електромеханічної системи є працездатним. Доведено, що при замиканні у привідній системі обертання породоруйнівного інструменту зовнішнього контуру регулювання по частоті обертання реалізується алгоритм керування процесом імпульсного руйнування, при якому забезпечується зростання механічної швидкості при руйнуванні міцних гірських порід. Це призводить до роботи долота в режимі енерго- та ресурсозбереження.

**Наукова новизна.** Уперше експериментально досліджено вплив режимних параметрів електромеханічної системи обертання породоруйнівного інструменту на якість процесу руйнування при використанні технології імпульсного обертання інструменту.

**Практична значимість.** Запропонована технологія буріння з імпульсним обертанням інструменту дозволяє суттєво зменшити енергоємність руйнування та підвищити механічну швидкість проходки свердловини.

**Ключеві слова:** *електромеханічна система, обертання інструменту, енергоємність, механічна швидкість*

**Постановка проблеми та її зв'язок із прикладними задачами.** При проведенні відкритих гірничих робіт буріння підриєвних свердловин – одна з основних і дорогих операцій. Також до основних проблем відкритого способу видобутку корисних копалин відноситься висока вартість бурових робіт.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Для збільшення ефективності буріння впроваджено імпульсну технологію зі змінним осьовим навантаженням. Крім того теоретично відомі ще шість різновидів імпульсних технологій буріння [1]. Вибір конкретної технології буріння залежить від можливості її практичної реалізації. На сьогодні найбільш доцільно реалізувати імпульсну технологію обертання. Це можливо зробити на підставі сучасних привідних систем.

**Постановка задачі дослідження.** Метою даної роботи є експериментальне дослідження технології буріння з імпульсним обертанням інструменту при руйнуванні гірської породи.

**Основний матеріал і результати дослідження.** Основою для експериментальних досліджень задавача частоти обертання бурового ставу є результати математичного моделювання, наведені у статті [2].

При обертальному бурінні руйнування гірської породи здійснюється за рахунок заглиблення породоруйнівного інструменту під дією статичного осьового зусилля (осьового навантаження) і обертального моменту на глибину  $h$ .

При бурінні твердосплавними коронками ця величина заглиблення різців  $h$  є товщиною стружки або проходкою на один різець на один оберт. Значення  $h$  залежить від осьового навантаження  $F$  і частоти обертання  $n$  інструменту за хвилину або секунду. Тоді механічна швидкість буріння  $V$  запишеться як  $V = knh$ , де  $k$  – кількість різців у буровій коронці.

Така ж залежність поширюється й на лопатеві долота.

При бурінні алмазними коронками, алмазними й шарошковими долотами визначити величину заглиблення одиничного породоруйнівного елемента складно, тому користуються параметром, що називається „проходкою на один оберт інструменту“  $h_{об}$ . Тоді механічна швидкість буріння для цих типів породоруйнівних інструментів запишеться як

$$V = nh_{об} \quad (1)$$

Значення  $h$  і  $h_{об}$  залежать від осьового навантаження  $F$  і частоти обертання  $n$ .

Проілюструємо цю залежність  $h=f(F,n)$  на прикладі даних із буріння граніту твердосплавними коронками ТКД у лабораторії Дніпропетровського гірничого інституту (зараз Національного гірничого університету) [1].

У табл.1 наведено значення  $h$  і відповідні значення механічної швидкості буріння  $V$  при зміні  $F$  (1000; 1500; 2000 даН) і  $n$  (74; 132; 242 хв<sup>-1</sup>). На рис.1. наведено залежність  $h=f(n)$  для різних  $F$ .

