

УДК 622.232.72.063.43:681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/EIS/2023-104-6>

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ РОБОТИ ВИДОБУВНИХ КОМБАЙНІВ ДЛЯ ТОНКИХ ПЛАСТІВ СУЧАСНИМИ РЕГУЛЯТОРАМИ

**Бублік Андрій Вікторович,**

доктор технічних наук, професор,  
завідувач кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем  
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»  
ORCID ID: 0000-0003-3015-6754  
Scopus Author ID: 55998596600

**Яцюк Дмитро Степанович,**

аспірант групи 151А-21  
Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»  
ORCID ID: 0009-0007-3439-9282

**Метою** є виконання аналізу ефективності роботи сучасних регуляторів навантаження в умовах обмеженої завантажувальної здатності виконавчих органів видобувних комбайнів для формування рекомендацій щодо адаптації існуючих алгоритмів автоматичного керування комбайном з урахуванням гірничо-геологічних умов тонких вугільних пластів.

**Метод.** Для отримання робочих характеристик видобувного комбайна з метою аналізу на їх основі ефективності роботи регулятора навантаження використане імітаційне моделювання процесів руйнування вугільного масиву виконавчим органом, завантаження ним вугілля на забійний конвеєр, а також процесів перетворення енергії в електроприводі різання. За вихідні дані взяті реальні технічні характеристики комбайна та гірничо-геологічні параметри одного із пластів, що в минулому розробляється шахтним підприємством України.

**Результати.** Аналіз ефективності роботи сучасних регуляторів навантаження видобувних комбайнів показав, що в умовах тонких вугільних пластів основним обмеженням швидкості подачі комбайнів є запобігання заштибуванню виконавчого органу. Саме це обмеження суттєвим чином впливає на ефективність роботи сучасних регуляторів навантаження на комбайнах за критерієм мінімальних питомих енерговитрат. Ефективність регулятора можна оцінити за розташуванням точки, що відповідає поточному режиму роботи комбайна, на графіку статичної залежності потужності двигуна приводу різання та питомих енерговитрат на видобуток вугілля від швидкості подачі комбайна. Аналіз цього графіка дозволив виділити умови ефективною роботи комбайна за критеріями продуктивності, питомих енерговитрат і якості вугілля, запропонувати відповідні рекомендації щодо вдосконалення алгоритмів керування, що використовуються в сучасних регуляторах навантаження комбайнів.

**Практичне значення.** Виявлені закономірності щодо залежності продуктивності видобувного комбайна та питомих енерговитрат на видобуток вугілля від режимів роботи комбайна дозволять урахувати явище заштибування виконавчого органу в алгоритмі автоматичного керування сучасних регуляторів навантаження, завдяки цьому зменшити невіправдані витрати електроенергії під час роботи комбайна.

**Ключові слова:** видобувний комбайн, тонкі вугільні пласти, регулятор навантаження.

**Bublikov Andrii, Yatsiuk Dmytro. Analysis of the effectiveness of operation modes of shearers via modern regulators**

**The objective** is to perform an analysis of the effectiveness of modern load regulators in conditions of limited loading capacity of the executive bodies of shearers to form recommendations for adapting the existing algorithms of automatic control of the shearers taking into account the mining and geological conditions of thin coal seams.

**Method.** To obtain the working characteristics of the shearer in order to analyze the efficiency of the load regulator based on them, simulation modeling of the processes of the destruction of the coal massif by the executive body, loading of coal onto the slaughter conveyor, as well as the processes of energy conversion in the electric cutting drive was used. At the same time, the real technical characteristics of the shearer and the mining and geological parameters of one of the seams, which was developed in the past by a mining enterprise of Ukraine, were taken as the initial data.

