

– ПІ-регулятор швидкості

$$W_{p,ш} = K_{pш} \frac{4T_{мш}^{p+1}}{T_{мш}^p};$$

– регулятор потоку  $\psi_2$

$$W_{p\psi} = \frac{T_2^{p+1}}{a_c a_\psi T_\mu (1/K_c) L_m K_{np}},$$

де  $K_{np} = U_{кн}/U_d$  – коефіцієнт передачі перетворювача;  $U_{кн}, U_d$  – номінальна напруга керування й у ланці постійного струму;  $T_{мш} = a_{ш} a_c a_m T_\mu$ . Для розглянутої схеми некомпенсована мала стала часу внутрішнього контуру струму приймається  $T_\mu = 0,001 \dots 0,002$ с.

#### **Висновки.**

Комп'ютерне моделювання динаміки асинхронного електроприводу на підставі структурної схеми рис.3 показало:

1. Задовільна компенсація перехресних зворотних зв'язків вимагає високої швидкодії як вимірюваних цих сигналів, так і внутрішніх контурів регулювання.
2. Найбільший вплив на характер перехідних процесів роблять перехресні зворотні зв'язки.
3. При високій швидкодії внутрішніх контурів ( $T_\mu = 0,001 - 0,002$  с) і достатній резерв напруги в колі постійного струму вплив перехресних зв'язків на динамічні процеси стає незначним.

#### **Список використаних джерел**

1. Колб Ант. А. Теорія електроприводу [Текст]: навч. посібник / Ант. А. Колб, А.А. Колб. – 2-ге вид., перероб. і доп. – Д., Національний гірничий університет, 2011. – 565 с.
2. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока: Пер.с нем.-М.-Л.:Госэнергоиздат, 1963. – 744с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Шкрабцем Ф.П.*

УДК 621-926

**В.А. Бородай, канд. техн. наук, Р.О. Боровик, Д.О. Шепетько**

*(Україна, Дніпро, Національний технічний університет „Дніпровська політехніка”)*

### **РАЦІОНАЛЬНА СХЕМА ЗБУДЖЕННЯ З НЕПРЯМИМ РОЗЦЕПЛЕННЯМ І КОНДЕНСАТОРАМИ ПОТУЖНИХ СИНХРОННИХ ПРИВОДІВ З ГАРАНТОВАНИМ ЗАПУСКОМ**

**Анотація.** Запропоновано результати пошуку раціонального схемного рішення системи збудження із непрямим розщепленням і однаковими ємностями при регулюванні числа вільних від конденсаторів полюсів, що забезпечить гарантований запуск і синхронізацію потужних синхронних приводів механізмів з важким пуском за умови одночасного зниження масо-габаритних показників зосереджено-розподілених реактивних компонентів.

**Ключові слова:** механізми з важким пуском, потужний синхронний привід, система збудження із непрямим розщепленням і однотипними конденсаторами, резонансні режими роботи збудження, раціональна схема системи збудження.

**Аннотация.** Предложены результаты поиска рационального схемного решения системы возбуждения с косвенным расщеплением и одинаковыми емкостями при регулировании числа свободных от конденсаторов полюсов, что обеспечит гарантированный запуск и синхронизацию мощных синхронных приводов механизмов с тяжелым пуском при условии одновременного уменьшения массо-габаритных показателей сосредоточенно-распределенных реактивных компонентов.

**Ключевые слова:** механизмы с тяжелым пуском, мощный синхронный привод, система возбуждения с косвенным расщеплением и однотипными конденсаторами, резонансные режимы работы возбуждения, рациональная схема системы возбуждения.

**Abstract.** The results of studies on the search for a rational circuit design of the excitation system with indirect splitting and equal capacitance when regulating the number of capacitor-free poles are shown to ensure guaranteed start and synchronization of powerful synchronous drives of heavy start mechanisms under the conditions of simultaneous reduction of mass-distributed reactive components.

**Keywords:** heavy start mechanisms, powerful synchronous drive, excitation system with indirect splitting and capacitors of the same type, resonant operation modes of excitation, rational scheme of the excitation system.

