

УДК 621.315:622.625.28-83  
№ держреєстрації 0109U002805  
Інв.№ \_\_\_\_\_

**Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України**  
**Державний вищий навчальний заклад**  
**«НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»**  
**(Державний ВНЗ «НГУ»)**

49000, м.Дніпропетровськ, пр.К.Маркса,19; тел./факс (0562) 47-32-09, телекс  
143457 «AGAT SU»; E-mail: Shevchsergey@gmail.com

**ЗАТВЕРДЖЕНО:**

Проректор з наукової роботи,  
д-р техн. наук, професор  
\_\_\_\_\_ О.С. Бешта  
30 грудня 2011 р.

**З В І Т**  
**ПРО НАУКОВО – ДОСЛІДНУ РОБОТУ**

**ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ**  
**ТРАНСПОРТУ З ІНДУКТИВНИМ ПІДВОДОМ ЕНЕРГІЇ**  
**(заключний)**  
**ГП-420**

Начальник НДЧ,  
канд. техн. наук, доц.

Р.О. Дичковський

Науковий керівник,  
завідувач кафедри  
систем електропостачання,  
д-р техн. наук, проф.,  
академік НАН України

Г.Г. Півняк

2011

Рукопис закінчено 30.12.2011 р.

Результати цієї роботи розглянути науково-  
технічною радою, протокол № 3 від 12.12.2011 р.

**СПИСОК АВТОРІВ**

Науковий керівник напряму, науковий керівник теми, головний науковий співробітник, д-р техн. наук, проф., академік НАН України	Г.Г.Півняк (1-12 розділи)
Відповідальний виконавець теми, провідний науковий співробітник, канд. техн. наук, професор	А.Я.Рибалко (1-8 розділи)
Старший науковий співробітник, канд. техн. наук, доцент	Ю.М.Зражевський (2,6 розділ)
Науковий співробітник, доцент	В.І.Панченко (1-12 розділи)
Науковий співробітник, ст. викладач	І.Б.Кольцов (1-12 розділи)
Науковий співробітник, доцент	Л.П.Ворохов (1,5 розділ)
Молодший науковий співробітник, аспірант	С.В.Дибрін (2,4, 6,8,10-12 розділ)
Молодший науковий співробітник	Л.В.Беззуб (12 розділ)
Нормоконтролер	Л.С.Шломіна

У підготовці робіт з НДР і оформленні звіту брали участь: провідний фахівець Завгородній В.О., ст.лаборант Дибріна А.В., студенти: Колесников А.А., Письмак Д.К., Сокол Г.В., Скобелев С.В.

## РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 172 с., 37 рис., 2 таблиці, 7 додатків, 33 джерела.

Об'єктом аналізу є системи електропостачання з індуктивною передачею енергії на рухомі електроспоживачі з позицій зменшення втрат електроенергії та провідникових матеріалів при використанні нових технологій.

Мета проекту – розробка технічних рішень до вдосконалення системи електропостачання з індуктивною передачею енергії на рухомі електроспоживачі з позицій зменшення втрат електроенергії та провідникових матеріалів при використанні нових технологій

Отримані при виконанні НДР такі результати:

Надана оцінка енергетичним показникам комплексу електроустаткування в системі електропостачання рухомих споживачів при застосуванні акумулятора кінетичної енергії та ємнісних накопичувачів електричної енергії. Від їх використання маємо скорочення розміру електроспоживання від джерела живлення і відповідний вплив на баланс потужності в системі електропостачання - зменшення втрат потужності до 30 – 40% при застосуванні цього обладнання.

Виконано аналіз різних конструкцій накопичувачів енергії та їх можливість використати на шахтному транспорті, а також спільної роботи накопичувачів з розробленими раніше конструктивними вузлами обладнання системи електропостачання для забезпечення оптимальних параметрів з точки зору енергозбереження їх для будь-яких режимів роботи та умов експлуатації.

**РУДНИКОВИЙ БЕЗКОНТАКТНИЙ ЕЛЕКТРОВОЗ, ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, НАКОПИЧУВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ**

## З М І С Т

Вступ .....	6
1 Аналіз способів заряду кінетичного накопичувача електричної енергії і вибір оптимального з позиції зменшення втрат електроенергії	9
1.1 Алгоритми зарядних процесів у накопичувачах з мінімальним споживанням енергії .....	9
1.2 Порівняння некерованого і керівного зарядних процесів електромеханічного накопичувача енергії .....	14
1.3 Аналіз процесу заряду механічного накопичувача енергії. ....	15
2 Аналіз способів заряду ємнісного накопичувача електричної енергії і вибір оптимального з позиції зменшення втрат електроенергії	17
2.1 Схеми компонування системи електропостачання рухомого електроспоживача ємнісним накопичувачем енергії. ....	17
2.2 Аналіз процесу заряду ємнісного накопичувача енергії з метою мінімізації втрат енергії .....	24
2.3 Порівняння некерованого і керованого зарядних процесів ємнісного накопичувача енергії .....	27
3 Аналіз способів розряду кінетичного накопичувача електричної енергії і вибір оптимального з позиції зменшення втрат електроенергії	29
4 Аналіз способів розряду ємнісного накопичувача електричної енергії і вибір оптимального з позиції зменшення втрат електроенергії .....	34
4.1 Схеми розряду ємнісного накопичувача електричної енергії. ....	34
5 Обґрунтування раціональних схем та способів включення кінетичного накопичувача електричної енергії в схемі електровозу	36
5.1 Кінетичний накопичувач електричної енергії з індуктивною електричною машиною .....	36
5.2 Кінетичний накопичувач енергії з асинхронною електричною машиною .....	41
5.3 Удосконалення конструкції маховика кінетичного накопичувача енергії .....	44
6 Обґрунтування раціональних схем та способів включення та відключення ємнісного накопичувача електричної енергії в схемі електровозу .....	53
7 Створення математичної моделі «тягова мережа і КАЕЕ» в станах «неробочий хід тягової лінії – заряд КАЕЕ», «пікове навантаження – розряд КАЕЕ» .....	64
7.1 Аналіз процесу накопичування енергії електромеханічним накопичувачем з машиною постійного струму .....	64
8 Створення математичної моделі «тягова мережа і ЄАЕЕ» в станах «неробочий хід тягової лінії – заряд ЄАЕЕ», «пікове навантаження – розряд ЄАЕЕ» .....	68
8.1 Енергетика процесу зарядження ємнісного накопичувача енергії ..	68
8.2 Процеси при розряді ємнісного накопичувача електричної енергії .	76



9	Дослідження впливу КАЕЕ на якість електроенергії в системі електропостачання рухомого електроспоживача . . . . .	80
9.1	Аналіз відомих конструкцій . . . . .	80
9.2	Нова конструкція кінетичного акумулятора електричної енергії . . . . .	84
9.3	Співвідношення для розрахунків КАЕЕ з маховиками обідного типу . . . . .	87
10	Дослідження впливу ЄАЕЕ на якість електроенергії в системі електропостачання рухомого електроспоживача . . . . .	91
10.1	Загальні положення . . . . .	91
10.2	Ефективність використання на електровозі ємнісного накопичувача енергії . . . . .	92
10.3	Використання ємнісних накопичувачів енергії для зменшення втрат енергії в кабелях тягової лінії . . . . .	98
11	Аналіз основних залежностей характеристик накопичувачів електричної енергії від часу та режимів роботи електровозу . . . . .	103
11.1	Схемні рішення щодо використання ємнісних накопичувачів енергії в шахтному електровозному транспорті . . . . .	103
11.2	Тривалість зарядження ємнісного накопичувача . . . . .	107
11.3	Зарядний пристрій ємнісного накопичувача, що використовує енергію електродинамічного гальмування поїзда . . . . .	109
11.4	Вибір параметрів накопичувача . . . . .	115
12	Узгодження параметрів та режимів в роботі накопичувачів енергії з елементами системи електропостачання рухомого електроспоживача з індуктивною передачею енергії . . . . .	117
12.1	Використання накопичувачів енергії для забезпечення стабільної роботи системи електропостачання з рухомими електроспоживачами . . . . .	117
12.2	Використання накопичувального блоку для вирівнювання графіку навантаження електровозу . . . . .	124
	Висновок . . . . .	130
	Перелік посилань . . . . .	137
Додаток А	Розрахунок витрат енергії на перевезення вантажів безконтактним електровоз В14 з урахуванням категорійності шахти . . . . .	140
Додаток Б	Звіт про патентне дослідження . . . . .	149
Додаток В	Витяг з протоколу засідання ради НГУ України по науковому напрямку «Проблеми гірничої і металургійної електроенергетики, енергозбереження» . . . . .	165
Додаток Г	Витяг з протоколу кафедри систем електропостачання . . . . .	167
Додаток Д	Внутрішня рецензія . . . . .	169
Додаток Е	Зовнішня рецензія . . . . .	170
Додаток Ж	Акт про впровадження результатів науково-дослідної роботи НГУ . . . . .	171

## ВСТУП

Складні транспортні схеми й нормативні документи по безпечній експлуатації електроустаткування часто не дозволяють повною мірою використати техніку при очисних і підготовчих вибоях вугільних шахт, ефективно використати встаткування підземного транспорту.

Транспорт із безконтактною передачею електроенергії на пересувний об'єкт, призначений для експлуатації на шахтах III категорії й на свіжому струмені понадкатегорійних шахт. Даний вид транспорту в рудничному вибухобезпечному виконанні може застосовуватися у всіх виробках і з додатковим автономним джерелом живлення мають більшу продуктивність і коефіцієнт машинного часу. Їх доцільно експлуатувати у виробках великої довжини й з більшими вантажопотоками.

Виконано аналіз різних конструкцій накопичувачів енергії та їх можливість використати на шахтному транспорті, а також спільної роботи накопичувачів з розробленими раніше конструктивними вузлами обладнання системи електропостачання для забезпечення оптимальних параметрів з точки зору енергозбереження їх для будь-яких режимів роботи та умов експлуатації.

Окремі важливі питання по проектуванні вказаної системи електропостачання були розглянуті авторами у наступних НДР „Розвиток теорії раціонального перетворення електроенергії в системах електропостачання пересувних електроспоживачів з індуктивним підводом електроенергії” (2000-2002 рр.), ”Збільшення ефективності передачі та перетворення параметрів електромагнітної енергії в тяговій мережі підвищеної частоти” (2003-2004 рр.), ”Розробка способів забезпечення безпеки в системі електропостачання з індуктивною передачею енергії” (2005-2006 рр.), ”Енергозберігаюча система електропостачання пересувних споживачів з індуктивною передачею енергії” (2007-2008 рр.). Були визначені напрями подальшого вдосконалення системи електропостачання за

режимами роботи та збільшення безпеки при експлуатації комплексу устаткування, запропоновані нові технічні рішення, на які отримано патенти України, в тому числі, і на енергозберігаючі.

Дана робота - це продовження досліджень, спрямованих на створення нових і вдосконалення існуючих методик і технічних рішень транспорту з безконтактною передачею енергії на рухомий електроприймач. Науково-дослідна робота (НДР) складається з трьох етапів 2009 р. по 2011 р. під загальним напрямом «ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТРАНСПОРТУ З ІНДУКТИВНИМ ПІДВОДОМ ЕНЕРГІЇ».

У виконаній роботі ставилися завдання:

- аналіз способів заряду кінетичного накопичувача електричної енергії і вибір оптимального з позиції зменшення втрат електроенергії;
- аналіз способів заряду ємнісного накопичувача електричної енергії і вибір оптимального з позиції зменшення втрат електроенергії;
- аналіз способів розряду кінетичного накопичувача електричної енергії і вибір оптимального з позиції зменшення втрат електроенергії;
- аналіз способів розряду ємнісного накопичувача електричної енергії і вибір оптимального з позиції зменшення втрат електроенергії;
- обґрунтування раціональних схем та способів включення та відключення кінетичного накопичувача електричної енергії в схемі електровозу;
- обґрунтування раціональних схем та способів включення та відключення ємнісного накопичувача електричної енергії в схемі електровозу;
- створення математичної моделі «тягова мережа і КАЕЕ» в станах „неробочий хід тягової лінії - заряд КАЕЕ”, „пікове навантаження – розряд КАЕЕ”;
- створення математичної моделі «тягова мережа і ЄАЕЕ» в станах „неробочий хід тягової лінії - заряд ЄАЕЕ”, „пікове навантаження – розряд ЄАЕЕ”;

- дослідження впливу КАЕЕ на якість електроенергії в системі електропостачання рухомого електроспоживача;
- дослідження впливу ЄАЕЕ на якість електроенергії в системі електропостачання рухомого електроспоживача;
- аналіз основних залежностей характеристик накопичувачів електричної енергії від часу та режимів роботи електровозу;
- узгодження параметрів та режимів в роботі накопичувачів енергії з елементами системи електропостачання рухомого електроспоживача з індуктивною передачею енергії.

Результати розробки планується використати для розробки нормативної документації для проектування систем електропостачання рухомих електроспоживачів з індуктивною передачею енергії (проектні інститути вугільної промисловості, де вже велася підготовка їх серійного виробництва), для побудови енергозберігаючих систем електропостачання.

