

**В.І. Кириченко**, *д-р техн. наук.*, **В.А. Бородай**, *канд. техн. наук.*, **С.О. Дідевич**, **Є.В. Котлярова**  
(Україна, Дніпропетровськ, Державний вищий навчальний заклад "Національний гірничий університет")

### **ЗАСТОСУВАННЯ КОНТУРУ ЗБУДЖЕННЯ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ПУСКОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТУЖНИХ СИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ**

Прямий асинхронний пуск на повну напругу джерела живлення - досить поширений спосіб запуску серійних синхронних електроприводів. Для даного способу характерним є те, що пусковий момент створюється переважно за рахунок демпферної обмотки, рівень величини якого визначається видом поперечного перерізу і питомим опором її стрижнів. Таким чином, варіювання параметрами геометрії та типом матеріалу стрижнів дозволяє змінювати загальний активний опір демпферної обмотки. Він у свою чергу забезпечує значний пусковий та зменшений вхідний моменти за підвищеним значенням активного опору, і навпаки, при протилежних налагодженнях схеми. Можливе і раціональне схемне вирішення, яке задовольняє вимогам конкретного механізму із достатньо високою величиною як пускового, так і вхідного моментів. Однак головним недоліком методу є значний пусковий струм, що обмежує число послідовних стартів і знижує надійність обмоток двигуна.

Виходячи з даних щодо традиційного методу запуску синхронного двигуна можливо стверджувати, що загальний пусковий момент створюється роторними обмотками, де головна складова відноситься до демпферної обмотки. При цьому частка моменту від роботи обмотки збудження, що увімкнена за класичною схемою, є незначною. Але також відомо, що за рахунок контуру збудження можливо суттєво покращати пускові властивості синхронного приводу і при цьому здійснювати перерозподіл навантаження між роторними обмотками. Як наслідок, крім покращення пускових властивостей, запропоновані методи дозволяють ще підвищити і надійність електромеханічної системи у цілому.

Корекція пускових моментних характеристик може здійснюватися шляхом сучасних методів введення в схему збудження активних, реактивних або комбінованих елементів, що працюють у безперервному або пульсуючому режимах. Ефективність використання активних опорів зі ступеневим, плавним та пульсуючим приєднанням до обмотки збудження розглянута у роботах [1, 2]. Головними недоліками цих конструкцій є використання симетричних вентилів, які знижують надійність системи збудження. Крім того існує обмеження на рівень максимального пускового моменту, який лімітується перенапруженнями на контактних кільцях збудження.

Індукційні пристрої, які використовуються у схемах збудження, досить добре відповідають умовам важких пусків і режимам роботи механізмів з ударним навантаженням [3]. Але громіздкість та не технологічність таких систем стали обмежуючим фактором на шляху широкого їх застосування.

Методи, в яких пропонується у контур збудження вмикати ЕРС для компенсації реактивних опорів роторних обмоток [4], мають обмеження через неможливість їх технічної реалізації внаслідок відсутності перетворювачів достатньої потужності [5].

Збільшити електромагнітний момент у діапазоні підсинхронних ковзань пропонується шляхом динамічного приєднання конденсатора до вхідних клем обмотки збудження [6]. Але незначна частота струмів у цей термін пуску вимагає приєднання до обмотки збудження конденсаторів з ємністю, яка може сягати однієї Фаради і більше.

Використання конденсаторів, які глухо приєднані до збудника, підвищує надійність електропривода за рахунок відсутності силової пускорегулюючої апаратури у розрядному ланцюзі обмотки збудження [7]. Однак використання зазначеного пристрою обмежене через різке зростання ємнісного опору при козваннях менших 0,4 одиниці. Крім того, на підсинхронних швидкостях обертання ротора та за визначених значеннях ємності конденсатора виникають значні гальмівні моменти, які можуть спричинити „застравання” ротора при асинхронному запуску.

У методах покращення пускових властивостей синхронних електроприводів із зменшенням рівня перенапруги використовують розщеплення обмоток із зосереджено-розподіленим приєднанням конденсаторів [8]. Такі способи компенсації реактивного опору роторних обмоток дозволяють формувати пускові механічні характеристики залежно від вимог робочої машини, але порушують традиційний технологічний процес виготовлення полюсних котушок промисловістю.