Відомо, що гірничо-металургійна промисловість характеризується наявністю механізмів із важкими умовами запуску. До таких слід віднести [1]:

- потужні шоківі дробарки із моментом зрушення 2...2,5 від номінального, для яких гарантований запуск можливий за значного коефіцієнта запасу встановленої потужності привідного двигуна при одночасному погіршенні енергетичних характеристик сталого режиму. Енергоефективність сталого режиму роботи головного приводу досягається за рахунок залучення додаткового розгінного двигуна, який працює лише під час запуску;

- конусні дробарки, де при їх вмиканні запуск супроводжується заклинюванням валків кусками руди. Зазвичай проблема вирішується шляхом підвищення на 30...50 % встановленої потужності приводу;

- барабанні млини, для яких вдалий запуск за зниженої напруги живлення через високі пускові струми можливий при кратності пускового моменту двигуна на рівні не менше ніж 1,4...1,5 для стрижневих і 1,2...1,3 для кульових млинів. Гарантований запуск млинів забезпечується вибором привідного двигуна із запасом потужності в 15...25 %;

- довгі стрічкові конвеєри, де необхідна кратність пускового моменту повинна бути не нижче 1,4...1,5 номінального, а при тривалих зупинках обладнання необхідна кратність пускових моментів суттєво збільшується.

Таким чином, для більшості розглянутих механізмів привідний синхронний двигун має забезпечити пусковий асинхронний момент на рівні не менше 1,5 від номінального (рис. 1).

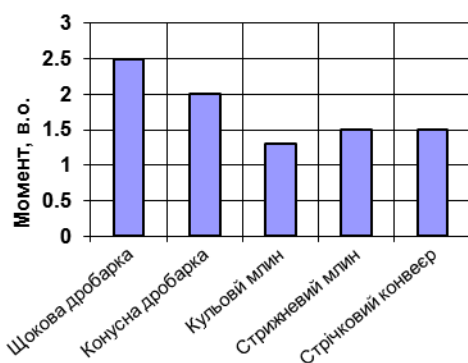


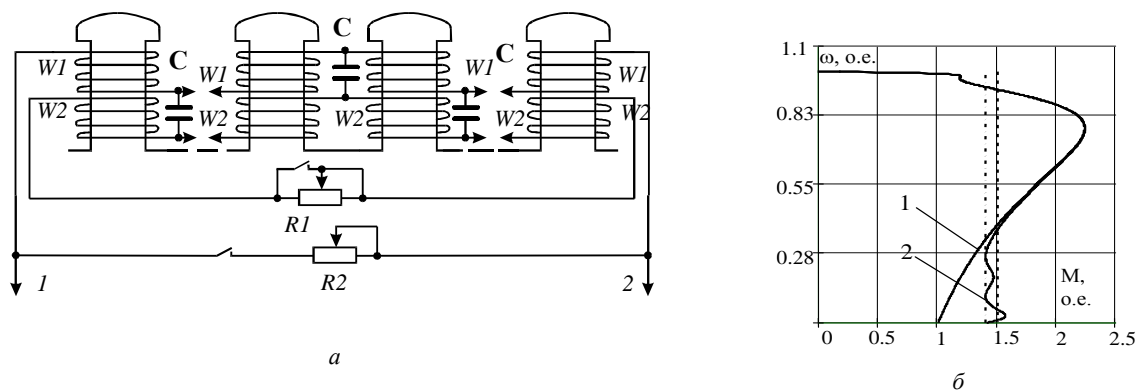
Рис. 1. Діаграма бажаних пускових моментів енергоємного обладнання

Розглянемо покращення пускових властивостей приводу на прикладі потужного синхронного двигуна барабанного млина самоподрібнення типу ММС-90х30, в якому із-за тривалого простою з причини планової або позапланової зупинки виникає ущільнення внутрішньо-барабанного завантаження. Наслідок – підвищення моменту інерції механізму, що сприяє понад обмеженому зростанню часу запуску двигуна, а демпферна обмотка при цьому може розігріватися до неприпустимої температури. Крім того, класична конструкція двигунів СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4, за таких умов, не завжди гарантує синхронізацію приводу, що вимагає повторного запуску машини. Зазвичай завод-виробник таких двигунів лімітує не більше двох запусків поспіль, після чого потрібне охолодження машини впродовж шести годин. Очевидно, що така тривалість простою при продуктивності млина в 600 тон на годину супроводжується значними втратами. Виходячи із наданого обґрунтування актуальність роботи, щодо покращення пускових властивостей синхронного приводу не викликає сумніву.

Світова тенденція до ресурсозбереження спонукає промисловість комплектувати енергонапружене обладнання синхронними приводами, які традиційно запускають методом прямого асинхронного пуску. Разом з простотою і надійністю такого методу для нього є характерним значний пусковий струм, який може сягати дев'яти номінальних, та обмежена приєднувальна маса, що спричиняє перегрів демпферної обмотки двигуна.