Розроблені розрахункові методики та результати досліджень будуть використані при підготовці фахівців для відповідних виробництв та включені у підручник для студентів відповідних спеціальностей, використані в кваліфікаційних роботах аспірантів, докторантів.

Підставою для виконання робіт є Наказ Міністерства освіти і науки України від 17.11.08 р. № 1043, наказ по НГУ від 24.12.08 р. № 388.

Термін проведення роботи: початок – 02.01.2009 р. закінчення – 31.12.2011 р.

# 1 АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ЗАРЯДУ КІНЕТИЧНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ З ПОЗИЦІЇ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ

## 1.1 Алгоритми зарядних процесів у накопичувачах з мінімальним споживанням енергії

Кінетичні накопичувачі енергії, тобто такі, що використовують енергію обертального маховика, у своїй більшості мають електромеханічне виконання. При цьому маховик розкручують за допомогою електричної машини (ЕМ), що працює в режимі двигуна за рахунок надлишкової енергії в мережі живлення або такої, що виділяється при гальмуванні транспортного засобу. При розгляді накопичувача механічна енергія перетворюється в електричну посередництвом ЕМ, що працює в режимі генератора. Як генератор може бути використана та ж ЕМ, що слугує електродвигуном для розкручування маховика. Отримана таким чином енергія може бути використана в періоди інтенсивного енергоспоживання, наприклад, при розгоні транспортного засобу. Взаємозв'язок параметрів накопичувача при заряді і розряді виражається співвідношенням

$$p_z t_z \eta = p_p t_p, \quad (1.1)$$

де  $p_z$ ,  $p_p$  – середні значення потужностей зарядного і розрядного процесів;  $t_z$ ,  $t_p$  – тривалість періодів заряду і розряду;  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії накопичувача.

В автономних системах з обмеженим енергетичним ресурсом дуже суттєва проблема енергозбереження. Вона визначає актуальність пошуку алгоритмів зарядних процесів у будь-яких накопичувачах з мінімальним споживанням енергії за період заряду.

Енергія, яку споживає електромеханічний накопичувач за час заряду  $t_z$ , визначається співвідношенням

$$W_e = \int_0^{t_3} u(t) \cdot i(t) dt, \quad (1.2)$$

де  $u(t)$ ,  $i(t)$  – залежності в часі напруги і струму зарядного ланцюга накопичувача.

Інтеграл (1.2) являє собою функціонал, мінімізація якого здійснюється за методом варіаційного зчислення. Допоміжна умова варіаційної задачі формулюється так:  $v(t) = V_3$ , де  $V_3$  – досягаємо за час  $t_3$  задане значення характерного для конкретного типу накопичувача енергії параметра  $v(t)$ , наприклад, кутової швидкості ротора електромеханічного накопичувача або напруги батареї конденсаторів ємнісного накопичувача.

Проведемо аналіз електромеханічного накопичувача енергії, в якому застосовано зарядний двигун постійного струму з незалежним збудженням. Перехідні процеси у двигуні описуються наступною системою рівнянь:

$$u = C_e \Phi \Omega + R_3 i + L \frac{di}{dt}; \quad (1.3)$$

$$C_e \Phi i - k_m \Omega = J \frac{d\Omega}{dt}, \quad (1.4)$$

де  $R_3$  і  $L$  – сумарні значення активного опору та індуктивності зарядного ланцюга у складі джерела живлення та обмотки якоря двигуна (рис. 1.1);  $C_e$  – коефіцієнт, що визначає параметри обмотки якоря та магнітної системи двигуна;  $k_m$  – механічний опір, який враховує втрати від тертя в підшипникових опорах та газодинамічні втрати маховика, поміщеного у кожух;  $J$  – приведений момент інерції;  $\Omega$  – кутова швидкість якоря;  $\Phi$  – магнітний потік двигуна.

Змінні  $u$ ,  $i$ ,  $\Omega$ , є функціями часу  $t$ , параметри  $R_3$ ,  $L$ ,  $\Phi$ ,  $k_m$ ,  $J$  прийнято сталими.

Запишемо рівняння (1.4) відносно струму:

$$i = \frac{k_m \Omega}{C_e \Phi} + \frac{J}{C_e \Phi} \frac{d\Omega}{dt}. \quad (1.5)$$

Помножимо обидві частини рівняння (1.3) на  $i$ :

$$u \cdot i = C_e \Phi \Omega i + R_3 i^2 + Li \frac{di}{dt}. \quad (1.6)$$

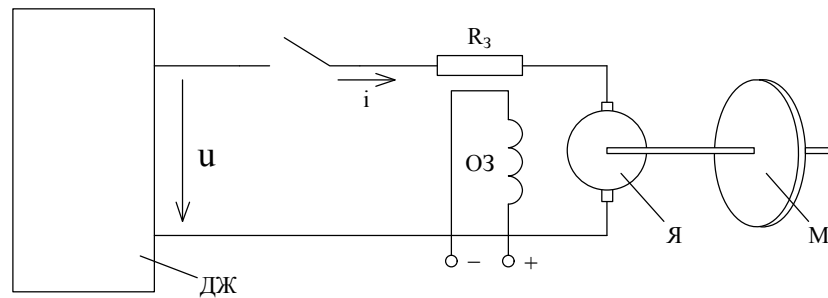


Рисунок 1.1 - Структурна схема електромеханічного накопичувача енергії (ОЗ – обмотка збудження; Я – якор двигуна; М – маховик; ДЖ – кероване джерело живлення).

Підставимо у перший член правої частини рівняння (1.6) вираз (1.5):

$$u \cdot i = R_3 \cdot i^2 + k_m \Omega^2 + L \cdot i \frac{di}{dt} + J \cdot \Omega \frac{d\Omega}{dt}. \quad (1.7)$$

З урахуванням (1.2) запишемо:

$$W_e = \int_0^{t_3} (R_3 \cdot i^2 + k_m \Omega^2) dt + \int_0^{t_3} (L \cdot i \cdot i' + J \cdot \Omega \cdot \Omega') dt. \quad (1.8)$$

Перший інтеграл виразу (1.8) виражає сумарну енергію втрат потужності за час  $t_3$  при заряді накопичувача енергії. Підінтегральна функція другої частини виразу (1.8) є похідною у часі від суми магнітної та кінетичної енергій, тобто потужність

$$Q = \frac{d}{dt} \left( \frac{L \cdot i^2}{2} + \frac{J \cdot \Omega^2}{2} \right). \quad (1.9)$$

Отже маємо інтеграл від повного диференціалу, який дорівнює сталій, що залежить виключно від межі інтегрування. І, як наслідок, мінімізувати споживану від джерела живлення енергію  $W_e$  можливо шляхом знаходження мінімуму енергії втрат, тобто інтегралу:

$$W_{em} = \int_0^{t_3} (R_3 \cdot i^2 + k_m \Omega^2) dt. \quad (1.10)$$

Коефіцієнт корисної дії (к.к.д.) накопичувача у зарядному режимі:

$$\eta_3 = \frac{\int_0^{t_3} Q dt}{\int_0^{t_3} Q dt + W_{em}} = \frac{\left[ \frac{L \cdot i^2}{2} + \frac{J \cdot \Omega^2}{2} \right]_0^{t_3}}{\left[ \frac{L \cdot i^2}{2} + \frac{J \cdot \Omega^2}{2} \right]_0^{t_3} + W_{em}}. \quad (1.11)$$

З теорії електричних машин відомо, що близьке до максимального значення к.к.д. буде забезпечено при рівності постійних та змінних втрат потужності. Кутова швидкість  $\Omega$  при розкручуванні маховика змінюється від нуля до  $\Omega_3$ . Отже треба забезпечити незмінним значення струму двигуна  $i = I = const$ .

З (1.4) маємо співвідношення:

$$\Omega' + \frac{\Omega}{\tau_m} = \frac{C_e \Phi I}{J}, \quad (1.12)$$

де  $\tau_m = J/k_m$  – механічна стала часу.

Розв'язок рівняння (1.12) при  $\Omega(0) = 0$  має вид:

$$\Omega(t) = \frac{R_3 I \cdot \tau_m}{C_e \Phi \cdot \tau_{em}} (1 - e^{-t/\tau_m}), \quad (1.13)$$

тобто зміна кутової швидкості двигуна згідно з (1.14) при розкручуванні маховика забезпечить максимальне значення к.к.д. процесу заряду накопичувача (позначено  $\tau_{em} = JR_3 / (C_e \Phi)^2$  – електромеханічна стала часу накопичувача).

Запишемо (1.13) у вигляді:

$$\Omega(t) = \Omega_y (1 - e^{-t/\tau_m}), \quad (1.14)$$

де  $\Omega_y = \frac{R_3 I \cdot \tau_m}{C_e \Phi \cdot \tau_{em}} = \frac{C_e \cdot \Phi \cdot I}{k_m}$  – усталена швидкість двигуна.

Вираз (1.14) має загальний характер і може бути використаний для будь-якого типу розгінного двигуна накопичувача.

Для великих значень  $\tau_m = J/k_m < \infty$  розкладання експоненціальної функції з (1.14) в ряд дає:

$$1 - e^{-t/\tau_m} \approx t/\tau_m. \quad (1.15)$$

Тоді з (1.14) маємо:



$$\Omega(t) = \frac{U_n}{C_e \Phi} \cdot \frac{t}{\tau_{em}} = \Omega_n \cdot \frac{t}{\tau_{em}}, \quad (1.16)$$

де  $U_n = I \cdot R_3$ ;  $\Omega_n = U_n / (C_e \Phi)$ .

Кінцеве значення кутової швидкості ротора  $\Omega_3$  в режимі зарядки накопичувача, що досягається за час  $t_3$ , звичайно задане, тобто  $\Omega(t_3) = \Omega_3$ .

Тоді електрорушійна сила обмотки якоря в кінці зарядки  $U_3 = C_e \Phi \Omega_3$  і струм короткого замикання  $I_3 = U_3 / R_3$ , а з (1.16) витікає:

$$\Omega_3 = \Omega_n \frac{t_3}{\tau_{em}}. \quad (1.17)$$

Після підстановки в останній вираз значень  $\Omega_3 = \frac{I_3 R_3}{C_e \Phi}$  і одержимо:

$$I = I_3 \frac{\tau_{em}}{t_3} = \frac{J \Omega_3}{C_e \Phi} \cdot \frac{1}{t_3}, \quad (1.18)$$

тобто розмір незмінного у часі струму якоря двигуна, необхідного для досягнення кутової швидкості  $\Omega = \Omega_3$  за проміжок часу  $t_3$ .

Після підстановки (1.17) і (1.18) у рівняння (1.3) одержимо співвідношення:

$$u(t) = U_3 (t + \tau_{em}) / t_3 = U_0 + U_3 \frac{t}{t_3}, \quad (1.19)$$

згідно з яким повинна змінюватись у часі вихідна напруга джерела живлення;

$U_0 = U_3 \frac{\tau_{em}}{t_3} = \frac{J R_3 \Omega_3}{C_e \Phi t_3}$  – початкова напруга.

Для аналізу мого процесу заряду накопичувача енергії, коли  $i = I = const$ , підстановка (1.16) і (1.18) у (1.10) та подальшого інтегрування дає

$$W_{em} = (R_3 I_3^2 \tau_{em}^2 / t_3) + k_M \Omega_3^2 t_3 / 3. \quad (1.20)$$

Дослідження виразу (1.22) на екстремум дає змогу визначити оптимальний час зарядного процесу:

$$t_{30} = \sqrt{3 \cdot \tau_M \tau_{em}}, \quad (1.21)$$

якому відповідає мінімум енергії втрат:

$$W_{em_m} = 2 \cdot R_3 I_3^2 \tau_{em} \sqrt{\frac{\tau_{em}}{3 \cdot \tau_M}}, \quad (1.22)$$

та значення струму джерела живлення згідно з (1.18):

$$I = \frac{I_3}{\sqrt{3\tau_m/\tau_{em}}}. \quad (1.23)$$

У випадках, коли  $t_3 > t_{30}$  по (1.21) для забезпечення мінімальних втрат енергії в процесі заряду накопичувача зміну кутової швидкості розгінного двигуна у часі треба здійснювати за законом:

$$\Omega(t) = \Omega_3 \frac{sh(m \cdot t)}{sh(m \cdot t_3)}, \quad (1.24)$$

що є результатом мінімізації функціоналу (1.2) [2]. Позначено:  $m = \sqrt{\tau_m^{-1}\tau_{em}^{-1} + \tau_m^{-2}}$ .

Реалізація такого режиму є дуже важливою для двигуна, тому що при  $t > 2 \cdot \tau_{em}$  напруга живлення і його струм значно перевищують номінальні величини.