Аналіз існуючих методів виявив, що синхронні електроприводи з покращеними пусковими властивостями мають ряд переваг та недоліків. Із перелічених можливо виділити останній метод, як такий, що найбільш придатний для реконструкції потужних двигунів з явно вираженими полюсами ротора. Однак наявність недоліку, що пов'язаний з незручностями виготовлення полюсних котушок обмотки збудження, не сприяє їх втіленню у практичну конструкцію. Тому створення розщеплених обмоток з конденсаторами може вважатись актуальною науковою задачею як теоретичного, так і практичного плану. Відомо, що синхронні двигуни зі складу потужних технологічних установок можуть мати від 20 пар полюсів. Як наслідок, безпосереднє розщеплення кожної полюсної котушки можливо замінити на непрямий спосіб створення розщеплення. Як таким схемним рішенням пропонується система збудження, що зображена на рис.1. У цьому випадку схема збудження двигуна рис.1, а) складається із повних полюсних котушок 2, що з'єднані послідовно узгоджено між собою з утворенням незалежних груп котушок, увімкнених через полюс, де між сусідніми полюсами вмикають RC ланцюги 1, які уявляють собою послідовно з'єднані конденсатор С і резистор  $R_{\Pi}$  (рис.1, б). На зовнішні виводи 5, 6, що з'єднані з початком першої та останньої полюсних котушок, приєднано розрядний змінний опір R 3, який вимикається перемикачем 4.

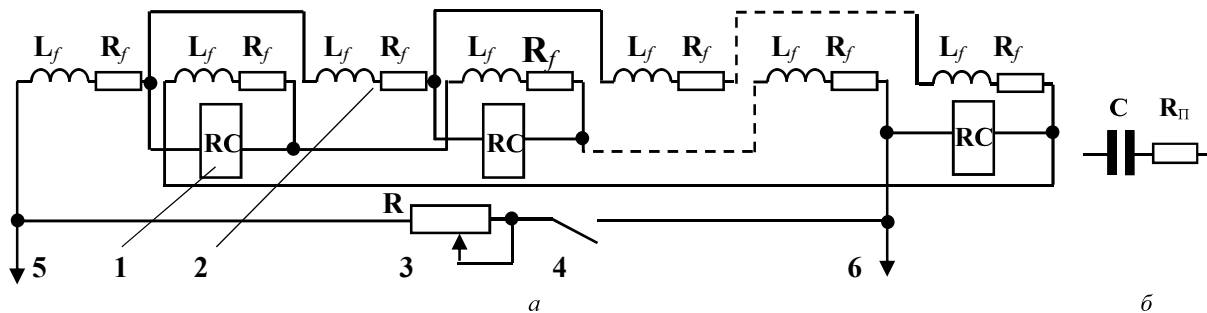


Рис.1. Обмотка збудження з непрямим методом розщеплення

За принципом роботи нова конструкція не відрізняється від попередніх [8]. Однак у цьому випадку спрощуються монтаж полюсів та процес визначення параметрів схеми заміщення роторних обмоток двигуна. Пояснюється це наявністю на полюсі котушки, яка не змінена в порівнянні з класичною, а магнітні умови в обох випадках є однаковими. Завдяки цьому параметри реактивного та активного опору окремої полюсної котушки можуть бути визначені виходячи із паспортних даних, що надаються заводом-виробником.

$$X_{fi} = \frac{X_{ad} + X_{fs}}{2p}, \quad R_{fi} = \frac{R_{fs}}{2p},$$

де  $X_{ad}$  – реактивний опір реакції якоря;  $X_{fs}$  – реактивний опір розсіювання класичної обмотки збудження;  $R_{fs}$  – активний опір збудження;  $2p$  – число пар полюсів.

Обставини, що відображені раніше не вимагають розв'язання магнітних зв'язків полюсних котушок. Вплив магнітного зчеплення демпферної та індукторної обмоток з кожною котушкою обмотки збудження вкладений у незалежні ЕРС та за використанням теореми компенсації винесені до першого чотириполюсника. Тому розрахункова схема збудження має вигляд (рис. 2).