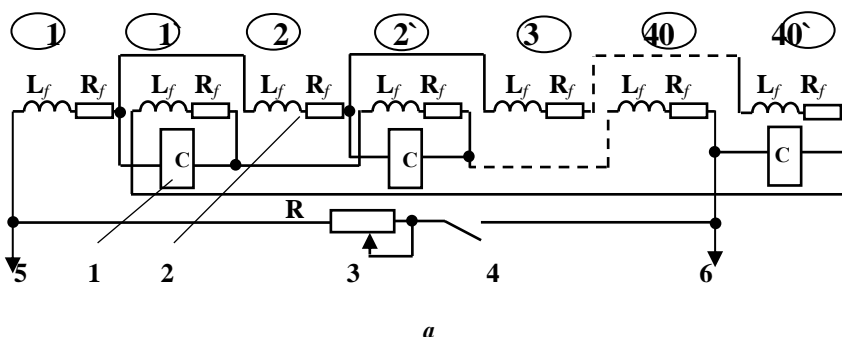
Усунення таких недоліків досягається за рахунок застосування реакторного або автотрансформаторного пуску, що поряд із зниженням пускового струму зменшує і пусковий момент. Розгін у межах переважувальної здатності двигуна забезпечує частотний пуск, однак це вимагає застосування розгінного перетворювача на повну потужність двигуна.

Одним із методів покращення пускових властивостей синхронного приводу є використання додаткового пускового моменту, який генерується обмоткою збудження, що працюють у резонансних режимах. Існуючі нині наукові роботи стосуються обмоток збудження з безпосереднім розщепленням кожної полюсної котушки [2] і неоднаковими конденсаторними групами (рис. 2), що дозволяють створити необхідний вигляд пускової характеристики. За усіх переваг такої конструкції її головний



**Рис. 2. Система збудження з безпосереднім розщепленням і різними конденсаторними групами:**  
**a** -  $W1, W2$  – верхні і нижні напівкатушки;  $R1, R2$  – розрядний опір;  $C$  – конденсатори;  
**1,2** – клеми присідання живлення;  
**б** - пускова характеристика з класичним (1) та розщепленим (2) збудженням

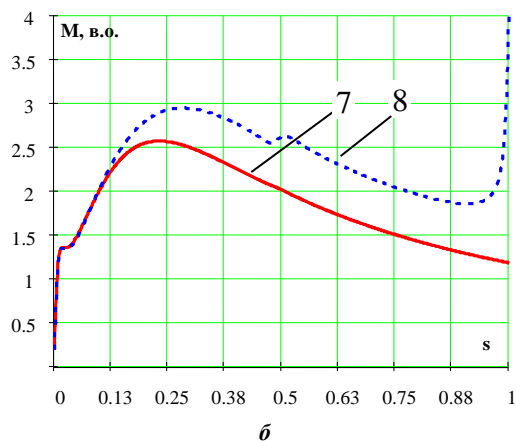
недолік – розділ полюсної котушки навпіл, що не задовольняє технологію їх виготовлення. Більш технологічною у цьому плані є конструкція обмотки збудження з непрямим методом розщеплення [3] та одним типом зосереджених конденсаторів рис. 3. Остання схема індуктора має більш гладкі пускові характеристик при вдвічі зменшеній кількості конденсаторів у порівнянні з попередньою [2] конструкцією, а величина їх ємності знижується за рахунок зростання індуктивності полюсних котушок.



**Рис. 3. Схема резонансного збудження (a) і пускові характеристики (б) синхронного двигуна:**

- 1 – полюсні конденсатори;
- 2 – полюсні котушки;
- 3 – розрядний опір;
- 4 – ключ перемикачання опору;
- 5, 6 – клеми подачі живлення
- 7 – класичне збудження;
- 8 – розщеплене з конденсаторами

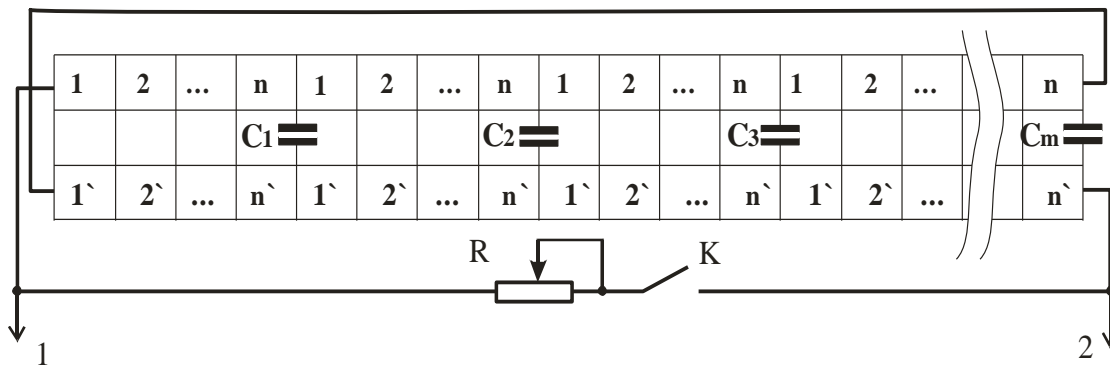
○ – нумерація умовно верхнього і нижнього ряду котушок