Таблиця 1

Значення величини заглиблення різців ( $h$ ) і механічної швидкості буріння ( $V$ ) при бурінні коронками ТКД

Швидкість обертання різця, $n, \text{хв}^{-1}$	Величина заглиблення різців, $h, \frac{\text{мм}}{\text{різець} \cdot \text{оберт}}$			Механічна швидкість буріння, $V, \frac{\text{см}}{\text{хв}}$		
	$F, \text{даН}$			$F, \text{даН}$		
	1000	1500	2000	1000	1500	2000
74	0,62	1,04	1,55	9,2	15,5	22,9
132	0,42	0,72	1,23	11,1	19,1	32,6
242	0,32	0,57	0,67	15,3	27,7	32,4

Дані табл. 1 і рис. 1. свідчать про те, що значення  $h$  ростуть як при зростанні  $F$ , так і при зменшенні  $n$ . Зміна  $V$  носить інший характер. Механічна швидкість буріння росте як при зростанні  $F$ , так і при зростанні  $n$ , не враховуючи зменшення  $h$  при зростанні  $n$ . Це пояснюється тим, що темп зростання  $n$  більше темпу зниження  $h$ .

Така залежність  $h$  і  $V$  спостерігається при стаціонарній технології буріння, коли  $F$  і  $n$  постійні в часі ( $F=const, n=const$ ).

Підвищити техніко-економічні показники буріння можна перейшовши від стаціонарної технології буріння до імпульсної, коли параметри режиму буріння (один, два або навіть усі три) змінні у часі. У цьому випадку зміниться характер взаємодії породоруйнівного інструменту з гірською породою вибою свердловини, що призведе до зміни  $h$  і  $V$ .

Розглянемо приклад імпульсної технології буріння при змінній частоті обертання, коли  $n$  – змінна. У цьому випадку процес буріння буде характеризуватися послідовним чергуванням фаз обертання інструменту з високим і невисоким значенням  $n$  (нижнє граничне значення може досягати нульової величини). Тоді на фазі невисоких значень  $n$  інструмент заглиблюється на більшу глибину  $h$  у породу (табл.1), а на фазі зростання  $n$  буде продовжувати руйнування породи з високим значенням  $h$ . А це, згідно з формулою (1), приведе до зростання  $V$ .

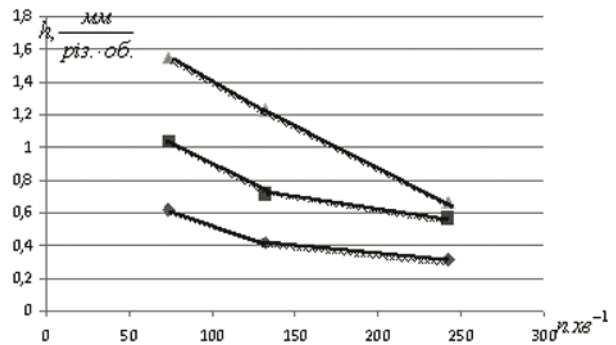


Рис. 1. Залежність величини заглиблення різців ( $h=f(n)$ ) від швидкості ( $n$ ) для різних значень навантаження ( $F$ ):

- ◆ –  $F = 1000 \text{ даН}$ ;
- –  $F = 1500 \text{ даН}$ ;
- ▲ –  $F = 2000 \text{ даН}$

Подальше зростання  $n$  приведе до зменшення  $h$ , але за фазою росту  $n$  піде фаза зменшення  $n$ , що приведе до зростання  $h$  і до зростання  $V$  на наступній фазі росту  $n$ .

Таким чином спосіб реалізації імпульсної технології буріння ( $n$  – змінна) приведе до зміни характеру взаємодії породоруйнівного інструменту з породою вибою свердловини – на фазі зменшення частоти обертання зростає товщина руйнування породи, що приведе до зростання механічної швидкості буріння. Цей ефект підсилиться, якщо на фазі зменшення частоти обертання швидкість стане рівною нулю ( $n=0$ ).

При бурінні за технологією „*n* – змінна“ буровий інструмент буде мати середньозважену частоту менше, ніж  $n = const$ , тобто при  $n$  – змінна

$$n_{ср.-зв.} = \frac{\int n(t)dt}{T},$$

де  $T$  – час циклу зміни частоти обертання.