## 1.2 Порівняння некерованого і керованого зарядних процесів електромеханічного накопичувача енергії

У некерованому процесі розгону маховика для конструкції з малим значенням  $k_m \neq 0$  виконується нерівність  $\tau_m \gg \tau_{em}$ , тому при умові  $\Omega(t_3) = \Omega_3$ , маємо наближені співвідношення  $U \approx U_3$ ,  $I \approx I_3$  (при  $t = 0$ ) і

$$\Omega(t) \approx \Omega_3 (1 - e^{-t/\tau_{em}}); \quad (1.25)$$

$$i(t) \approx I_3 e^{-t/\tau_{em}}.$$

Вважаючи на співвідношення

$$\frac{k_m \Omega_3^2}{R_3 I_3^2} = \frac{\tau_{em}}{\tau_m},$$

визначимо втрати енергії за час  $t_3 = 4 \cdot \tau_{em}$  у некерованому процесі розгону маховика

$$W_{em} = \int_0^{t_3} (R_3 \cdot i^2 + k_m \Omega^2) dt \approx R_3 I_3^2 \tau_{em} \left[ 0,5 + \left( 2,5 \cdot \frac{\tau_{em}}{\tau_m} \right) \right].$$

Якщо прийняти  $\tau_m/\tau_{em} = 6$ , то

$$W_{em} = 0,92 \cdot R_3 I_3^2 \tau_{em}.$$

У керованому процесі розгону при оптимальному часі заряду маємо по (1.22)

$$W_{em_m} = 0,47 \cdot R_3 I_3^2 \cdot \tau_{em}.$$

Отже відношення  $W_{em}/W_{em_m} = 1,95$ .

### 1.3 Аналіз процесу заряду механічного накопичувача енергії

Рівняння обертового руху маховика механічного накопичувача (МН) має вигляд:

$$M = k_m \Omega + M_J, \quad (1.26)$$

де  $M$  – зовнішній момент, що створюється на валу МН незалежним двигуном (в електровозі – це тяговий двигун);  $M_J = J \frac{d\Omega}{dt}$  – динамічний момент;  $J$  – приведений момент інерції маховика;  $\Omega$  – кутова швидкість маховика.

На основі аналізу попередніх типів накопичувачів енергії приймемо  $M_J = const$  у зарядному процесі. З урахуванням початкової умови  $\Omega(0) = 0$  отримаємо такі залежності:

$$\Omega(t) = \frac{M_J \cdot t}{J}; \quad M(t) = M_J \left( 1 + \frac{t}{\tau_m} \right); \quad \tau_m = \frac{J}{k_m}. \quad (1.27)$$

Згідно з умовою  $\Omega(\tau_3) = \Omega_3$  з (1.27) знаходимо:

$$\begin{aligned} \Omega(t) &= \Omega_3 \frac{t}{t_3}; \quad M(t) = M_3 (\tau_m + t)/t_3; \\ M_J &= \frac{J \Omega_3}{t_3}; \quad M_3 = k_3 \Omega_3. \end{aligned} \quad (1.28)$$

Втрати енергії внаслідок тертя за час  $t_3$

$$W_{em} = \int_0^{t_3} k_m \Omega^2(t) dt = k_m \Omega^2 \frac{t_3}{3} = \frac{M_3 \Omega_3 t_3}{3}. \quad (1.29)$$

Корисна енергія, накопичена маховиком за час  $t_3$ :

$$W_\kappa = \frac{J \Omega_3^2}{2}.$$

Коефіцієнт корисної дії механічного накопичувача:

$$\eta = \frac{W_{\kappa}}{W_{\kappa} + W_{\text{вт}}} = \frac{1}{1 + \frac{2}{3} \frac{t_3}{\tau_m}}$$

У випадку, коли  $t_3 = \tau_m$ ,  $\eta = 0,6$ .

## **2 АНАЛІЗ СПОСОБІВ ЗАРЯДУ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ І ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО З ПОЗИЦІЇ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ**

### **2.1 Схеми компонування системи електропостачання рухомого електроспоживача ємнісним накопичувачем енергії**

Застосування ємнісного накопичувача енергії як елементу системи електропостачання рухомого електроспоживача з індуктивною передачею енергії є актуальним науково-технічним завданням і дозволяє: підвищити ефективність передачі енергії електрорухомому складу шляхом вирівнювання графіка навантаження, підвищити енергоефективність рухомого складу за рахунок накопичення енергії гальмування, здійснити евакуацію локомотива при зникненні живлячого струму, підтримувати якість електроживлення, згладити пікові навантаження. Принципово може бути запропоновано два варіанти місцеположення накопичувального конденсаторного блоку [5].

Варіант установки накопичувального блоку безпосередньо на рухомому складі має ряд переваг перед варіантом його установки на тяговій підстанції і дозволяє: найефективніше і повно використовувати енергію рекуперативного гальмування, підвищити ефективність передачі енергії електрорухомому складу від перетворювальної підстанції; скоротити вірогідність появи негативних явищ, викликаних нерівномірністю графіка електроспоживання, шляхом вирівнювання цього графіка; здійснити евакуацію локомотива при зникненні живлячого струму.

Особливість схеми електричних ланцюгів локомотива безконтактного електровоза полягає в тому, що енергія до нього надходить у вигляді змінного струму підвищеної частоти, який потім випрямляється і подається на двигуни (рис. 2.1).

Таким чином, принципово існує можливість будувати схему зарядних ланцюгів накопичувального блоку і на базі змінного, і на базі постійного струмів. Відповідно до [1], залежно від призначення ємнісного накопичувача,

зарядні пристрої виконуються на базі статичних перетворювачів і електромашинних генераторів постійного і змінного струмів. Статичні зарядні пристрої перетворюють постійний і змінний струми первинної живлячої мережі для заряду ємнісного накопичувача. Нас цікавлять саме такі зарядні пристрої.

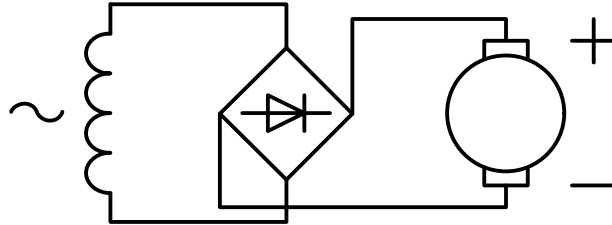
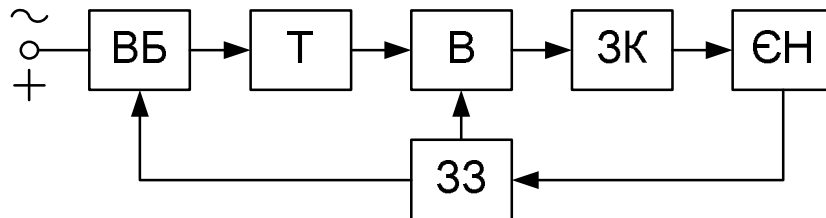


Рисунок 2.1 - Спрощена схема живлення двигунів безконтактного електровозу

Згідно з [1] основні типи зарядних пристроїв за структурою і складом силових елементів подібні, що і дозволяє представити їх (виключаючи безтрансформаторні схеми з конденсаторним множенням напруги, що рідко застосовуються) узагальненою схемою (рис. 2.2), незалежно від первинної системи електроживлення.



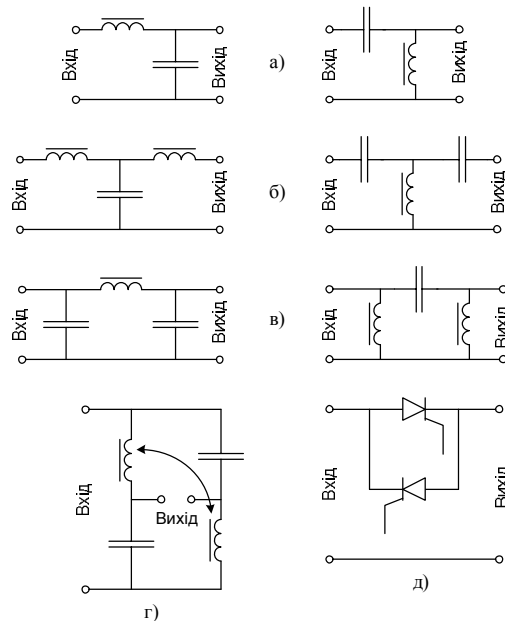
- ВБ – вхідний блок;
- Т – підвищуючий трансформатор;
- В – випрямляч (некерований або керований);
- ЗК – зарядний контур;
- ЄН – ємнісний накопичувач;
- ЗЗ – зворотний зв'язок.

Рисунок 2.2 - Функціональна схема зарядного пристрою ємнісного накопичувача енергії.

Вхідний блок може відрізнитися залежно (наприклад, від типу системи живлення) і бути інвертором при живленні постійним струмом. Причому інвертор як керований, так і некерований. Якщо керований – з його

допомогою може здійснюватися регулювання зарядного процесу, тоді випрямляч вибирається нерегульований.

У зарядних пристроях з первинним живленням від мережі змінного струму вхідний блок являє собою різні схеми струмообмеження і формування зарядних процесів ( $i = const$ ,  $KПД = const$ ,  $p = const$ ), виконані на активних, індуктивних, ємнісних (активно-ємнісні перетворювачі), ключових елементах (рис. 2.3).



*a - г* – індуктивно-ємнісні перетворювачі;  
*д* – регульований тиристорний перетворювач.

Рисунок 2.3 - Схеми вхідного блоку ЗП з живленням від джерела змінного струму.

За допомогою підвищуючого трансформатора (рис. 2.2) змінна напруга з вихідного блоку збільшується до значень, що перевищують поточну напругу ємнісного накопичувача для здійснення його подальшої зарядки.

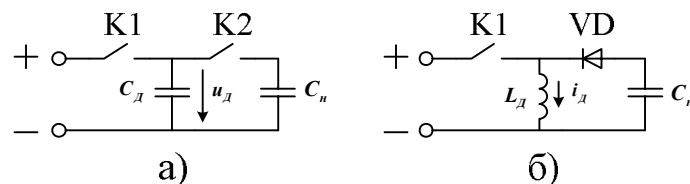
За допомогою випрямляча змінний струм на виході трансформатора випрямляється. Випрямляч (так само, як і інвертор вхідного блоку) може бути як керований, так і некерований. І якщо вхідний блок нерегульований, тоді функція регулювання зарядного процесу покладається на керований випрямляч, як правило, на тиристорах з фазовим регулюванням за допомогою зміни кута управління. Таке регулювання є активним

автоматичним управлінням зарядним процесом із зворотними зв'язками за регульованим параметром ( $u_3, i_3, p_3$ ).

Якщо вхідний блок являє собою нерегульовані струмообмежувальні дроселі, а випрямляч – некерований, то в зарядному контурі ЗК (рис. 2.2) після випрямляча часто застосовують дозатори енергії (ємнісні або індуктивні). При цьому основний ємнісний блок заряджається «дозами» енергії від накопичувачів-дозаторів малої енергії. Якщо «доза» і частота «дозування» постійні, то заряд здійснюється при споживанні незмінної в зарядному циклі потужності від джерела живлення.

Принцип дії ємнісного дозування пояснюється схемою, показаною на рис. 2.4,а. При замкнутому К1 і розімкненому К2 в контурі  $C_d$  запасається доза енергії  $W_d = 0,5 \cdot C_d \cdot u_d^2$ .

При замиканні К2 і розмиканні К1 енергія  $W_d$  передається накопичувачу  $C_n$ . Аналогічно працює індуктивний дозатор  $L_d$  (рис. 2.4,б), де роль ключа К2 виконує діод VD, через який передається „доза” енергії  $W_d = 0,5 \cdot L_d \cdot i_d^2$  до основного накопичувача  $C_n$ . Використовуються також і комбіновані схеми з проміжними ємнісними й індуктивними накопичувачами.



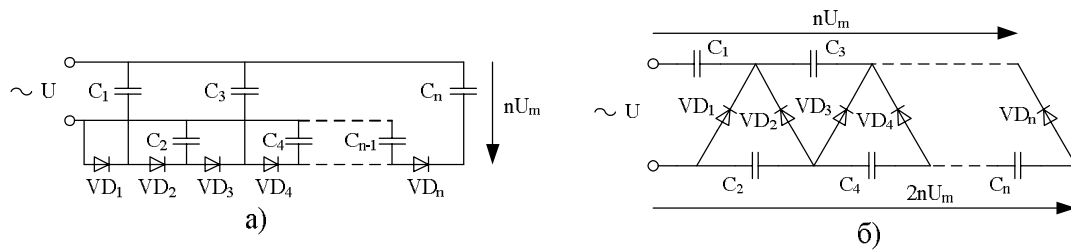
а – ємнісного;  
б – індуктивного.

Рисунок 2.4 - Схеми з використанням дозаторів енергії:

Окремий ряд схем – з «електричним» множенням напруги [1]. Принцип їх роботи заснований на тому, що є ряд проміжних конденсаторів і з кожним на півперіодом живлячої напруги кожен слідуючий конденсатор заряджається до напруги на обкладках  $nU_m$ , де  $n$  – порядковий номер конденсатора;  $U_m$  – максимальне значення півхвилі живлячої напруги. Приклад схем з множенням напруги показаний на рис. 2.5.



Розглянемо елементи функціональної схеми (рис. 2.2) стосовно прототипів безконтактних електровозів [6].



а – першого роду,

б – другого роду.

Рисунок 2.5 - Схема з множенням напруги:

Припустимо, що зарядний пристрій приєднується з боку змінного струму (рис. 2.1). Функція вхідного блоку в цьому випадку – здійснювати струмообмеження або (і) формування зарядних процесів. Але структура вхідного блоку формується на базі реактивних і (або) ключових керованих елементів, що приведе до внесення в енергоприймальний контур і тягову лінію додаткового реактивного опору, що, у свою чергу, приведе до погіршення енергетичних характеристик безконтактного електровоза. Те ж саме стосується випрямляча, якщо він керований і служить для регулювання зарядного процесу.