**The results.** The analysis of the efficiency of modern load regulators of shearer showed that in the conditions of thin coal seams, the main limitation of the feed rate of shearers is the prevention of jamming of the executive body. It is this limitation that significantly affects the efficiency of modern load regulators on shearers based on the criterion of minimum specific energy consumption. At the same time, the effectiveness of the regulator can be estimated by the location of the point corresponding to the current mode of operation of the shearer on the graph of the static

*dependence of the engine power of the cutting drive and the specific energy consumption for coal mining on the feed rate of the shearer. The analysis of this schedule made it possible to identify the conditions for the efficient operation of the shearer according to the criteria of productivity, specific energy consumption and coal quality, and to offer appropriate recommendations for improving the control algorithms used in modern load regulators of shearers.*

**Practical meaning.** *The revealed regularities regarding the dependence of the productivity of the shearer and the specific energy consumption for coal mining on the modes of operation of the shearer will make it possible to take into account the phenomenon of jamming the executive body in the algorithm of automatic control of modern load regulators, and due to this, reduce unjustified consumption of electricity during the operation of the shearer.*

**Key words:** *shearer, thin coal seams, load regulator.*

**Вступ.** Натепер у підземному видобутку вугілля до складу вугледобувного комплексу гірничих машин здебільшого входить видобувний комбайн, який здійснює руйнування вугільного пласта та, якщо передбачено конструкцією виконавчих органів, завантаження вугілля на забійний конвеєр. Залежно від технології видобутку вугілля, гірничо-геологічних умов і технічних параметрів, питоме енергоспоживання видобувних комбайнів за нормальних режимів роботи коливається в межах 0,25–0,55 кВт·год/т. Тому видобувні комбайни вважають основним енергоспоживачем серед гірничих машин, що працюють у вибої. Багато досліджень процесу руйнування вугілля виконавчими органами та його завантаження на вибійний конвеєр [1; 2] показали тісну залежність рівня витрат електроенергії від режиму роботи видобувного комбайна. Відзначено, що для конкретних умов видобутку вугілля та технічних параметрів видобувного комбайна існує оптимальне значення товщини стружки вугілля, що знімається різцем виконавчого органу, за якого середні питомі енерговитрати мінімальні. Причому відхилення в деяких випадках від даного значення товщини стружки призводить до суттєвого підвищення витрат електроенергії на руйнування та завантаження вугілля, а також погіршення його гранулометричного складу. Стаття присвячена розгляду випадку, коли сучасне керування режимами роботи видобувних комбайнів не забезпечує раціональну роботу комбайнів за критеріями мінімальних питомих енерговитрат і якісного сортового складу вугілля.

Відсоток розроблюваних вибоїв на тонких пластах у Донецькому басейні від загальної кількості становить приблизно 80% [3]. Отже, одним з основних напрямів у галузі проектування видобувних комбайнів тепер є вдосконалення конструкції комбайнів із метою можливості їх ефективного застосування в обмеженому просторі. Однак корінного перегляду потребує також алгоритм керування режимами роботи комбайнів, що застосовуються на тонких пластах, особливо з виконавчими органами, які здійснюють завантаження вугілля. У всіх сучасних регуляторах навантаження, якими забезпечені

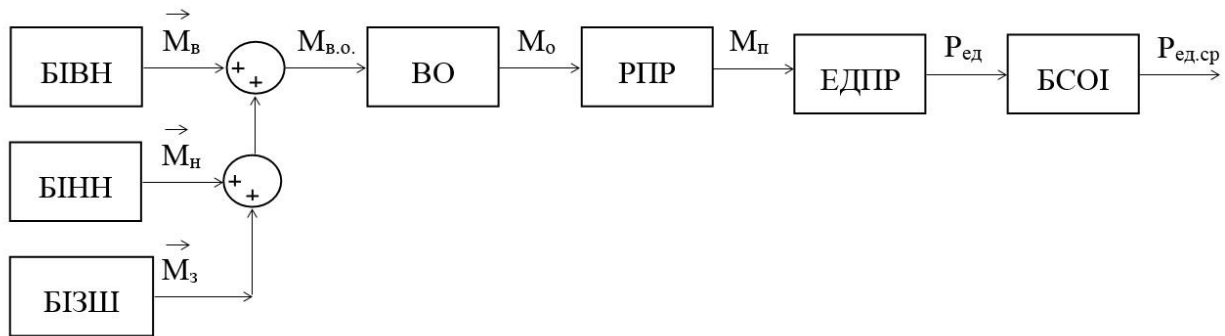
видобувні комбайни, підтримується так званий мінімальний спосіб автоматизації. Вони органічно підтримують два режими з автоматичним переходом з одного до іншого:

- стабілізацію навантаження двигуна приводу різання завдяки зміні швидкості подачі з урахуванням обмежень щодо транспортної здатності конвеєра, допустимої концентрації метану й інших чинників;

- стабілізацію швидкості подачі за незмінної швидкості різання з обмеженням за перевантажувальною здатністю двигуна приводу різання та названими вище чинниками.

**Метод.** З метою виявлення недоліків наявного способу керування під час роботи видобувного комбайна на тонких пластах була розроблена математична модель «вибій – виконавчий орган – видобувний комбайн» для видобувного комбайна УКД300 [4] та гірничо-геологічних умов четвертої західної лави Лідівського пласта Донецьк басейну [5]. Загальна структурна схема математичної моделі показана на рис. 1.

Тут БІВН – блок імітації високочастотної складової навантаження на виконавчому органі. Він є генератором випадкового сигналу з нормальним розподілом, статистичні характеристики якого є функціями математичного очікування сумарної сили різання на різцях, а також режиму транспортування та завантаження вугілля виконавчим органом. Частота даного сигналу прийнята рівною власній частоті вільних коливань ротора електродвигуна ЕКВ4-150, через які на його амплітудно-частотній характеристиці утворюється резонансна зона. Оскільки на цій частоті відбувається посилення амплітуди сигналу у 2,5–3,5 рази, то весь спектр високочастотних складових частин навантаження, що пройшли через виконавчий орган, без суттєвого спотворення картини динамічних процесів, що протікають, можна замінити одним випадковим сигналом із резонансною частотою електродвигуна [6]; БІНН – блок імітації низькочастотної складової навантаження на виконавчому органі. Цей блок є генератором випадкового сигналу з нормальним розподілом величини з постійним значенням дисперсії та



**Рис. 1. Загальна структурна схема математичної моделі «вибій – виконавчий орган – видобувний комбайн»**

математичним очікуванням, однак зі змінним значенням періоду. Частота даного сигналу є функцією швидкості подачі комбайна та простору кореляції, який, у свою чергу, залежить від типу механізованого кріплення, що застосовується, швидкості просування фронту роботи лави, гірничо-геологічних параметрів пласта; БІЗШ – блок імітації процесу завантаження та транспортування вугілля шнековим виконавчим органом. Вмістом його є математична модель, що описує силову картину процесу транспортування вугілля та його завантаження органом [2]. Математична модель транспортування та завантаження вугілля дозволяє визначити миттєві значення тиску вугілля на лопать шнека, силу та момент опору руху та завантаженню вугілля; ВО – передавальна функція виконавчого органу. За своїми частотними характеристиками виконавчий орган є лінійним пасивним фільтром, що виключає передачу високочастотних складових навантаження від вихідного вала органу до ротора [1]. Передавальна функція за впливом є нелінійною функцією товщини стружки, але в реальному діапазоні навантажень може бути лінеаризована з належною для практичних розрахунків точністю [6]. Отже, за незмінної швидкості подачі комбайна ВО можна прийняти підсилювальною ланкою з постійним коефіцієнтом посилення; РПР – редуктор приводу різання. У даному блоці зроблено математичний опис руху двомасової динамічної системи з урахуванням пружних і дисипативних властивостей механічної частини приводу; ЕДПР – електродвигун приводу різання. Електромеханічні процеси перетворення енергії, що мають місце в електродвигуні ЕКВ4-150, моделювалися за диференціальними рівняннями для узагальненої електричної машини із прив'язкою до системи координат  $\alpha$ ,  $\beta$  і короткозамкнутою обмоткою ротора [6]; БСОІ – блок виміру та статистичної обробки миттєвих значень споживаної потужності.