Якщо імпульсна технологія буріння буде здійснюватися при середньозваженій частоті обертання інструменту меншою, ніж частота обертання при стаціонарній технології, то у цьому випадку буде мати місце менше зношування бурового інструменту. Це напряду призведе до енерго- та ресурсозбереження при проходці свердловин.

У дослідах обираємо основні значення параметрів імпульсу завдання:  $t_1=3c$  – час розгону до номінальної швидкості;  $t_3=3c$  – час буріння на номінальній швидкості;  $t_4=0,5c$  – час гальмування до мінімальної швидкості;  $t_2=7c$  – період імпульсів завдання;  $f=1/t_2=0,14$  Гц – циклічна частота роботи задавача швидкості, рис. 2.

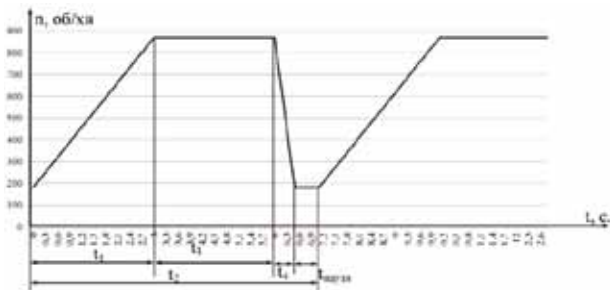


Рис. 2. Імпульс завдання швидкості обертання бурового інструменту для виконання дослідження

Для виконання експериментальних досліджень задавач імпульсного обертання електромеханічної системи було виготовлено експериментальну установку, що складається із свердлильного верстата, перетворювача частоти та задавача імпульсного обертання [3]. Схема дослідного стенду наведена на рис 3, 4.

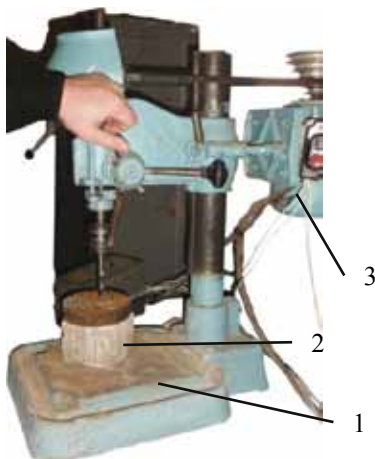


Рис. 3. Фото дослідного стенду: 1. станина; 2. дослідний матеріал; 3. двигун

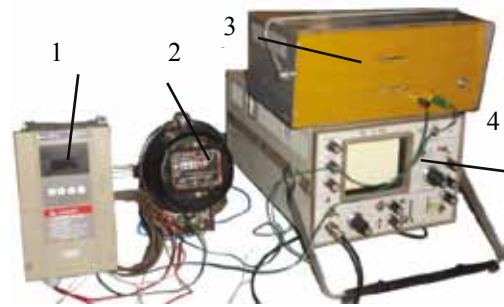


Рис. 4. Електрична частина стенду: 1. трифазний регульований інвертор напруги; 2. лічильник активної складової потужності; 3. задавач швидкості; 4. осцилограф

Оцінка можливості застосування імпульсної технології буріння на бурових верстатах з електроприводами змінного струму проводиться на дослідному стенді. Система живлення двигуна працює від трифазного регульованого інвертора напруги.

Визначення потужності та енергоемності процесу руйнування гірських порід при бурінні на дослідному стенді проводилося шляхом розрахунків. Вимірювання енергії виконувалось за допомогою лічильника, вимір часу секундоміром, форма сигналу завдання контролювалась за допомогою осцилографа, осьове навантаження – електронними вагами.