Функції трансформатора, що підвищує напругу, збільшити її до необхідного рівня в конкретному випадку застосування накопичувального конденсатора. У разі застосування накопичувального блоку конденсаторів, на безконтактному електровозі немає необхідності в над наднапрузі. У даному випадку важливішу роль відіграє енергоємність блоку. Сучасні енергоємні конденсатори, що випускаються (наприклад, МНПО «Еконд»), дозволяють набрати батарею з необхідною ємністю на будь-яку напругу, тобто – і на потрібну енергоємність. Таким чином, необхідність у трансформаторі, що підвищує напругу, в даному випадку може бути виключена.

Що стосується некерованого випрямляча ЗП, то без вхідного блоку і трансформатора його вихід стає еквівалентним виходу випрямляча електровоза. В цьому випадку необхідність і у випрямлячі зарядного пристрою також відпадає.

Розглянемо тепер варіант під'єднання зарядного пристрою (рис. 2.2) з боку постійного струму (рис. 2.1).

Якщо вхідним блоком є інвертор, тоді ефективність застосування накопичувального блоку знижується у зв'язку із збільшенням втрат енергії зарядним пристроєм: при перетворенні випрямленого струму в змінний (інвертор); в трансформаторі; при перетворенні змінного струму в постійний (випрямляч).

Якщо вхідний блок є якою-небудь схемою струмообмеження і формування зарядних процесів, виконану на активних, індуктивних, ємкісних або ключових елементах, тоді зникає необхідність у трансформаторі і випрямлячі. Вхідний блок стає елементом зарядного контуру.

Враховуючи вищесказане, при використанні накопичувального блоку конденсаторів на шахтному безконтактному електровозі В14 з метою вирівнювання графіка навантаження функціональна схема (рис. 2.2) зводиться до вигляду:

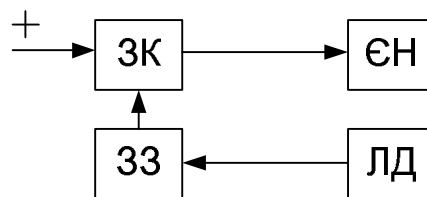


Рисунок 2.6 - Функціональна схема використання накопичувального блоку конденсаторів на шахтному безконтактному електровозі В14 з метою вирівнювання графіка навантаження.

Тут ЛД – ланцюг двигунів. Тобто зарядний пристрій повинен підключатися з боку випрямленої напруги.

Згідно з класифікацією зарядних ланцюгів ємнісних накопичувачів енергії [3, рис. 3] схеми з живленням від джерела постійної напруги діляться за типом зовнішніх характеристик джерела – жорсткі і падаючі.

Випрямлена напруга в годинному режимі навантаження тягових двигунів безконтактного електровоза ( $I_v = 152 \text{ A}$ ) складає 185 В [7]. Випрямлена напруга у тривалому режимі навантаження тягових двигунів ( $I_{\text{доп}} = 85 \text{ A}$ ) складає 210 В [7]. Крім того, одна з цілей установки накопичувача – вирівнювання графіка навантаження електровоза, що приведе до стабілізації споживаного від випрямляча струму. Таким чином, можна вважати випрямляч джерелом з жорсткою зовнішньою характеристикою.

Відповідно до класифікації [3, рис. 3] далі ділення йде на схеми з інвертором, з резистором, ключові схеми. Застосування інвертора було розглянуто вище. Застосування схем на його базі у даному випадку недоцільно.

Можливість застосування і схем з резисторами слід виключити. Через зарядний пристрій повинні проходити значні потоки енергії. У резисторах втрачатиметься велика частина цієї енергії, що неприпустимо і суперечить цілям установки накопичувача.

Залишається підклас ключових схем, які, у свою чергу, діляться на підкласи з дозуючими конденсаторами і дозуючими реакторами. Приклади простих схем даних підкласів зображено на рис. 2.4.

Застосування схеми з дозуючим конденсатором (як на рис. 2.4,а) пов'язане з низкою труднощів. Одна з цілей застосування накопичувального блоку на безконтактному електровозі – дозуючий конденсатор повинен відібрати надлишок потужності, що недоспоживається двигунами. Але струм заряду цього конденсатора у початковий момент часу нічим не обмежений і матиме значні величини, що небажано і суперечить меті установки накопичувального блоку. Схема вимагає додаткових струмообмежувальних елементів. Крім того, з поступовою зарядкою основного накопичувального блоку зменшується ефективна енергоємність дозуючого конденсатора,

оскільки після кожного циклу зарядки між його обкладками залишається напруга, рівна напрузі на накопичувальному блоці конденсаторів.

Подібних обмежень позбавлена схема з індуктивним дозуючим елементом (рис. 2.4,б). При замиканні ключа К1 струм в котушці зростає до необхідного значення, ключ розмикається – і енергія, запасена у магнітному полі котушки, передається на конденсатор. Струм зменшується до нуля – і схема готова до повторного циклу. Крім того, тут один з керованих ключів замінюється на некерований, що веде до підвищення надійності роботи.

Дана схема не вимагає додаткових перетворень роду струму, вона проста, не містить додаткових опорів, через які могла б втрачатися енергія. Її елементи достатньо енергоефективні й надійні.

Схема може бути обрана в якості базового елемента зарядного ланцюга оптимального з позиції зменшення втрат електроенергії зарядного пристрою, який забезпечує досягнення цілей, що переслідуються установкою накопичувального блоку конденсаторів на локомотив безконтактного електровоза.

## **2.2 Аналіз процесу заряду ємнісного накопичувача енергії з метою мінімізації втрат енергії**

При використанні ємнісних накопичувачів (ЄН) енергії у шахтному електровозному транспорті зарядка конденсаторів ЄН здійснюється або безпосередньо від е.р.с. обмоток тягових двигунів, які в періоди гальмування транспорту переводять у генераторний режим роботи, або від напруги перетворювача у складі інвертора високочастотного трансформатора та випрямляча, живлення яких забезпечують тягові двигуни у генераторному режимі. Кутова швидкість двигунів, як правило, змінна; регулювання процесу зарядки здійснюється посередництвом регулятора збудження двигунів; випрямляч виконується некерованим.

Структурну схему ємнісного накопичувача приведено на рис. 2.7.

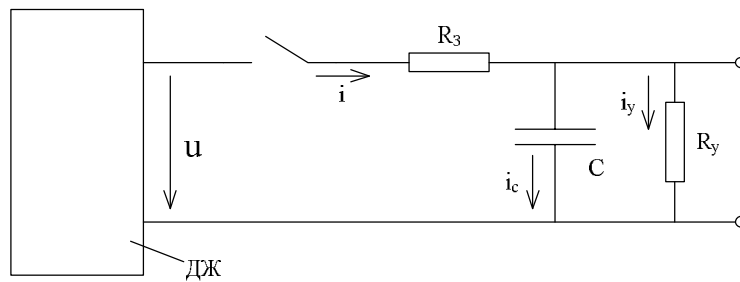


Рисунок 2.7 - Структурна схема ємнісного накопичувача.

Початковими співвідношеннями для аналізу є такі [3]:

$$\begin{aligned} u &= R_3 \cdot i + u_c; \quad i = i_c + i_y; \\ i_c &= C \frac{du_c}{dt}; \quad i_y = \frac{u_c}{R_y}, \end{aligned} \quad (2.1)$$

де  $u$ ,  $i$  та  $u_c$ ,  $i_c$  – напруга і струми джерела живлення (ДЖ) і конденсаторів  $C$  накопичувача;  $R_3$ ,  $R_y$  – опори ланцюгів заряду та еквівалентного, що враховує втрати потужності від струму витoku  $i_y$  і на популяризацію діелектрика конденсаторів  $C$ .

Регулювання напруги зарядного ланцюга  $u(t)$  повинно забезпечити мінімум споживаної накопичувачем електроенергії за час зарядного процесу  $t_3$ :

$$W_e = \int_0^{t_3} u(t) \cdot i(t) dt. \quad (2.2)$$

Використавши рівняння (2.1) запишемо:

$$u \cdot i = R_3 i^2 + \frac{u_c^2}{R_y} + C u_c \frac{du_c}{dt}. \quad (2.3)$$

Тоді

$$W_e = \int_0^{t_3} \left( R_3 i^2 + \frac{u_c^2}{R_y} \right) dt + \int_0^{t_3} C u_c u_c' dt. \quad (2.4)$$

Перший інтеграл (2.3) являє собою енергію втрат  $W_{em}$  у зарядному контурі, другий – енергію, накопичену в конденсаторах  $C$  за час  $t_3$ . Підінтегральна функція другого інтегралу в (2.3) є похідною у часі від цієї енергії і являє собою потужність

$$Q = \frac{d}{dt} \left( \frac{Cu_c^2}{2} \right). \quad (2.4)$$

Тому інтеграл (другий у (2.3)) від повного диференціалу дорівнює сталій, що залежить виключно від межі інтегрування. Отже мінімізувати споживану від джерела живлення енергію  $W_e$  можливо шляхом мінімізації тільки першого інтегралу в (2.3).

При значному  $R_y < \infty$  квазіоптимальний процес заряду ЄН реалізується за допомогою джерела живлення, яке забезпечує струм  $i = I = const$  при відповідній зміні напруги  $u(t)$ . При цьому з рівняння (2.1) одержимо:

$$u_c' + \frac{u_c}{R_y C} = I/C. \quad (2.5)$$

Розв'язок останнього рівняння при умовах  $u_c(0) = U_{c_0}$ ,  $u_c(t_3) = U_{c_3}$  приводить до залежностей

$$u_c(t) = U_{c_0} + \left[ (U_{c_3} - U_{c_0}) \cdot \frac{t}{t_3} \right]; \quad (2.6)$$

$$i \approx i_c = (I_{c_3} - I_{c_0}) \frac{\tau_3}{t_3} = const; \quad (2.7)$$

$$u(t) = U_{c_0} + \left[ (U_{c_3} - U_{c_0}) \cdot \frac{t + \tau_3}{t_3} \right], \quad (2.8)$$

де  $\tau_3 = R_3 C$ ;  $I_{c_3} = U_{c_3} / R_3$ ;  $I_{c_0} = U_{c_0} / R_3$ ;  $t_3$  – тривалість зарядного процесу.

У випадку, коли  $u_c(0) = 0$  з рівнянь (2.1) та (2.6)-(2.8) витікає:

$$u_c(t) = U_{c_3} \frac{t}{t_3} = U_3 \frac{t}{\tau_3}; \quad U_3 = R_3 \cdot I; \quad (2.9)$$

$$u(t) = U_{c_3} \frac{\tau_3 + t}{t_3} = U_3 \left( 1 + \frac{t}{\tau_3} \right); \quad (2.10)$$

$$i_y = I \cdot \frac{t}{\tau_y}, \quad (2.11)$$

де  $\tau_y = R_c \cdot C$  – стала часу.

Втрати енергії в процесі заряду ЄН

$$W_{em} = \int_0^{t_3} (R_3 I^2 + R_y i_y^2) dt, \quad (2.12)$$

будуть мінімальними, якщо тривалість заряду  $t_3$  дорівнює оптимальному значенню [3]:

$$t_{30} = \sqrt{3\tau_3\tau_y}. \quad (2.13)$$

Інтегрування (2.12) з підстановкою за (2.11) і при  $t_3 = t_{30}$  за (2.13) дає мінімальне значення втрат енергії у накопичувачі:

$$W_{em_m} = 2R_3 I_{c_3}^2 \tau_3 \sqrt{\frac{\tau_y}{3\tau_3}}. \quad (2.14)$$

На основі виразів (2.9) і (2.3) маємо кінцеве значення напруги на конденсаторах ЄН:

$$U_{c_3} = u_c(t_{30}) = U_3 \sqrt{\frac{3\tau_y}{\tau_3}},$$

що забезпечує при  $W_{em} = W_{em_m}$  струм зарядного ланцюга:

$$I = \frac{U_{c_3} \cdot \tau_3}{R_3 t_{30}} = \frac{I_{c_3} \tau_3}{\sqrt{3\tau_3\tau_y}},$$

де  $I_{c_3} = U_{c_3} / R_3$ .

### 2.3 Порівняння некерованого і керованого зарядних процесів ємнісного накопичувача енергії

Для некерованого ЄН при умовах  $u_c(0) = 0$ ,  $u_c(t_3) = U_{c_3}$ ,  $\tau_y \gg \tau_3$  і рівностях  $R_y = R_3 \cdot \tau_y / \tau_3$ ,  $I_y = I_{c_3} \tau_3 / \tau_y$  із рівнянь (2.1) знаходимо:

$$u_c \approx U_{c_3} (1 - e^{-t/\tau_3}); \quad i_y \approx I_{c_3} \frac{\tau_3}{\tau_y} (1 - e^{-t/\tau_3});$$

$$i \approx I_{c_3} \left( \frac{\tau_3}{\tau_y} + e^{-t/\tau_3} \right). \quad (2.15)$$

Втрати енергії у некерованому ЄН за час зарядного процесу  $t_3 = 4\tau_3$ :

$$W_{em_u} = \int_0^{t_3} (R_3 i^2 + R_y i_y^2) dt \approx R_3 I_{c_3}^2 \tau_3 \left( 0,5 + 4 \frac{\tau_3}{\tau_y} \right). \quad (2.16)$$

Зауважимо, що без урахування струму витоку, тобто при  $\tau_y = R_y C \rightarrow \infty$ , втрати енергії  $W_{втн}$  дорівнюють енергії  $W_3 = 0,5 \cdot CU_{c_3}^2$  зарядженого ЄН і складають половину спожитої за час  $t_3$  енергії  $W_e = W_3 + W_{втн}$  джерела живлення, а коефіцієнт корисної дії не перевищує 0,5 незалежно від значення опору  $R_3$ .