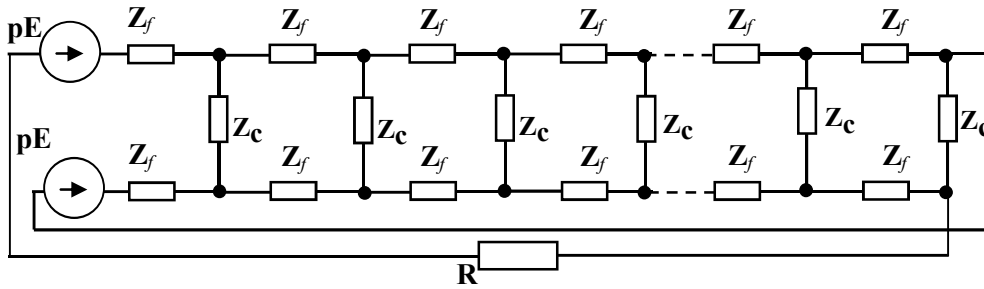


Рис. 2. Розрахункова схема обмотки збудження

Комплексні опори, що входять до її складу розраховуються так:

$$Z_{fi} = X_{fi} + R_{fi} \text{ – повний опір полюсної котушки;}$$

$$Z_{ci} = r \frac{m_{zf}}{Z_{\delta}} - j \frac{m_{zf}}{\omega_{\delta} \cdot Z_{\delta} \cdot s^2 \cdot C} \text{ – повний опір поперечного ланцюга,}$$

де  $r$  – додатковий активний опір;  $m_{zf}$  – коефіцієнт зведення опору збудження;  $\omega_{\delta}; Z_{\delta}$  – базові циклічна частота та опір;  $s; C$  – ковзання та ємність. Наявність у схемі рис. 2 реактивних опорів різного типу робить її залежною від рівня величини ковзання. Як наслідок, поточне повне значення опору збудження в процесі пуску може бути розраховане за допомогою балансу потужностей.

Як і для попередніх варіантів розщеплених обмоток, схему на рис. 2 безпосередньо не можливо аналізувати. Для її спрощення використовується запропонована раніше методика переходу від ланцюгових схем пасивних чотириполосників до адекватних довгих ліній з подальшою їх заміною однією лінією з такими самими параметрами та довжиною, що дорівнює сумі довжин складових рис. 3 .

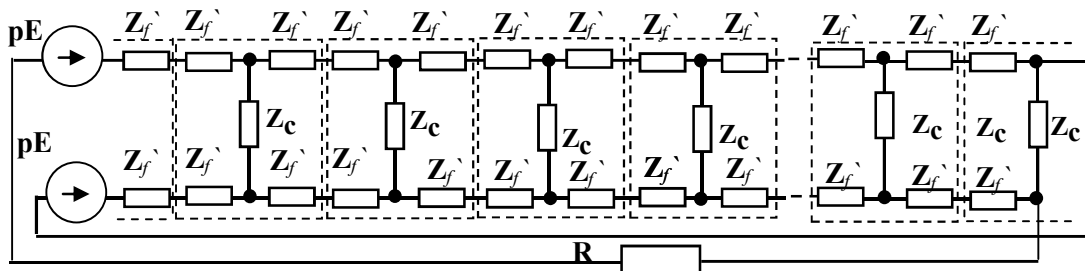


Рис. 3. Перетворена схема обмотки збудження для згортання проміжних чотириполосників

У запропонованій проміжній схемі повздовжні контурні опори дорівнюють половині повного опору полюсної котушки, тобто  $Z'_{fi} = \frac{Z_{fi}}{2}$ . При переході від вхідних чотириполосників до чотириполосників Т-типу визначають допоміжний коефіцієнт  $\beta_k = \frac{Z'_{fi}}{2Z_{fi}} = 0,5$ . Пряме перетворення вхідного чотириполосника Т-типу у довгу лінію передбачає розрахунок коефіцієнтів А-типу

$$A_1 = 1 + \frac{2Z'_{fi}}{Z_c}; B_1 = 2Z'_{fi} \left( 2 + \frac{2Z'_{fi}}{Z_c} \right); C_1 = \frac{1}{Z_c}; D_1 = A_1$$

та параметрів довгої лінії, яка є адекватною  $Z_L = \sqrt{\frac{B_1}{C_1}}$  – хвильовий опір;  $\gamma_1 = \text{acosh}(A_1)$  – параметр лінії.