Розрахунок енергоемності процесу буріння виконувався за формулою

$$A = \frac{W}{V},$$

де  $W$  – витрати енергії на буріння в дослідному матеріалі;  $V$  – об'єм свердління.

Об'єм обчислимо за формулою

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h,$$

де  $d$  – діаметр свердловини;  $h$  – глибина буріння.

Швидкість буріння обчислимо за формулою

$$v = \frac{h}{t},$$

де  $t$  – час буріння.

Потужність процесу руйнування

$$P = W/t.$$

Досліди проводилися на матеріалах: мармур, силікатний блок, сталь, граб з вимірюванням значень навантаження, а також витраченої енергії. Для співставлення результатів виконувались контрольні досліди з постійною швидкістю обертання. Досліди виконувались при різних значеннях  $t_{нарузи}$  імпульсу завдання.

Досліди при бурінні мармурового блоку товщиною 32 мм проводились при навантаженні 42 даН. Отримані результати наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Результати дослідів імпульсного буріння мармурового блоку

Дослід з імпульсною швидкістю обертання								
Глибина буріння h, мм	n, об/хв	Час, t, с	Енергія W, кВт·г	t <sub>паузи</sub> , с	P, кВт	v, мм/с	V <sub>з</sub> , м <sup>3</sup>	A, кВт·г/м <sup>3</sup>
32	870-427	73	0,018	0,2	0,886	0,44	2,5·10 <sup>-6</sup>	7046
32	870-427	74	0,017	0,4	0,827	0,43	2,5·10 <sup>-6</sup>	6980
32	870-427	68	0,016	0,5	0,847	0,47	2,5·10 <sup>-6</sup>	6374
32	870-427	74	0,0172	0,9	0,836	0,43	2,5·10 <sup>-6</sup>	6930
32	870-427	78	0,0177	1	0,819	0,41	2,5·10 <sup>-6</sup>	7070
Дослід з постійною швидкістю обертання								
32	870	87	0,0188	-	0,778	0,36	2,5·10 <sup>-6</sup>	7490

У результаті дослідів встановлено, що максимальний приріст швидкості свердління становить 30%, а зменшення енергоємності 17%.

Досліди при бурінні на силікатному блоці товщиною 32 мм проводились при навантаженні 42 даН. Отримані результати наведені у табл.3.

Таблиця 3

Результати дослідів імпульсного буріння силікатного блоку

Дослід з імпульсною швидкістю обертання								
Глибина буріння h, мм	n, об/хв	Час, t, с	Енергія W, кВт·г	t <sub>паузи</sub> , с	P, кВт	v, мм/с	V <sub>з</sub> , м <sup>3</sup>	A, кВт·г/м <sup>3</sup>
32	870-427	51	0,014	0,1	0,98	0,62	2,5·10 <sup>-6</sup>	5812
32	870-427	45	0,0132	0,5	1,05	0,71	2,5·10 <sup>-6</sup>	5175
32	870-427	50	0,0138	1	0,99	0,64	2,51·10 <sup>-6</sup>	5772
Дослід з постійною швидкістю обертання								
32	870	60	0,015	-	0,9	0,53	2,5·10 <sup>-6</sup>	5971

У результаті дослідів встановлено, що максимальний приріст швидкості свердління становить 34%, а зменшення енергоємності 15%.

Досліди на сталевій пластині товщиною 30 мм виконувались при навантаженні 28 даН. Отримані результати наведені в табл.4.

Таблиця 4

Результати дослідів імпульсного буріння на сталевій пластині

Дослід з імпульсною швидкістю обертання								
Глибина буріння h, мм	n, об/хв	Час, t, с	Енергія W, кВт·г	t <sub>паузи</sub> , с	P, кВт	v, мм/с	V <sub>з</sub> , м <sup>3</sup>	A, кВт·г/м <sup>3</sup>
30	870-427	175	0,0189	0,5	0,388	0,17	2,3·10 <sup>-6</sup>	8025
Дослід з постійною швидкістю обертання								
30	870	225	0,0192	-	0,3	0,13	2,3·10 <sup>-6</sup>	8152

У результаті дослідів встановлено, що приріст швидкості свердління становить 30% а зменшення енергоємності 1,6%.