На жаль, конструкція викладена в роботі [3], також має досить велику кількість полюсних конденсаторів, що зрештою стримує застосування такого електроприводу у промисловості.

Метою даної роботи є подальше вдосконалення схеми збудження з непрямим методом розщеплення за рахунок монтажу конденсаторів не на кожній парі полюсів і пошук їх раціональної кількості за умови отримання не гірших пускових характеристик. Крім того, є очевидним, що зниження кількості полюсних конденсаторів зменшить їх масо-габаритні показники і відповідно покращить інертні властивості системи.

Для здійснення досліджень пропонується універсальна схема, яка відображає спосіб регулювання числа вільних від конденсаторів полюсів (рис. 4), на якій параметр  $n$  та  $n'$  показують граничну кількість



**Рис. 4.** Вигляд схеми, що ілюструє метод дослідження системи збудження

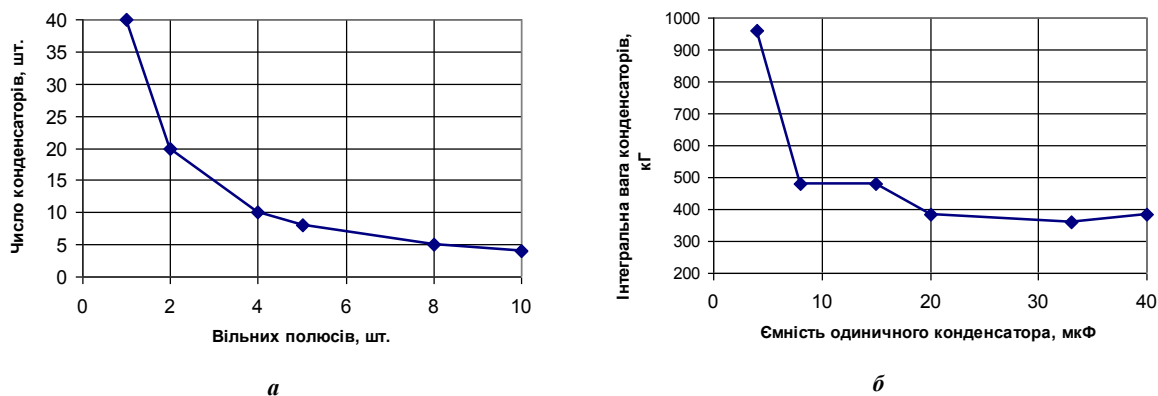
послідовно увімкнених умовно верхніх та нижніх полюсів, що розташовані між поперечно приєднаних конденсаторів відповідно до схеми рис. 3, а. Параметр  $m$  відповідає максимальному номеру конденсатора, який приєднують до останньої пари полюсів у загальному ряді умовно верхніх та нижніх полюсів. Алгоритм для розрахунку та метод побудови пускових характеристик описані в роботі [3]. Програмою експериментів передбачено зміну кількості вільних полюсів за планом таблиці. Резонансна ємність підбирається за умови забезпечення асинхронного пускового моменту на рівні значення 1,5 від номінального, що відповідно має задовольняти вимогам більшості гірничо-металургійних механізмів із важкими умовами запуску.

В процесі дослідження був задіяний млиновий синхронний двигун СДМЗ-2-24-59-80-УХЛ4.

**Програма досліджень**

Номер експерименту	1	2	3	4	5	6
$n1$ – кількість полюсів умовно верхнього ряду котушок	1	2	4	5	8	10
$n1'$ – кількість полюсів умовно нижнього ряду котушок	1	2	4	5	8	10
$m$ – кількість конденсаторів	40	20	10	8	5	4

Результати впливу регулювання числа вільних полюсів обмотки збудження із непрямим розщепленням і однаковими конденсаторами на пускові властивості синхронного привода і параметри конденсаторів, за умови фіксації пускового моменту на рівні 1,5 в.о. та дотримання показників таблиці, наведені на рис. 5.