При зворотному перетворенні опори адекватного чотириполосника для ланцюга згорнутої ланки також визначаються через коефіцієнти

$$A = \cosh((p-1) \cdot \gamma l); B = Z_n \sinh((p-1) \cdot \gamma l); C = \frac{\sinh((p-1) \cdot \gamma l)}{Z_n}; D = A.$$

Тоді результуючі опори чотириполюсника

$$Z_{fv}' = \frac{A-1}{C}(1-\beta_k); Z_{fn}' = \frac{A-1}{C}\beta_k; Z_{fk}' = \frac{1}{C}.$$

Кінцева спрощена розщеплена схема з урахуванням згорнутих ланцюгів перетворюється до вигляду рис. 4.

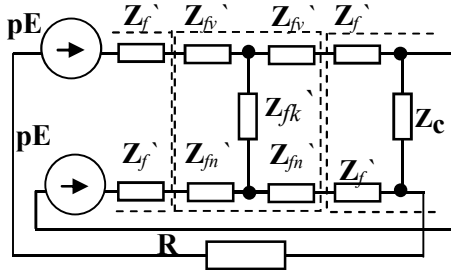


Рис. 4. Спрощена схема обмотки збудження.

При її розрахунку, дотримуючись балансу потужностей, визначають емпіричні коефіцієнти

$$\beta_1 = 2 \frac{ZZ - ZZ1 \cdot (Z_{fv}' + Z_{fk}' + Z_{fn}' + 2Z_f' + Z_c)}{ZZ3 - ZZ2 \cdot (Z_{fv}' + Z_{fk}' + Z_{fn}' + 2Z_f' + Z_c)}, \quad \delta_1 = 2 - \beta_1; \quad \beta_2 = \frac{2 \cdot (Z_{fn}' + Z_f' + Z_c) - \beta_1(Z_c - Z_{fk}')}{Z_{fv}' + Z_{fk}' + Z_{fn}' + 2Z_f' + Z_c},$$

$\delta_2 = 2 - \beta_2$ , де

$$ZZ = (Z_{fn}' + Z_f' + Z_c) \cdot (Z_c - Z_{fk}'); ZZ1 = (Z_{fn}' + Z_f' + Z_c + R);$$

$$ZZ2 = Z_{fv}' + Z_{fk}' + Z_{fn}' + 2Z_f' + Z_c + R; ZZ3 = (Z_c - Z_{fk}')^2.$$

За їх допомогою еквівалентний опір обмотки збудження визначається

$$Z_{fe} = \beta_1^2 (Z_f' + Z_{fv}') + \delta_1^2 (Z_f' + R + Z_{fn}') + (\beta_1 - \beta_2)^2 \cdot Z_{fk}' \rightarrow$$

$$\rightarrow \beta_2^2 (Z_f' + Z_{fv}') + \delta_2^2 (Z_f' + Z_{fn}') + (\beta_2 - \delta_1)^2 \cdot Z_c,$$

а його параметри у схемі заміщення двигуна відповідно:  $R_{fs} = \frac{Re(Z_{fe})}{s}$  – активна складова опору;

$X_{fs} = j(Im(Z_{fe}) - X_{ad})$  – реактивна складова опору.

Проведені дослідження на математичній моделі двигуна виявили її працездатність навіть при приєднанні до кожної пари полюсів конденсаторів однакової ємності (рис. 5). Так, із отриманих результатів досліджень для двигуна СДС3-20-29-54-80-УХЛ4 з неявно розщепленою обмоткою збудження встановлено, що при величині ємності конденсаторів 4 мкФ та відсутності активного опору пусковий момент може досягати 1,5 номінального. При цьому його пусковий струм не перевищує струм двигуна, увімкненого