Досліди на бруську граба товщиною 30 мм, виконувались при навантаженні 28 даН. Отримані результати наведені в табл. 5.

Таблиця 5

Результати дослідів імпульсного буріння бруську граба

Дослід з імпульсною швидкістю обертання								
Глибина буріння h, мм	n, об/хв	Час, t, с	Енергія W, кВт·г	t <sub>паузи</sub> , с	P, кВт	v, мм/с	V <sub>з</sub> , м <sup>3</sup>	A, кВт·г/м <sup>3</sup>
30	870-427	22	0,0126	0,5	0,88	1,36	2,3·10 <sup>-6</sup>	5350
Дослід з постійною швидкістю обертання								
30	870	43	0,013	-	0,8	0,69	2,3·10 <sup>-6</sup>	5520

У результаті дослідів встановлено що приріст швидкості свердління становить 97%, а зменшення енергоємності 3,1%.

Загальні результати буріння по блоках різних матеріалів зведені в табл. 6.

Таблиця 6

Зведені результати експериментальних досліджень технології буріння з імпульсним обертанням інструменту

Матеріал	Зростання швидкості буріння v, %	Зменшення енергоємності A, %
Мармур	30	17
Силікат	34	15
Сталь	30	1,6
Граб	97	3,1

**Висновки та напрям подальших досліджень.** У результаті проведених експериментальних досліджень можливо зробити наступні висновки:

- запропонований задавач імпульсного обертання породоруйнівного інструменту електромеханічної системи є працездатний;
- енергоємність процесу буріння з імпульсною швидкістю обертання на різних матеріалах зменшується порівняно з постійною швидкістю обертання;
- швидкість буріння з імпульсною швидкістю обертання на різних матеріалах зростає порівняно з постійною швидкістю обертання.

У подальшому дослідження будуть спрямовані на вивчення впливу піддатливості бурового поставу на динамічні процеси при бурінні з імпульсним обертанням інструменту.

**Список літератури / References**

1. Кожевников А.А. Импульсные технологии бурения геологоразведочных скважин / Кожевников А.А.,

Гошовский С.В., Мартыненко И.И. – К.: УкрГГРИ, 2003. – 208 с.

Kozhevnikov, A.A., Goshovskiy, S.V. and Martynenko, I.I. (2003), *Impulsnye tekhnologii bureniya geologorazvedochnykh skvazhin* [Impuls Technologies of Geological Prospecting Wells Boring], Kiev, UkrGGRI, p. 208

2. Розробка задавача імпульсного обертання електропривода бурового верстата / [Бешта О.С., Кожевников А.О. Хілов В.С. та ін. ] // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: ДВНЗ „НГУ“, 2011. – № 5 (125) – С. 103–107.

Beshta, O.S., Kozhevnykov, A.O., Khilov V.S., Voryseyvych O.A. and Belchitskiy, O.P. (2011) “Working out setpoint of pulse rotation of the electric drive of the chisel machine tool”, *Naukovyy visnyk Natsionalnoho hirnychoho universytetu*, no. 5, p. 103–107.

3. Хілов В.С. Способ управления приводом вращения станка шарошечного бурения / В.С. Хілов // Гірничая електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ, 2004. – Вип.72. – С. 116–119.

Khilov, V.S. (2004), “Way of roller-bit drilling rig rotary drive control”, *Girnichaya elektromekhanika ta avtomatyka*, no. 72, p. 116–119

**Цель.** Определение качественных и количественных показателей режимных параметров технологии разрушения горной породы при использовании импульсного вращения долота.