Припускаючи  $\tau_3/\tau_y = 20$ , з (2.16) отримаємо:

$$W_{втн} = 0,7 \cdot R_3 I_{c_3}^2 \tau_3. \quad (2.17)$$

Відповідно з (2.14):

$$W_{втм} = 0,258 \cdot R_3 I_{c_3}^2 \tau_3. \quad (2.18)$$

Відношення

$$\frac{W_{втн}}{W_{втм}} = 2,7.$$

Отже керований згідно з (2.10) процес заряду ЄН дозволяє значно зменшити втрати енергії порівняно з некерованим процесом.



### 3 АНАЛІЗ СПОСОБІВ РОЗРЯДУ КІНЕТИЧЕСКОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕНЕРГІЇ І ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО З ПОЗИЦІЇ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Режим видачі енергії розряду здійснюється, коли кінетичний накопичувач енергії використовується як джерело автономного живлення приводу електровоза або як допоміжне джерело автономного електропостачання.

Енергоємність кінетичного накопичувача енергії має наступний стан

$$A = A_0 + A_{\text{раб}}, \quad (3.1)$$

де  $A_{\text{раб}}$  - робоча складова енергоємності.

За умовами надійності і довговічності роботи кінетичного накопичувача енергії  $A_{\text{раб}} < A_H$ ,

де  $A_H$  - повна енергоємність накопичувача енергії.

Таким чином, робоча енергоємність накопичувача становить

$$A_{\text{раб}} = (1 - k_u) A_H, \quad (3.2)$$

де  $k_u$  - коефіцієнт використання накопичувача, що показує яка частина його енергоємності, може бути витрачена.

Розряд кінетичного накопичувача відбувається при регульованому магнітному потоці збудження тягового двигуна, що працює як генератор. Від генератора в навантаження надходить корисна електрична енергія розряду кінетичного модуля

$$A_{\text{разр}} = \int_0^{t_p} p_H(t) dt, \quad (3.3)$$

де  $p_H(t) = i^2(t) R_{\text{нт}}$  - потужність ланцюга навантаження при розряді на модулі накопичувача;  $i(t)$ ,  $R_{\text{нт}}$  - струм і опір навантаження.

У режимі розряду накопичувач енергії за час  $t_p$  тільки частина енергії  $A_{\text{раб}}$  перетворить в енергію  $A_{\text{разр}}$  по (3.3), інша частина  $A_{\text{раб}}$  витрачається на покриття втрат, а певна частина  $A_{\text{раб}}$  може залишитися невикористаною.

У режимі розряду модуля функціональна послідовність у передачі енергії визначається по наступних елементах: кінетичний модуль - механічна передача - електричний генератор - тягові двигуни. Потоки потужності в цьому режимі формується в такий спосіб:  $P_M$  - механічна потужність кінетичного накопичувача;  $P_{\phi M}$  - потужність на виході фрикційної муфти;  $P_{\text{MECH}}$  - механічна потужність, передана генератором через механічну передачу;  $P_G$  - електрична потужність генераторів, що віддає в навантаження, що представляє тягові двигуни електровоза.

Якщо в режимі заряду рівень втрат можна понизити скороченням циклу заряду, то рівень втрат у режимі розряду визначається технологічним циклом роботи електровоза в автономному режимі при використанні модуля по основному призначенню або технологічному циклу при використанні модуля по допоміжному призначенню.

На загальний рівень втрат режиму розряду істотну роль роблять втрати маховика й механічної передачі.

Втрати маховика представляють суму втрат на тертя в опорних підшипниках ( $P_{\text{ТП}}$ ) і аеродинамічне тертя ( $P_{\text{ТА}}$ ).

Втрати на тертя в опорних підшипниках розраховуючи на парі при заданій кутовій швидкості  $\omega = 2\pi n$

$$P_{\text{ТП}} = 2\pi n M_{\text{ТП}}, \quad (3.4)$$

де момент тертя пари підшипників

$$M_{\text{ТП}} = 0,5 g m f_{\text{ТП}} d_B. \quad (3.5)$$

Тут  $m$  - маса маховика;  $f_{ТП}$  - коефіцієнт тертя підшипника ( $f_{ТП} = 0,001...0,004$  для опор кочення;  $f_{ТП} = 0,015...0,02$  для опор ковзання залежно від якості підшипника);  $d_B$  - діаметр вала в опорі;  $g$  - 9,81 м/с.

Згідно (3.5) момент тертя в підшипниках, в основному, визначається його розмірами й навантаженням, а втрати в опорах - частоті обертання вала маховика. У дійсності швидкісна складова втрат може бути пропорційна частоті обертання в ступені, трохи більшої (або меншої) першої.

Втрати потужності на аеродинамічне тертя

$$P_{ТА} = P_{ТЦ} + P_{ТД}, \quad (3.6)$$

де  $P_{ТЦ}$  - визначається моментом  $M_{ТЦ}$  на циліндричній поверхні маховика шириною  $L$ ;  $P_{ТД}$  - моментом  $M_{ТД}$  на двох торцевих дискових поверхнях діаметром  $D=2R$ .

Втрати потужності  $P_{ТЦ}$  і  $P_{ТД}$  можуть бути розраховані на основі класичної моделі плинну Куэтта (воно спостерігається в каналі, у якого одна зі стінок рухається). У випадку турбулентного плинну розрахунок з урахуванням емпіричних коефіцієнтів виробляється по наступних залежностях:

$$\begin{aligned} P_{ТЦ} &= 2\pi m M_{ТЦ} = 0,456 D^4 L n^3; \\ P_{ТД} &= 2\pi m M_{ТД} = 3,82 \cdot 10^2 C_M \gamma_a D^3 n^3. \end{aligned} \quad (3.7)$$

Причому коефіцієнт моменту аеродинамічного опору  $C_M = 0,0277 \cdot \text{Re}^{-0,2} (\delta_T/R)^{0,2}$

де  $\text{Re} = \omega R^2 / \nu_a$  - дискове число Рейнелдца;  $\delta_T$  - торцевий зазор між маховиком і кожухом;  $\gamma_a, \nu_a$  - щільність і кінематична в'язкість середовища, що оточує обертовий маховик.

Відомі також емпіричні форми [9] для розрахунку потужності втрат на аеродинамічне тертя

$$P_{TF} = 2\pi n M_{TA}, \quad (3.8)$$

де  $M = k_a 10^{-3} \xi p_*^2 [1 + \lambda(4 + y)] D^{4+y} n^{1+z}$ ;  $p_* = p / p_0$  - відносний тиск середовища;  $p_0$  - нормальний атмосферний тиск,  $\xi = 0,8$  при наявності кожуха,  $\xi = 1,0$  при відсутності кожуха;  $\lambda = L / D$ .

Для повітряного середовища  $k_a = 10,6$ ;  $y = 0,4$ ;  $z = 0,7$ ;

для водневого середовища  $k_a = 1,696$ ;  $y = 0$ ;  $z = 0,5$ ;

для гелієвого середовища  $k_a = 3,54$ ;  $y = 0,4$ ;  $z = 0,5$ ;

Для високошвидкісних маховиків згідно [8] аеродинамічні втрати на тертя об навколишнє середовище становлять до 85 % загальних механічних втрат, тому для їхнього зменшення маховики поміщають у гермітизованих кожухи, які заповнюють газами зі зниженою щільністю (водень, гелій) або вакуумують.

Вакуумування щільністю усуває аеродинамічні втрати, однак погіршує теплові режими й приводить до ряду технологічних, конструкційних і експлуатаційних труднощів.

Заповнення кожухів воднем і гелієм пов'язане з рядом утруднень. Обмеженням по застосуванню водню є його вибухонебезпечність, висока плинність і хімічна активність. В окремих випадках недоцільно застосовувати й чистий гелій через його низьку електричну міцність, приблизно в 2 рази меншої, чим у водню, і в 3 рази - чим у повітря.

У тих випадках, коли маховики обертаються в обмежених кожухом обсягах, аеродинамічний момент залежить від зазору  $\Delta_k$  між маховиком і корпусом. При оптимальних зазорах  $\Delta_k / D = 0,01 \dots 0,05$  аеродинамічний момент мінімальний і швидкість газового потоку між двома обмеженими шарами приблизно дорівнює половині швидкості обертання маховика. При цьому аеродинамічний момент маховика, що працює в повітрі, зменшується в порівнянні з випадком обертання в необмеженому просторі в 1,8...2,2 рази

(більші значення ставляться до більших чисел Рейнольдса), а для водню або гелію це зменшення становить 1,4...1,6.

Вибір тиску робітничого середовища, що заповнює кожух, виробляється звичайно з умови максимального вирівнювання теплового поля по обсязі всього вузла. Практично для маховиків з окружною швидкістю 250...300 м/с при застосуванні гелію приймають тиск рівним 50...30 мм рт. ст., при застосуванні водню 150...80 мм рт. ст. При більших швидкостях бажане приміщення маховика у вакуум (форвакуум).

Передача механічної потужності маховиків здійснюється через безступінчасту передачу на вали електричних генераторів, що сполучено із втратами потужності відповідно у фрикційній муфті й редукторі.

Електричні генератори перетворюють підводиму до них механічну потужність  $P_{MEX}$  в електричну  $P_G$ , підводиму до тягових двигунів електровоза. При цьому

$$P_{MEX} - \sum_{i=1}^n P_i = P_G, \quad (3.9)$$

де  $\sum_{i=1}^n P_i = P_B + P_{MEX} + P_{MG} + P_E + P_{ДОБ}$  - сума втрат у генераторах.

З огляду на функціональну послідовність у передачі енергії по елементах модуля в режимі розряду, ККД визначається залежністю

$$\eta_{разр} = \eta_M \eta_{МП} \eta_G \eta_D, \quad (3.10)$$

де  $\eta_M$  - ККД маховика;  $\eta_{МП}$  - ККД механічної передачі;  $\eta_G$  - ККД генератора;  $\eta_D$  - ККД тягових двигунів.

Перспективи багатоцільового використання накопичувача кінетичної енергії визначаються широким діапазоном зміни його розрядної потужності. Звідси впливає завдання зниження втрат потужності в режимі розряду модуля при значному різноманітті технологічних циклів його роботи й оптимізації його характеристик.

## **4 АНАЛІЗ СПОСОБІВ РОЗРЯДУ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ І ВИБІР ОПТИМАЛЬНОГО З ПОЗИЦІЙ ЗМЕНШЕННЯ ВТРАТ ЕНЕРГІЇ**

### **4.1 Схеми розряду ємнісного накопичувача електричної енергії**

У загальному випадку розрядний пристрій повинен забезпечувати видачу енергії, накопиченої блоком конденсаторів, з необхідними споживачеві цієї потужності інтенсивністю (тобто потужністю), струмом і напругою.

Складність полягає в тому, що розряд конденсатора і зменшення запасеної в ньому енергії супроводжується зменшенням напруги, що, у свою чергу, приводить до зміни режиму розряду на дане навантаження.

Одним з основних завдань установки накопичувального блоку є вирівнювання графіка навантаження безконтактного шахтного електровоза з метою підвищення ефективності передачі електроенергії на пересувний електровоз. Вирівнювання графіка навантаження передбачає відбір недоспоживаної двигунами потужності у даний момент часу до найбільш ефективного з точки зору передачі на енергоприймач значення, і довідачі у навантаження (тобто на двигуни) потужності, що перевищує найбільш ефективне значення.

Підключати розрядний пристрій з боку змінного струму немає необхідності. Споживачі енергії накопичувача – двигуни, а вони розташовані з боку випрямленої напруги.

Таким чином, завдання розрядного пристрою – підвищити напругу блоку конденсаторів, що розряджається, і, варіюючи ним, управляти балансом струмів випрямляча і блоку так, щоб струм випрямляча не перевищував оптимального значення з точки зору ефективності передачі енергії електровозу.

Один із способів досягти результату – перетворити постійну напругу блоку конденсаторів у змінну (інвертором), підвищити трансформатором і випрямити (випрямлячем). Регулювати розрядний процес можна або

інвертором, або випрямлячем. Але така схема має свої недоліки. Один з них – зниження ефективності використання накопичувального блоку в зв'язку із збільшенням втрат енергії в інверторі, трансформаторі, випрямлячі. Крім того, інвертор і випрямляч достатньо складні пристрої і надійність роботи накопичувального блоку знижується.