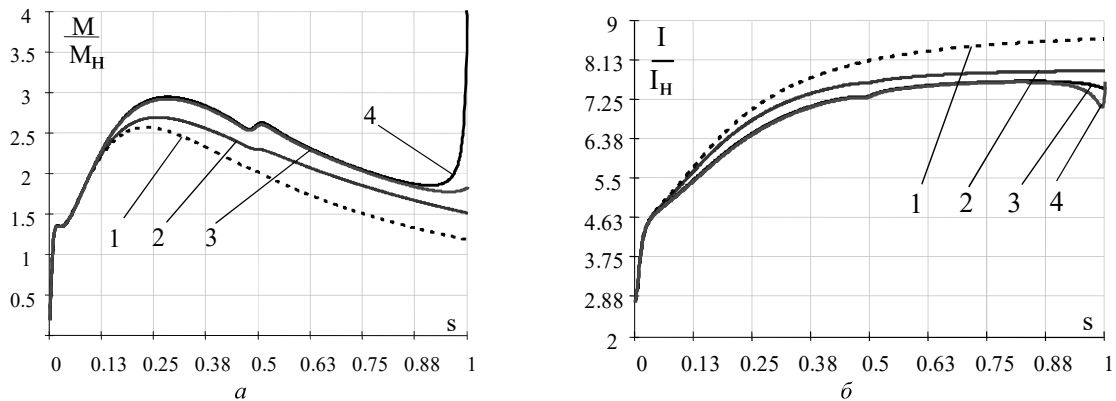


Рис. 5. Механічна пускова (а) та електромеханічна (б) характеристики двигуна СДС3-20-29-54-80-УХЛ4: 1 – природна; 2, 3, 4 – штучні при  $C = 4, 12, 7$  та  $14$  мкФ відповідно

за традиційною схемою. Результуючі графічні залежності ілюструють наявність підвищення моменту протягом усієї шкали ковзань. Це пояснюється впливом сусідніх контурів, яких у порівнянні з попередньою конструкцією стало менше у 2 рази. Крім цього, кожен окремий контур збільшив індуктивний опір також у два рази, що сприяло зменшенню величини ємності полюсних конденсаторів. Подальше підвищення ємності конденсаторів створює на пусковій характеристиці максимум моменту, хоча і на досить вузькому інтервалі. Регулювати добротність такого контуру і тим самим розширити інтервал дії максимуму можливо за допомогою, опорів послідовно з'єднаних з конденсатором. Запропонована схема при ще більшому зростанні ємності полюсних конденсаторів створює декілька максимумів на механічній характеристиці. Їх наявність також пояснюється впливом сусідніх контурів один на одного. Виходячи з цього слідує, що для робочих машин, де необхідний пусковий момент не перевищує 1,5 номінального (наприклад, потужні барабанні млини), ємність конденсаторів має становити такий рівень, який забезпечує відсутність або лише один максимум зростання моменту.

Прибуток від використання запропонованої схеми може бути отриманий завдяки зниженню капітальних та експлуатаційних витрат за рахунок зменшення запасу встановленої потужності приводних двигунів. До технологічних та економічних переваг розробки можливо віднести зменшення кількості простотів з причин невдалих запусків механізму. Наприклад, для механізмів із значними моментами зрушення або за необхідності підвищити асинхронний момент двигуна у певній зоні ковзань при асинхронному пуску. Крім цього, таке схемне рішення значно спрощує магнітну систему ротора і, як наслідок, дозволяє зменшити витрати на її виготовлення.

#### **Список літератури**

1. Осипова, С.В. Асинхронный пуск синхронного двигателя с максимальным входным и пусковым моментом [Текст.] / С.В. Осипова, А.И. Каяшев // Изв. вузов. Энергетика. – 1974. – №8. – С. 119–121.
2. Абрамович, Б.Н. Возбуждение, регулирование и устойчивость синхронных двигателей [Текст.] / Б.Н. Абрамович, А.А. Круглый. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 128 с.
3. Абрамов, А.Г. Синхронный двигатель с индукционным пусковым устройством на роторе / А.Г. Абрамов // Электричество. – 1976. – №11. – С. 55–57.
4. Карпенко, Б.К. Асинхронные режимы синхронной машины с регулированием возбуждения [Текст.] / Б.К. Карпенко // Изв. вузов. Электромеханика. – 1965. – №12. – С. 1337–1346.
5. Бабурин, В.Б. Увеличение среднего асинхронного момента синхронной машины с помощью регулирования возбуждения [Текст.] / В.Б. Бабурин // Тр. ВНИИЭ. – 1978. – Вып. 56. – С. 64–74.
6. Новиков, А.В. Асинхронные моменты синхронных машин с динамической ёмкостью в цепи возбуждения [Текст.]: автореф. дис. канд. техн. наук.: 05.09.03 / А.В. Новиков. – К., 1953. – 12 с.
7. Велин, Н.В. Статический возбудитель синхронного двигателя с глухо подключенным конденсатором [Текст.] / Н.В. Велин // Электротехника. – 1973. – С. 35–36.
8. Півняк, Г.Г. Електромеханічні системи енергонапружених барабанних млинів [Текст.]: монографія / Г.Г. Півняк, В.І. Кириченко. – Д.: НГА України, 2000. – 166 с.