У блоці статистичної обробки інформації визначається математичне очікування активної потужності, що споживається електродвигуном протягом тривалого (7 оборотів органу) інтервалу часу, за умови заміру миттєвих значень із кроком 10 мілісекунд. Водночас розраховані середні значення потужності, що витрачається на руйнування вугілля, та потужності завантаження за формулами, запропонованими у джерелах [1; 2]. Максимальна відносна похибка розбіжності середніх значень активної потужності електродвигуна, обчислених за детермінованою та динамічною моделями, становила не більше 5%. Це є непрямым підтвердженням адекватності розробленої динамічної моделі фізичних процесів, що мають місце під час роботи видобувних комбайнів.

**Результати.** На рис. 2 показані отримані в результаті моделювання статичні залежності споживаної електродвигуном приводу різання потужності та питомих енерговитрат видобутку вугілля від швидкості подачі за різних значень потужності пласта. Оскільки кожен привод різання має свій електродвигун, момент від якого подається на один виконавчий орган, моделювання робочих характеристик комбайна проводилось тільки для випереджального нижнього органу, на який припадає 80–100% загального навантаження.

За методиками, наведеними в [1; 7], розраховано стійку потужність електродвигуна ЕКВ4-150 в умовах шахтної мережі напругою 1140 В, за довжини кабельної мережі від підстанції до комбайна 500 метрів. Прийнято, що комбайн працює на в'язкому вугіллі марки Г.

Суцільною, пунктирною та штрихпунктирною лініями позначені залежності за потужностей пласта відповідно 1,0, 0,95 і 0,9 метрів. Еквівалентне значення опірності вугілля різанню прийнято рівним 110,6 Н/мм. Точками А, Б і В позначено точку режиму роботи комбайна УКД300 на межі заштибування виконавчого

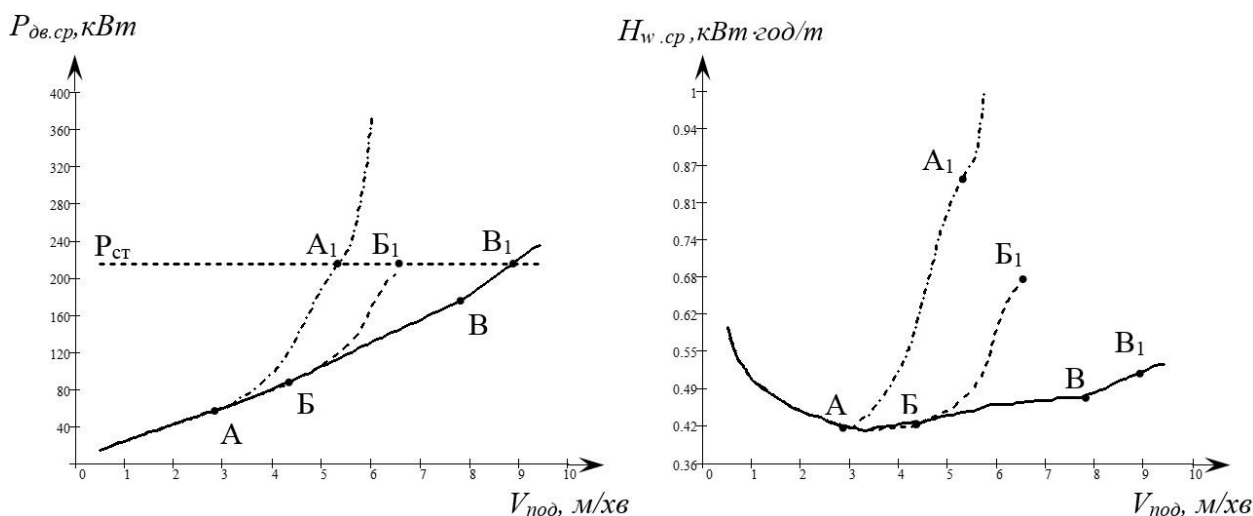
органу. Точками А1, Б1, В1 позначено точку режиму роботи комбайна з максимальним використанням потужності електродвигуна приводу різання. Як видно з рис. 2, робота з максимальною продуктивністю видобувного комбайна можлива лише в режимі заштибування шнека. Проаналізуємо роботу видобувного комбайна УКД300 під час управління ним сучасними регуляторами навантаження.