Інший спосіб – ключові схеми з дозуючими елементами: конденсатором або (і) індуктивністю. Використання схеми з дозуючим конденсатором (рис. 2.4,а) при роботі на розряд (ключ К2 замикається, заряджається  $C_d$  від  $C_n$ , К2 розмикається, замикається К1) не дозволяє використовувати накопичувальний блок для вирівнювання графіка навантаження, оскільки напруга випрямляча, до виводів якого приєднані двигуни і виводи розрядного пристрою, буде завжди більша або рівна напрузі на дозуючому конденсаторі. І окрім зворотного заряду накопичувального блоку нічого не відбудеться.

Схема з дозуючим реактором (рис. 2.4,б) дозволяє здійснити видачу енергії з накопичувального блоку в навантаження. Для цього досить поміняти ключ К1 і діод VD (не міняючи напрямку замикання). У цьому випадку, коли ключ К1 відкривається, через котушку починає протікати струм. Сягнувши певного значення струму, ключ К1 закривається і котушка розряджається на зовнішній ланцюг.

Схема має ті ж переваги, що і схема, вибрана в якості бази зарядного пристрою у главі 2. Одна з незаперечних переваг даної схеми – при побудові зарядно-розрядного пристрою на базі зарядного, вибраного в главі 2, і розрядного, описаного вище, можуть бути використані одні й ті ж елементи. Це, у свою чергу, веде до зменшення габаритів маси і вартості усього ємнісного накопичувача. Схема може бути вибрана як основний розрядний ланцюг, оптимальний з позиції зменшення втрат енергії зарядного пристрою, який забезпечує досягнення цілей, що передбачаються установкою накопичувального блоку конденсаторів на локомотив безконтактного електровоза.

## **5 ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ ТА СПОСОБІВ ВКЛЮЧЕННЯ КІНЕТИЧНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СХЕМІ ЕЛЕКТРОВОЗУ**

### **5.1 Кінетичний накопичувач електричної енергії з індуктивною електричною машиною**

У статті [10] запропоновано в якості генератора в кінетичному накопичувачі енергії використати обернену індуктивну машину, причому ротор такої машини, який розміщено зовні статора, виконує роль маховика накопичувача. Індукторні генератори забезпечують безконтактність збудження, прості за конструкцією та надійні в роботі. Можливе використання індуктивної машини і в якості двигуна. Результати експериментальних досліджень безконтактного синхронного двигуна індукторного типу наведено в [11]. Результати позитивні, але для забезпечення пуску при живленні двигуна від звичайної трифазної мережі необхідна пускова обмотка з мідних стрижнів, що ускладнює конструкцію. Авторами статті [12] зроблено висновок, що найбільш раціональним є використання індукторної машини як двигуна для розкручування маховика накопичувача, так і в якості електричного генератора при використанні накопиченої механічної енергії. При цьому треба мати інвертор, який забезпечить частотно-струмове керування електричною машиною під час розкручування маховика і в режимі чергування, а також випрямлення змінного струму в режимі розрядження накопичувача. Однак мінімальну масу індукторної машини можливо забезпечити тільки при кількості пар полюсів  $p \geq 10$ , що призводить до збільшення втрат потужності в сталі. Крім того, в таких машинах – низький рівень використання магнітного потоку в зубцевій зоні. В [14] запропоновано збільшити рівень використання магнітного потоку в індукторних машинах шляхом розміщення в пазах ротора постійних магнітів, орієнтованих і намагнічених таким чином, що магнітний потік між зубцями ротора змінює напрям на протилежний відносно потоку зубців. При цьому основна гармонійна складова



результуючого магнітного потоку збудження, створеного спільною дією струму обмотки збудження і постійними магнітами, збільшується, стала складова зменшується, що в цілому призводить до збільшення рівня використання магнітного потоку. Як наслідок, покращуються масогабаритні показники або збільшується потужність машини в тих же габаритах.

Найбільш досконалою серед відомих конструкцій є генератор змінного струму [15] індукторного типу, в якому ротор розміщено зовні статора, а в пазах ротора закріплено постійні магніти з радіальною намагніченістю. Обмотка збудження розташована поміж пакетів статора і є нерухомою. Вказаний генератор при відповідному живленні і деякому дооснащенні можна використати як вентиляльний двигун для розкручування маховика накопичувача. Розміщення ротора зовні статора дозволить механічно сполучити ротор безпосередньо з маховиком, що спростить конструкцію накопичувача.

На основі [15] розроблено конструкцію кінетичного накопичувача електричної енергії з метою використання його на безконтактному електровозі, схематично показано на рис. 5.1.

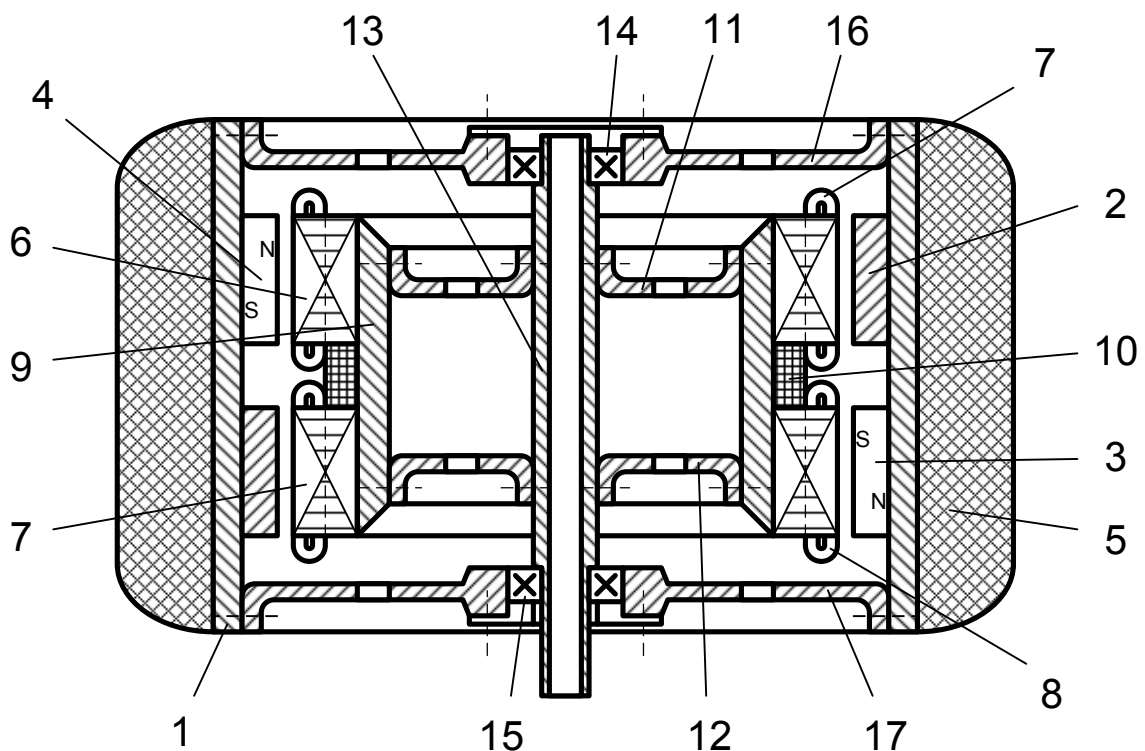


Рисунок 5.1 - Конструктивна схема кінетичного накопичувача енергії

Ротор індуктивної машини накопичувача має суцільний корпус 1 і магнітом'якої сталі, на внутрішній поверхні якого закріплено по колу суцільні полюси 2 з фериту та постійні магніти 3 і 4. Полюси і магніти чергуються між собою і розміщені таким чином, що створюють два кільця, взаємно зсунутих в осьовому напрямку. Причому, в кільцях, по твірним, проти суцільних полюсів одного кільця розташовано магніти другого і навпаки. Магніти 3 і 4 намагнічено в радіальному напрямку, при цьому в одному кільці всі магніти мають однакову, наприклад, "південну" намагніченість на поверхні, оберненій до статора, в іншому – "північну". На зовнішній поверхні корпусу 1 закріплено маховик 5 у вигляді суцільного циліндра обтічної форми у поперечному перерізі.

Статор індукторної машини зроблено з двох зубчастих кільцевих пакетів 6 і 7, набраних з ізолюваних пластин електротехнічної сталі. У пази статора, що співпадають в осьовому напрямі, вмонтовано дві однакові трифазні обмотки 7 і 8. Кільцеві пакети 6 і 7 напресовані на втулку 9 у вигляді цільного циліндра з магнітом'якої сталі. Зовні втулки між пакетами 6 і 7 закріплено нерухому кільцеву обмотку збудження 10. Втулка опирається на диски 11, 12 П-подібної форми в поперечному перерізі. З протилежної їх сторони диски закріплено на порожнистому нерухомому валу 13 з радіальним отвором для вивідних проводів обмоток статора і збудження. Вал 13 зроблено порожнистим для забезпечення можливості приєднання вказаних вивідних проводів до зовнішніх електричних ланцюгів.

На кінцях порожнистого валу зовні встановлено підшипники 14 і 15, на які опираються боковини 16 і 17 у вигляді дисків з отворами в їх середніх за розміром частинах. На зовнішньому радіусі диски у поперечному перерізі мають Г-подібну форму, що дозволяє сполучити їх з корпусом 1 по внутрішній поверхні обох його країв.

Пакети статора і полюси ротора розділені повітряним проміжком таким же за розміром, як і постійні магніти з вказаними пакетами.

Трифазні обмотки 7 і 8 є незалежними і ввімкнені кожна за схемою "зірка". Кожна з них може діяти як самостійно, так і спільно, наприклад, паралельно. З метою зменшення вильоту лобових частин обмоток статора вони зроблені зубцевими, тобто на кожному з зубців пакетів 6 і 7 розміщено по одній котушці. При цьому число зубців ротора (полюсів + магнітів) вибрано рівним 16 ( $Z_2=16$ ), число зубців статора  $Z_1=Z_2+k$ , де  $k$  – ціле число, не кратне трьом. У нашому випадку  $k=2$  і  $Z_1=16+2=18$ . Виходячи з вищеведеного, число пар полюсів  $p=8$ , що дозволить краще використати позитивні властивості індукторної машини. Максимальне значення частоти обертання маховика приймемо:  $n_{\max}=3000$  об/хв. Тоді гранична частота струму живлення індукторної машини як двигуна повинна бути:

$$f_{\max} = \frac{pn_{\max}}{60} = \frac{8 \cdot 3000}{60} = 400 \text{ Гц}.$$

Такою ж буде і гранична частота електрорушійної сили (ЕРС) індукторного генератора.

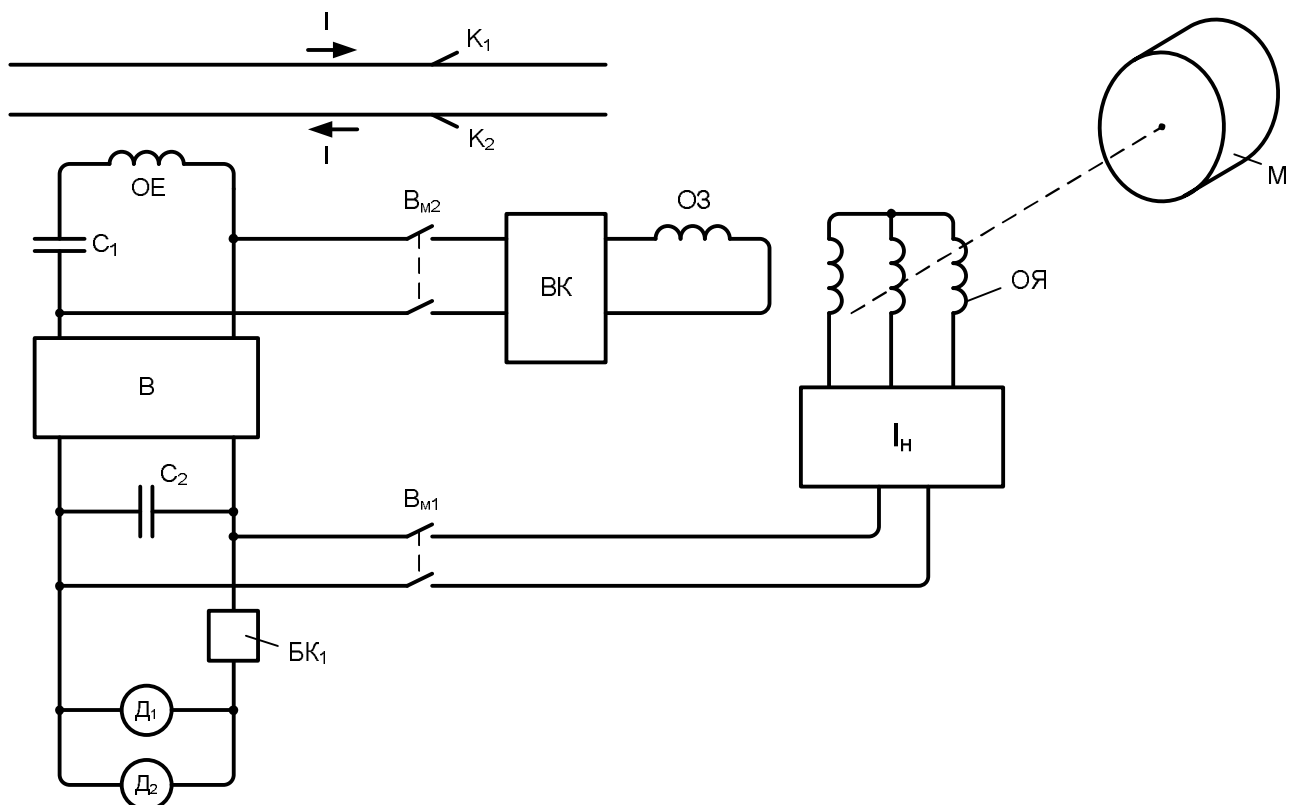


Рисунок 5.2 - Принципова схема електричних кіл накопичувача

На рис. 5.2 показано електричну схему накопичувача. В робочому режимі магнітний потік струму  $I$ , який протікає в кабелях  $K_1$  і  $K_2$  тягової мережі, наводить ЕРС в обмотці енергоприймача ОЕ, встановленого на електровозі. Випрямляч В забезпечує живлення постійним струмом тягові двигуни  $D_1$  і  $D_2$  за допомогою блоку керування БК, а також при потребі – інвертора  $I_n$  в його звичайному режимі роботи.