**Методика.** В основу исследования положен апробированный и признанный метод натурального эксперимента.

**Результаты.** Предложены и проанализированы режимные параметры технологии бурения при переменной частоте вращения породоразрушающего инструмента. Изменение частоты вращения осуществлялось электромеханическим преобразователем путем задания скорости на внешний контур регулирования. Установлено, что такая технология разрушения непосредственно влияет на энергетические параметры электромеханической системы. Сделан анализ режимных параметров электромеханического привода вращения породоразрушающего инструмента. Учтено влияние усилия подачи на энергетические характеристики. В приводной системе учтены динамические свойства быстродействующего плавнорегулируемого электропривода по системе преобразователь частоты–асинхронный двигатель с полосой пропускания контура частоты вращения до ста радиан в секунду. Найдено, что при применении технологии бурения с импульсным вращением инструмента уменьшается энергоёмкость процесса разрушения. Одновременно повышается механическая скорость проходки буровой скважины. Установлено, что энергоёмкость процесса бурения с импульсной скоростью вращения на разных материалах уменьшается по сравнению с постоянной скоростью вращения. Найдено, что механические скорости бурения с импульсной скоростью вращения на разных материалах возрастают по сравнению с постоянной скоростью вращения. Установлено, что предложенный задатчик

импульсного вращения породоразрушающего инструмента электромеханической системы является работоспособным. Доказано, что при замыкании в приводной системе вращения породоразрушающего инструмента внешнего контура регулирования по частоте вращения реализуется алгоритм управления процессом импульсного разрушения, при котором обеспечивается возрастание механической скорости при разрушении крепких горных пород. Это приводит к работе долота в режиме энерго- и ресурсосбережения.

**Научная новизна.** Впервые экспериментально исследовано влияние режимных параметров электромеханической системы вращения породоразрушающего инструмента на качество процесса разрушения при использовании технологии импульсного вращения инструмента.

**Практическая значимость.** Предложенная технология бурения с импульсным вращением инструмента позволяет существенно уменьшить энергоёмкость разрушения и повысить механическую скорость проходки буровой скважины.

**Ключевые слова:** электромеханическая система, вращение инструмента, энергоёмкость, механическая скорость

**Purpose.** To determine qualitative and quantitative indicators of the mode parameters of the geological material destruction technology using pulse bit rotation.

**Methodology.** In the basis of research we put the approved method of full-scale experiment.

**Findings.** We have proposed and analyzed the mode parameters of boring technology with variable frequency of rotation of rock cutting tool. Rotation frequency change was realized by electromechanical converter through setting velocity on outer contour of regulation. We have found out that the destruction technology affects directly the energy parameters of the electromechanical system. We have analyzed the mode parameters of electromechanical drive of the rotation of rock cutting tool. The influence of the weight capacity on energy characteristics has been taken into account. In the drive system we have taken into account dynamic properties of high-performance continuously adjustable drive as to the system ‘frequency converter – asynchronous engine with rotation frequency band under 100 radians per second. We have found out that application of the boring technology with variable frequency of rotation of rock cutting tool decreases power consumption of the rock destruction process. At the same time, the mechanical speed of bore-hole driving rises. The operability of the suggested pulse rotation setting mechanism of the rock cutting instrument has been proved. The suggested method of operation appears power-saving and resource-saving.

**Originality.** For the first time we have experimentally investigated the influence of the mode parameters of the electromechanical system of the rotation of rock cutting instrument on the quality of the process of rock

destruction by means of the technology of pulse rotation of instrument.

**Practical value.** Suggested technology of boring with pulse rotation of instrument allows us to decrease essentially energy consumption of rock destruction and to raise the mechanical speed of bore-hole driving.