У разі потужності пласта, що дорівнює метру, коли орган піднятий над бортом конвеєра на 0,1 м, процес заштибування незначний і якийсь час (17 оборотів шнека) протікає у відносно стійкій динамічній рівновазі, коли об'єм зруйнованого вугілля, що надійшло в робочий простір органу, та вугілля, що «циркулює» та залишається потім на ґрунті, ненабагато перевищує робочий об'єм органу. Із часом поступово відбувається накопичення вугілля, що циркулює, його тиск на лопату та споживана двигуном потужність істотно збільшуються, проте регулятор навантаження, згідно із проведеним на математичній моделі експериментом, встигає зреагувати та знизити швидкість подачі, перейшовши до точки В, поки виконавчий орган не пройде зону з вугіллям на ґрунті, що накопичилось. Робота видобувного комбайна водночас протікатиме з коливаннями швидкості подачі між 7,0 і 8,9 м/хв (точки В і В1) та утримуванням деякий час цих значень. Питоме енергоспоживання також коливатиметься між значеннями 0,4766 та 0,5257 кВт·год/т. Тобто матиме місце часткове заштибування органу з підвищенням середніх питомих енерговитрат на 6,5 %.

За збільшення опірності вугілля різанню точка В1 переміститься в зону ліворуч від точки В, завдяки чому регулятор навантаження виключить виникнення заштибування органу, оскільки споживана електродвигуном потужність досягне стійкого значення раніше, ніж швидкість подачі критичного значення за заштибуванням. У разі зменшення опірності вугілля різанню, у мить досягнення потужності стійкого значення її зростання може виявитись настільки інтенсивним, тобто процес заштибування буде настільки тривалим, що зменшення швидкості подачі регулятором навантаження навіть до нульового значення не запобіжить перекиданню електродвигуна. Аналогічна ситуація, як очевидно з рис. 2, виникне також у разі зменшення потужності пласта. Так, у точках А1 і Б1 видобувний комбайн через заштибування виконавчого органу споживає потужність відповідно у 3,92 і 2,5 рази більше, ніж під час роботи в режимі на межі заштибування. Щоразу, коли регулятор навантаження задаватиме швидкість подачі істотно правіше критичного значення за заштибуванням, відбуватиметься перевантаження та зупинка електродвигуна приводу різання.

**Висновки.** З отриманих результатів моделювання можна зробити такі висновки:

– ефективність керування видобувними комбайнами для тонких пластів сучасними регуляторами навантаження залежить від взаємного розташування точок, що відповідають режимам роботи на межі заштибування та з максимальною продуктивністю, на графіках статичної залежності споживаної потужності та питомих енерговитрат від швидкості подачі.



**Рис. 2. Залежність споживаної потужності та питомих енерговитрат від швидкості подачі комбайна за різних значень потужності пласта**

У разі розташування останньої значно правіше першої, робота видобувного комбайна в нормальному режимі неможлива. За умови розташування останньої правіше першої, але незначної різниці координат цих точок, видобувний комбайн працюватиме із частковим заштибуванням органу з підвищеними питомими енерговитратами та вмістом штибу в сортовому складі вугілля. Якщо швидкість подачі, за якої електродвигун приводу різання максимально навантажений, менше критичної швидкості за заштибуванням, як це часто буває під час роботи видобувних комбайнів на середніх і високих пластах, заштибування органу не буде спостерігатися;