На початку роботи електровоза розкручують маховик М за допомогою індукторної машини в режимі двигуна. Для цього при неробочому ході двигунів вмикають вимикачі  $V_{m1}$  і  $V_{m2}$ , що забезпечує живлення керованим постійним струмом обмотки збудження ОЗ (за допомогою керованого випрямляча ВК) і змінним трифазним струмом обмотки якоря ОЯ машини (за допомогою інвертора  $I_n$ ). Розкручений маховик у робочому режимі електровоза виконує функцію резервного джерела електроживлення, що використовується в складних або аварійних умовах експлуатації. Наприклад, при відсутності живлення тягової мережі приєднують ОЗ до акумулятора (на рис. 5.2 не показано), вмикають  $V_{m1}$  і через БК – двигуни  $D_1$  і  $D_2$ . Електрична машина переходить в режим генератора, трифазна ЕРС його обмоток через інвертор  $I_n$ , який тепер виконує функцію випрямляча, забезпечує на деякий час живлення тягових двигунів електровоза. При цьому забезпечують відповідне регулювання струму збудження індукторної машини.

При гальмуванні електровоза тягових двигуни переходять в генераторний режим роботи. Генерована ними стала ЕРС за допомогою інвертора  $I_n$  перетворюється у змінний струм, що живить обмотку якоря ОЯ. Електрична машина переходить в режим двигуна і забезпечує розкручування маховика М. Інтенсивність гальмування регулюють як струмом збудження двигунів  $D_1$  і  $D_2$ , так і струмом в обмотці ОЗ.

Отже, пропонований кінетичний накопичувач енергії має просту конструкцію і нескладну електричну схему.

## 5.2 Кінетичний накопичувач енергії з асинхронною електричною машиною

Асинхронні електричні машини, як відомо, мають проектну конструкцію і відзначаються надійністю в роботі, особливо машини з короткозамкненим ротором. Але при роботі в режимі генератора необхідно вмикати в коло обмотки статора конденсатори значної ємності та забезпечити регулювання вихідної напруги, що є складним і вимагає значних витрат. Пропонується використання асинхронної машини з фазовим ротором в режимі двигуна при розкручуванні маховика як вентильного або в синхронному режимі, а при відборі накопиченої маховиком кінетичної енергії – як синхронного генератора з незалежним безконтактним збудженням. На рис. 5.3 зображено електричну схему ввімкнення асинхронної машини в мережі електропостачання тягових двигунів безконтактного електровоза.

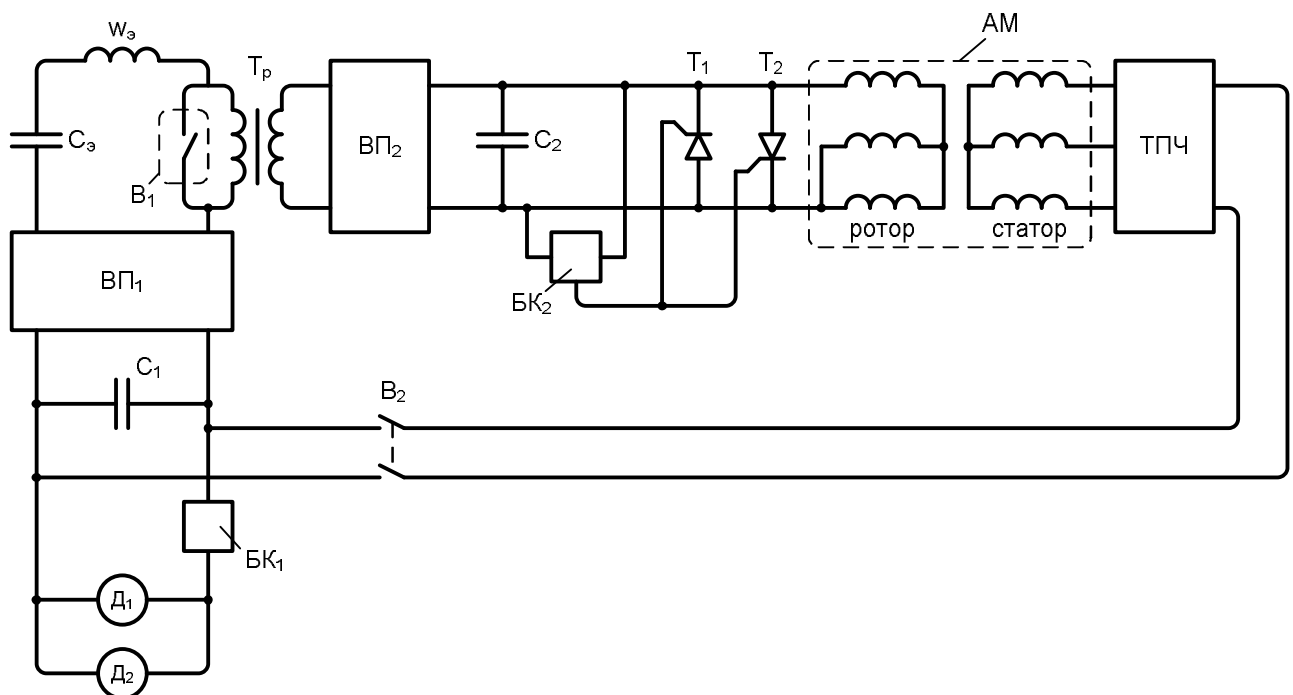


Рисунок 5.3 - Електрична схема живлення асинхронного двигуна в режимі розкручування кінетичного накопичувача енергії

На електровозі встановлено маховик з вертикальною віссю обертання, вихідний кінець валу якого сполучено з валом асинхронної машини з фазовим ротором (на рис. позначено її обмотки як АМ). Обмотка ротора АМ живиться від вторинної обмотки високочастотного обертового трансформатора Тр. Обмотка рухома і вмонтована в осердя з фериту, що встановлене на вільному кінці валу АМ зовні підшипникового щита. Первинна обмотка трансформатора Тр нерухома, вмонтована в другу частину згаданого осердя та ввімкнена послідовно з обмоткою енергоприймача  $\omega_e$  електровоза. Первинну обмотку Тр шунтовано електричним ланцюгом з увімкненим в нього керованим вимикачем В. Останній призначено для керування тривалістю періодів роботи трансформатора Тр і рівня його ефективної вихідної напруги шляхом попереминого ввімкнення та розмикання контактів. Вторинну обмотку Тр увімкнено до входу випрямляча ВП<sub>2</sub>, що разом з конденсатором С<sub>2</sub>, блоком керування БК<sub>2</sub> та керованими тиристорами, розташовано на рухомому валу асинхронної машини АМ.

Конденсатор С<sub>e</sub> забезпечує в обмотці енергоприймача  $\omega_e$  стан резонансу напруг. Випрямляч ВП через керування БК забезпечує живлення постійним струмом тягових двигунів Д<sub>1</sub> і Д<sub>2</sub> електровоза. Обмотка статора асинхронної машини живиться від тиристорного перетворювача частоти ТПЧ, що забезпечує частотно-струмове керування АМ при розкручуванні маховика в режимі чергування, а також випрямлення змінного струму в періоди використання кінетичної енергії маховика. В свою чергу ТПЧ має можливість живитися від випрямляча ВП<sub>1</sub>, використовуючи при цьому енергію, що надходить на електровоз через високочастотні тягові лінії або енергію гальмування електровоза за допомогою тягових двигунів Д<sub>1</sub> і Д<sub>2</sub>, які переводять у режим роботи генераторів.

Опишемо роботу схеми рис. 5.3 більш докладно.

У звичайному робочому режимі електровоза вимикач В<sub>1</sub> замкнено, вимикач В<sub>2</sub> розімкнено. Енергія тягової лінії надходить до обмотки енергоприймача електровоза і далі через випрямляч ВП<sub>1</sub> до тягових двигунів

$D_1$  і  $D_2$ . Початкове розкручування маховика за допомогою асинхронної машини АМ в режимі роботи двигуна бажано робити при неробочому ході електровоза, наприклад, на зупинках. При цьому розмикають вимикач  $B_1$  і замикають вимикач  $B_2$ . Обмотка статора АМ отримує живлення трифазним змінним струмом регульованої частоти від ТПЧ. Трансформатор  $Tr$  вступає в роботу і живить високочастотним струмом випрямляч  $ВП_2$ . Вихідна напруга останнього через блок керування  $БК_2$  переводить у закритий стан тиристри  $T_1$  і  $T_2$ , що дає змогу жити постійним струмом від  $ВП_2$  обмотки ротора АМ. Причому вказані обмотки ввімкнено таким чином, що вони створюють магнітний потік збудження синусоїдної форми з визначеним числом пар полюсів (бажано забезпечити  $p = 2-4$ ). Таким чином, асинхронна машина при розкручуванні маховика працює як вентильний двигун, що забезпечує значні пусковий та обертовий моменти.

У черговому режимі роботи кінетичного накопичувача й енергії асинхронну машину вводять в режим асинхронного двигуна, для чого замикають вимикач  $B_1$ . Трансформатор  $Tr$  виводиться з роботи, тому що закорочується його первинна обмотка. Після цього зникає напруга на виході випрямляча  $ВП_2$  і, відповідно, блоку керування  $БК_2$ . Тиристри  $T_1$  і  $T_2$  переходять у відкритий стан, що робить обмотку ротора АМ короткозамкненою і забезпечує економний режим роботи АМ.

Для використання енергії, накопиченої маховиком, розмикають вимикач  $B_1$  і замикають вимикач  $B_2$ . У першому випадку забезпечують живлення постійним струмом обмотки ротора в однофазному ввімкненні (при наявності струму живлення тягової лінії), у другому – забезпечують живлення постійним струмом від обмотки статора АМ (за допомогою ТПЧ в режимі випрямляча) тягових двигунів  $D_1$  і  $D_2$  електровоза. Асинхронна машина працює у цьому випадку як синхронний генератор. При відсутності струму в тяговій мережі живлення обмотки ротора АМ в однофазному ввімкненні забезпечують від акумуляторів електровоза безпосередньо або за потребою (за допомогою відповідних перетворювачів).

Розроблено спосіб використання кінетичного накопичувача енергії, встановленого на безконтактному електровозі, і відповідну електричну схему, що дозволять раціонально використати енергію гальмування електровоза, забезпечити стале навантаження тягової лінії та мати на електровозі достатній запас енергії.

### 5.3 Удосконалення конструкції маховика кінетичного накопичувача енергії

А. Відомо, що кінетична енергія маховика, розкрученого до кутової швидкості  $\Omega$ , визначається формулою:

$$A_e = J \frac{\Omega^2}{2}, \quad (5.1)$$

де  $J$  – сумарний момент інерції обертових частин накопичувача.

При допустимому значенні  $\Omega$  рівень  $A_e$  залежить прямо пропорційно  $J$ , тобто бажано забезпечити момент інерції якнайбільшим. З іншого боку тривалість розкручування маховика до швидкості  $\Omega$ :

$$t = J \int_0^{\Omega_0} \frac{d\Omega}{M_g - M_c}, \quad (5.2)$$

де  $M_g$ ,  $M_c$  – відповідно обертовий момент двигуна і момент статичного опору накопичувача. По відношенню до  $M_g$  запис виразу (5.2) буде таким:

$$M_g = J \frac{d\Omega}{dt} + M_c. \quad (5.3)$$

Зі співвідношень (5.2) і (5.3) впливає, що для зменшення тривалості розкручування при заданому  $M_g$  і моменті (і потужності) двигуна, що



розкручує маховик, необхідно обмежити розмір моменту інерції накопичувача хоча б у початковий момент пуску.

**Б.** Відомо декілька конструктивних рішень відносно маховиків у цьому напрямі, зокрема маховиків, що мають змінний момент інерції. Так, у [17] запропоновано маховик зі змінним моментом інерції з вертикальною віссю обертання у складі диска с порожниною по периферії для робочої рідини, яку зроблено у виді концентрично розміщених секцій, об'єм яких зменшується по радіусу порожнини, причому на зовнішній поверхні стінки кожної з секцій закріплено шар пружнодеформовного матеріалу, та конічних камер з робочою рідиною для кожної секції, діаметр основи яких зроблено меншим внутрішнього діаметра порожнини. Секції і конічні камери розділені перегородками на відсіки у вигляді секторів, причому кожна з камер сполучена через отвір з відповідною секцією.