**Рис. 5.** Залежності впливу числа вільних полюсів на параметри конденсаторів

Користуючись довідковими матеріалами джерела [4] отримана оцінка інтегральної ваги конденсаторів для різних схемних варіацій системи розщепленого збудження (рис. 5, б). В результаті стало очевид-

ним, що раціональний варіант схеми збудження може бути забезпечений за наявності восьми вільних полюсів та п'яти полюсних конденсаторів з індивідуальною ємністю в 33 мкФ, де їх загальна вага становить приблизно 360 кілограмів. При вазі індуктора в 65 тон вага навісних зосереджено-розподілених реактивних елементів практично не впливає на інертні властивості синхронного двигуна, а суттєве зменшення їх числа безумовно спростить конструкцію системи розщепленого збудження, що, як наслідок, надасть нових якісних переваг синхронним двигунам.

Отже, отримані результати досліджень дозволяють зробити такі висновки:

- гірничо-металургійна промисловість має значний клас механізмів із важкими умовами пуску, для яких є характерним забезпечення пускового моменту не менше 1,5 від номінального;
- ущільнення внутрішньо-барабанного завантаження підвищує інертність механізму, що затягує запуск і не гарантує синхронізацію;
- невдалий запуск класичних синхронних приводів призводить до тривалих простоїв, які ведуть до значних економічних втрат;
- розщеплені обмотки збудження створюють бажані форми пускових характеристик, але складність конструкції обмежує їх впровадження;
- встановлено, що за будь-якої композиції схеми розщепленої обмотки збудження сумарна ємність для неї залишається на рівні близько 160 мкФ;
- монотонний характер зміни параметрів модернізованого збудження (рис. 5, а) дає можливість стверджувати, що його раціональна схема може бути реалізована за наявності восьми вільних полюсів та п'яти полюсних конденсаторів, що зрештою спрощує конструкцію і не суттєво впливає на інертні властивості приводу за умови одночасного збереження не гірших пускових показників двигуна у порівнянні з варіантом, який наведений у роботі [3].

### Список літератури

1. Грейсх М.В. Выбор способа пуска синхронных двигателей с короткозамкнутым ротором и синхронных двигателей / М.В. Грейсх // Электричество. – 1959. – №9 – С. 19–23.
2. Патент України UA 31044 А, 6 В 02К 19/36 Синхронний двигун. / В.І.Кириченко, В.С. Гомілко, В.А. Бородай; Заяв. 03.07.1998; Опубл. 15.12.2000. Бюл. №7-П. – 3 с.: ил.
3. Borodai V. Efficient Transient Modes of Synchronous Drive for Mining and Smelting Mechanisms [Текст] / V. Borodai, R. Borovyk, O. Nesterova. //Mechanics, Materials Science & Engineering. – 2017. –Vol.8. – No.8. – P. 133-142.
4. <http://www.elektrosnab.su/catalog/43/202/>.

*Рекомендовано до друку: к-том техн. наук, проф. Казачковським М.М.*

УДК 681.518.54

*Л.І. Мецераков, д-р техн. наук, О.М. Галушко, О.І. Сироткіна, канд. техн. наук, С.Д. Приходченко  
(Україна, Дніпро, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»)*

### АНАЛІТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ГІРНИЧИХ КОМПЛЕКСІВ НА ОСНОВІ МОМЕНТНИХ ФУНКЦІЙ

*Анотація.* Показана аналітична сутність розроблених числових оцінок тісноти статистичних моментних зв'язків випадкових значень енергоінформаційних сигналів систем виміру за структурами “вхід-вихід”, які являються у визначеній формі знаннями, що можуть бути використані в якості інформаційних сутностей при формуванні предметних галузей систем інтелектуальної підтримки прийняття рішень для задач інформаційного забезпечення автоматизованих систем керування гірничими комплексами в умовах невизначеності стану останніх.

*Ключові слова:* моментні функції, умовне математичне очікування, асиметрія, ексцес.

*Аннотация.* Показано аналитическое содержание разработанных числовых оценок тесноты статистических моментных связей случайных значений энергоинформационных сигналов систем измерения по структуре «вход-выход», которые являются в определенной форме знаниями, и могут быть использованы в качестве информационных сущностей при формировании предметных областей систем интеллектуальной поддержки принятия решений для задач информационного обеспечения автоматизированных систем управления горными комплексами в условиях неопределенности состояния последних.

*Ключевые слова:* моментные функции, условное математическое ожидание, асимметрия, эксцесс.