– на взаємне розташування точок, що відповідають режимам роботи комбайна на межі заштибування та з максимальною продуктивністю, впливають зовнішні впливи, що випадково змінюються у процесі роботи видобувного комбайна (потужність пласта й опірність вугілля

різанню). Тому рівень ефективності керування режимами роботи видобувних комбайнів для тонких пластів сучасними регуляторами на тій чи тій ділянці вибою буде різним. Однак результати моделювання та досвід роботи цих гірничих машин показали, що досить рідко (у разі слабкої міцності вугілля та підвищеної потужності пласта) обмеженням швидкості подачі є обмеження за перевантажувальною здатністю привода. Основним обмеженням швидкості подачі видобувних комбайнів на тонких пластах можна з упевненістю назвати обмеження щодо запобігання заштибуванню виконавчого органу. Тому досить актуальним завданням натеper є розроблення системи керування видобувними комбайнами для тонких пластів, яка здійснює пошук критичної швидкості подачі за заштибуванням виконавчого органу та забезпечує подальшу роботу комбайна на межі заштибування в умовах постійної зміни опірності вугілля різанню та потужності пласта вздовж лави.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Руйнування вугілля виїмковими машинами / Є. Позін та ін. 1984. 288 с.
2. Бойко М. Навантаження вугілля очисними комбайнами. *РВА Донецького національного технічного університету*. 2002. 157 с.
3. Фальштинський В. Удосконалення технології свердловинної підземної газифікації : монографія. Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2009. 131 с.
4. Очисні комбайни УКД200 та УКД300 для ефективного відпрацювання тонких пластів / М. Стаднік та ін. *Вугілля України*. 2003. № 9. С. 19–22.
5. Мала гірнича енциклопедія. Донецьк : Донбас, 2004. 640 с.
6. Бубликов А., Ткачов В. Використання імітаційного моделювання для дослідження системи автоматичного керування видобувним комбайном : монографія. Дніпро : Національний гірничий університет, 2015. 182 с.
7. Модифікований алгоритм автоматичного керування видобувним комбайном за навантаженням двигуна приводу різання / А. Бубликов та ін. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. 2022. № 69. С. 179–192.

#### REFERENCES:

1. Pozin, Ye., Melamed, V. & Ton, V. (1984). *Ruinuvannya vuhillia vyimkovyumu mashynamy* [Destruction of coal by mining machines]. 288 s.
2. Boiko, M. (2002). *Navantazhennia vuhillia ochysnymu kombainamy* [Coal loading by cleaning combines]. *RVA DonNTU*. 157 s.
3. Falshtynskiy, V. (2009). *Udoskonalennia tekhnolohii sverdlovyynnoi pidzemnoi hazyfikatsii* [Improvement of well underground gasification technology]. *RVA NHU*. 131 s.
4. Stadnik, M., Boiko, H., Riabchenko, O. (2003). *Ochysni kombainy UKD200 ta UKD300 dlia efektyvnoho vidpratsiuvannia tonkykh plastiv* [Cleaning combines UKD200 and UKD300 for effective processing of thin layers]. *Vuhillia Ukrainy*. 9: 19–22.
5. *Mala hirnycha entsyklopediia* [Small mining encyclopedia] (2004). Donbas. 640 s.
6. Bublikov, A. & Tkachov, V. (2015). *Vykorystannia imitatsiinoho modeliuvannia dlia doslidzhennia systemy avtomatychnoho keruvannia vydobuvnym kombainom* [The use of simulation modeling for the study of the automatic control system of the mining combine]. *NTU DP*. 182 s.
7. Bublikov, A., Shevchenko, V., Nadtochyi, V., Yatsiuk, D. & Priadko, N. (2022). *Modyfikovanyi alhorytm avtomatychnoho keruvannia vydobuvnym kombainom za navantazhenniam dvyhuna pryvodu rizannia* [Modified algorithm of automatic control of the mining harvester according to the load of the engine of the cutting drive]. *Zbirnyk naukovykh prats NHU*. 69: 179–192.