**Keywords:** *electromechanical system, rotation of instrument, energy intensity, mechanical speed*

*Рекомендовано до публікації докт. техн. наук В.І. Корсуном. Дата знаходження рукопису 07.08.12.*

УДК 621.311.001.57

**В.Ф. Сивокобиленко, д-р техн. наук, проф.,  
С.В. Василець, канд. техн. наук**

Державний вищий навчальний заклад „Донецький національний технічний університет“, м. Донецьк, Україна,  
e-mail: svyat.vasilets@gmail.com

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОГО КОМПЛЕКСУ ШАХТИ З СИНХРОННИМИ ТА АСИНХРОННИМИ ДВИГУНАМИ

**V.F. Syvokobylenko, Dr. Sci. (Tech.), Professor,  
S.V. Vasylets, Cand. Sci. (Tech.)**

State Higher Educational Institution “Donetsk National Technical University”, Donetsk, Ukraine,  
e-mail: svyat.vasilets@gmail.com

## MATHEMATICAL MODELL OF MINE ELECTROTECHNICAL COMPLEX WITH SYNCHRONOUS AND INDUCTION MOTORS

**Мета.** Обґрунтування математичної моделі електротехнічного комплексу шахти, що включає синхронні та асинхронні двигуни.

**Методика.** Методика досліджень включає складання топологічного опису схеми заміщення мережі за допомогою теорії графів, що дозволяє отримати матрицю головних перетинів та скласти матричні рівняння стану резистивних та реактивних елементів схеми заміщення електротехнічного комплексу шахти, причому в останньому випадку використовується метод змінних стану, що передбачає формування диференціальних рівнянь відносно струмів індуктивних хорд та напруг ємнісних ребер. Синхронні та асинхронні двигуни, що представляються у схемі заміщення електротехнічного комплексу джерелами струму, керованими напругами, описуються матричними диференціальними рівняннями, які об'єднуються з рівняннями стану *RLC*-системи в єдине матричне диференціальне рівняння стану електротехнічного комплексу, для чисельного розв'язання якого обґрунтована доцільність використання жорстко-стійкого багатозначного методу Гіра-Нордсіка зі змінним кроком інтегрування.

**Результати.** Обґрунтовано математичну модель електротехнічного комплексу шахти, що включає джерела живлення, трансформатори, комутаційні апарати, силові кабелі, синхронні та асинхронні двигуни, у вигляді матричного диференціального рівняння у формі Коши.

**Наукова новизна.** Дістала подальшого розвитку математична модель електротехнічного комплексу шахти, що базується на використанні матричних диференціальних рівнянь стану реактивних елементів схеми заміщення системи, синхронних та асинхронних двигунів, яка відрізняється врахуванням взаємного впливу електродвигунів у мережі довільної конфігурації та можливістю комплексного дослідження стану системи в аварійних режимах усіх можливих типів.

**Практична значимість.** Полягає в розробці прикладної комп'ютерної програми з графічним інтерфейсом “MinePowerNet”, використання якої дозволяє досліджувати усталені та перехідні процеси в електротехнічних комплексах шахт конкретної конфігурації при комутаціях, зміні режимних параметрів та аварійних станах синхронних та асинхронних двигунів рудничного електропривода.

**Ключові слова:** *моделювання, вугільна шахта, диференціальне рівняння, матриця, напруга*

**Актуальність проблеми та її зв'язок із прикладними задачами.** Підвищення техніко-економічних показників функціонування електротехнічного комплексу (ЕТК) шахти можливе за рахунок [1]: переведення високовольтного електрообладнання на напругу 10 кВ; застосування в дільничних мережах напруги 3 (3,3) кВ; впровадження частотно-керованих еле-

ктроприводів стаціонарних установок та вугледобувних машин і т.і. Розв'язання цих задач потребує уточнення методики вибору електрообладнання [2], підвищення точності розрахунку уставок існуючих захисних апаратів, проектування цифрових засобів захисту з покращеними характеристиками. Це вимагає більш точного обрахування перехідних процесів при запуску, відключенні або перевантаженні електродвигунів, виникненні дво- та трифазних коротких за-