На початку обертання маховика робоча рідина знаходиться в конічних камерах. Момент інерції маховика при цьому – мінімальний. При збільшенні кутової швидкості рідина з камер перетікає у секції, збільшуючи момент інерції маховика. При подальшому збільшенні кутової швидкості тиск рідини на стінки секцій збільшується і пружний шар на них деформується, що збільшує об'єм секцій і кількість рідини в них. При цьому зростає момент інерції маховика. Недоліком вказаного маховика є складність конструкції, зумовлена його багатоелементністю.

В роботі [17] запропоновано оригінальну конструкцію маховика змінного моменту інерції в складі порожнистої камери у вигляді зрізаного конуса, частково заповненої феромагнітною рідиною, та закріпленого на меншій основі конуса постійного магніту, намагніченого по діаметру основи. Камеру з протилежних боків оснащено двома відрізками валу, встановленого у підшипники.

У початковий момент, коли кутова швидкість маховика дорівнює нулю, феромагнітна рідина під дією магнітних сил знаходиться біля поверхні

постійного магніту, тобто біля меншої основи конічної камери, При цьому момент інерції маховика – мінімальний, що полегшує його розкручування.

При обертанні маховика феромагнітна рідина під дією відцентрових сил, перевищуючих магнітні, прямує до більшої основи конічної камери, що збільшує момент інерції маховика і накопичену ним енергію. При зменшенні кутової швидкості, коли магнітні сили, що діють на рідину, стануть більшими відцентрових, рідина знову буде притягнена до поверхні магніту.

Недоліками зазначеного маховика є: 1) значний дисбаланс у початковий період роботи; 2) низька ефективність, зумовлена формою і напрямом намагнічування постійного магніту та відносно малим активноюдіючим об'ємом феромагнітної рідини.

**В.** Зважаючи на недоліки наведених вище маховиків, запропоновано нову конструкцію маховика з вертикальною віссю обертання, що має у своєму складі порожнисту камеру 1, частково заповнену феромагнітною рідиною 2. Камера 1 у поперечному перерізі має овальну форму, а корпус її зроблено з немагнітного матеріалу. Верхню сторону камери виконано з вмонтованими пружними кільцевими гофрами 3, що дають можливість змінювати положення камери при її розкручуванні від похилого (відносно рівня постійного магніту) до горизонтального (при номінальній частоті обертання). Довжину гофрів (у розігнутому стані) вибрано за умови рівностей ширини нижньої і верхньої сторін камери у випадку розкрученого маховика (рис. 5.4, 5.5).

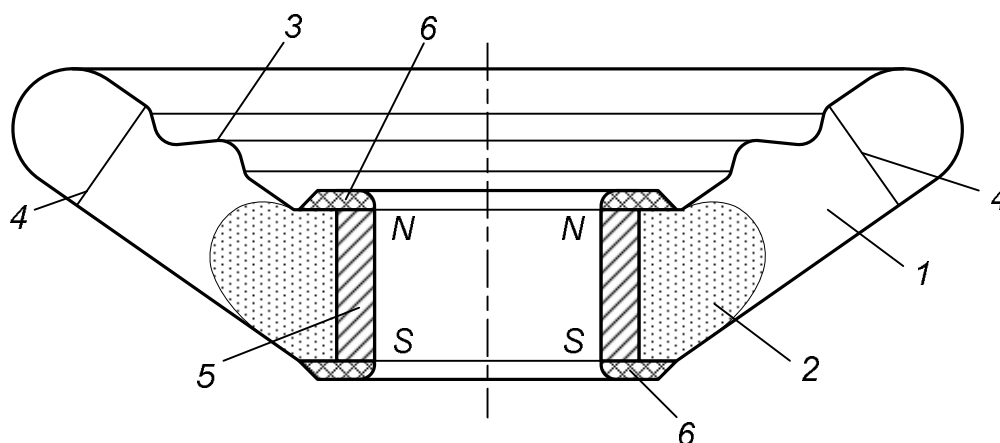


Рисунок 5.4 - Поперечний переріз маховика в неробочому стані

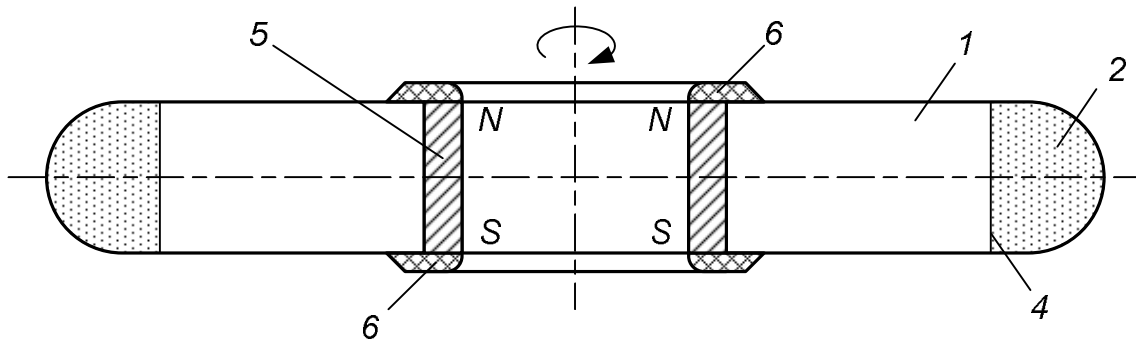


Рисунок 5.5 - Поперечний переріз розкрученого маховика

Всередині камери по її периферії і на однаковій відстані одна від одної встановлено перегородки 4. Довжину перегородок у радіальному напрямі зроблено такою, що їх внутрішні торці не дістають до рівня феромагнітної рідини в нерухомому стані маховика (рис. 5.4). Корпус камери 1 та перегородки 4 виконано з податливого деформуванням матеріалу.

До складу маховика також входить постійний магніт 5, який виконано у вигляді порожнистого циліндра, намагніченого по твірній (рис. 5.4, 5.5). До зовнішньої поверхні циліндра прикріплено внутрішню сторону камери 1. На верхньому і нижньому торцях магніту 5 закріплено (як варіант, за допомогою клею) кільцеві полюсні наконечники 6, виготовлені з магнітом'якого матеріалу і орієнтовані в радіальному напрямі у бік камери 1. Зовнішню поверхню полюсних наконечників виконано обтічною.

Маховик зі змінним моментом інерції працює таким чином. У початковий момент часу, коли маховик нерухомий, відцентровані сили не діють на камеру 1 і на феромагнітну рідину 2 в ній. При цьому гофри 3 знаходяться у зігнутому стані, що змушує до підняття периферію камери 1 відносно рівня постійного магніту 5. Феромагнітна рідина 2 під дією сили тяжіння збирається біля зовнішньої поверхні постійного магніту 5 і притягується до неї. Полюсні наконечники 6 збільшують розмір магнітних сил, що діють на рідину. Момент інерції маховика у цьому випадку буде мінімальним, що полегшує його розкручування.

При обертанні маховика феромагнітна рідина 2 під дією відцентрових сил, перевищуючих магнітні, прямує до периферії камери 1, де за допомогою перегородок 4 утягується в рух камери, що збільшує момент інерції маховика. Під дією відцентрованих сил пружні гофри 3 розрівнюються і при номінальній частоті обертання маховика камера 1 переходить з похилого у горизонтальне положення (рис. 5.4, 5.5). При цьому збільшується відстань центра мас периферії камери з феромагнітною рідиною від осі обертання, що додатково збільшує момент інерції маховика.

При зменшенні частоти обертання маховика гофри, під дією сил пружності, поступово переходять у зігнутий стан, що забезпечує підняття периферії камери 1 відносно рівня постійного магніту 5 і стікання рідини в зону дії магнітних сил, які затримують останню у просторі між полюсними наконечниками 6 біля зовнішньої поверхні магніту.

Виконання порожнистої камери овальною в поперечному перерізі та постійного магніту у вигляді порожнистого циліндра, намагніченого по твірній і з кільцевими полюсними наконечниками, дозволить збільшити об'єм ефективно діючої феромагнітної рідини і, як наслідок, розмір накопичуваної маховиком механічної енергії.

Введення пружних кільцевих гофр, вмонтованих у верхню сторону порожнистої камери, забезпечить стікання феромагнітної рідини в зону її притягання постійним магнітом при зменшенні частоти обертання маховика та збільшення моменту інерції маховика в номінальному режимі роботи.

Встановлення перегород всередині порожнистої камери по її периферії прискорить введення в дію феромагнітної рідини при розкручуванні та кількість віддаваної нею енергії при гальмуванні маховика.

Г. Маховики, заповнені повністю або частково рідиною або руховими кулями, забезпечують при пуску мінімальний момент інерції і завдяки цьому – швидке розкручування. Однак при відборі механічної енергії від таких маховиків виникає проблема інтенсивності такого процесу, тому

що при гальмуванні оболонки маховика рідина в ній рухається по інерції майже з попередньою швидкістю, що зменшує загальний момент інерції і кількість віддаваної енергії в даний період. Для усунення вказаного недоліку в роботі [19] запропоновано конструкцію маховика зі змінним моментом інерції у складі внутрішнього та зовнішнього ободів, які створюють циліндричну камеру, заповнену рідиною. В камері розміщено вигнуті у рівень із зовнішньою поверхнею внутрішнього ободу лопаті, які одним кінцем закріплені на ньому, підпружинені до нього і симетрично розміщені між собою. У внутрішньому ободі зроблено канали, що виходять під внутрішні поверхні сусідніх лопатей.

При відборі потужності від маховика і його гальмуванні одна з лопатей механічно звільнюється від попереднього стану і відтискується зустрічним потоком рідини до зовнішнього ободу. При цьому рідина, потрапляючи у відповідні канали, почергово відтискує решту лопатей. Гальмівний момент маховика збільшується і, відповідно, зростає потужність, що передається робочому механізму. При розкручуванні маховика лопаті притискуються до внутрішнього ободу пружинами.

Недоліками вказаного маховика є складність конструкції, що зумовлена використанням значної кількості механічних деталей, та неможливість керування моментом інерції маховика.

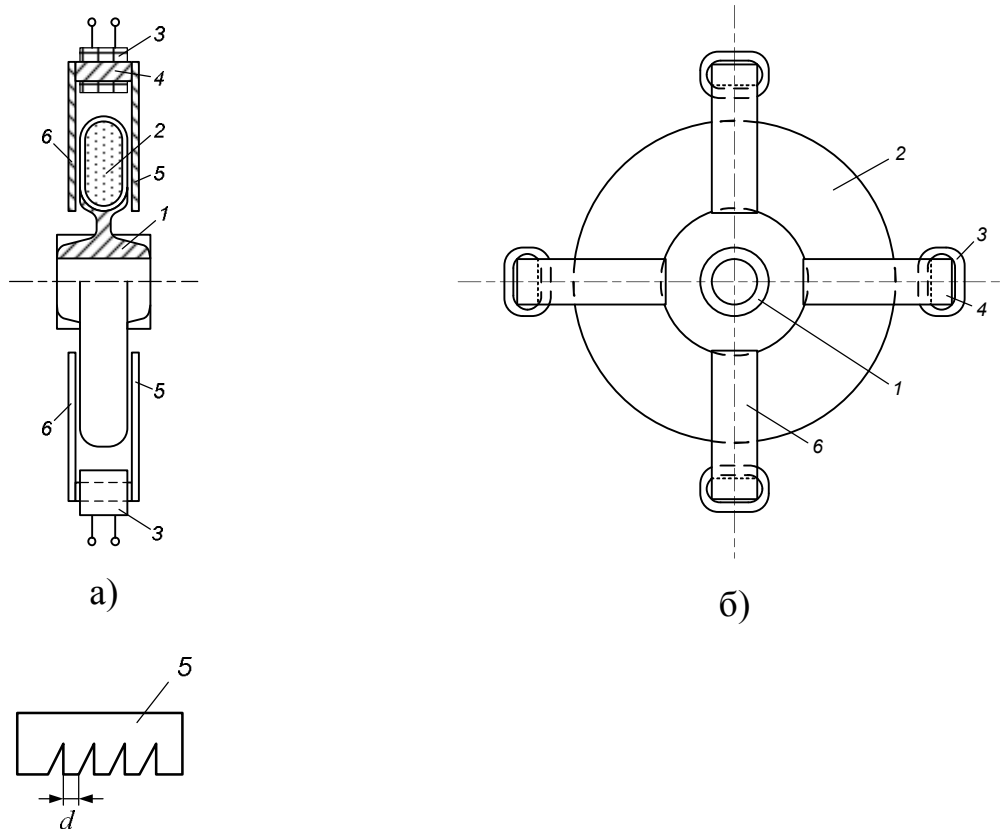
Іншу конструкцію маховика, для розв'язання вказаної проблеми, запропоновано в роботі [20]. Тут маховик має маточину, на якій закріплено порожнистий тороїдний обід. Порожнину ободу заповнено мастильною рідиною та контактувальними один з одним і з ободом кулями, зробленими з феромагнітного матеріалу. На ободі закріплено охоплюючу його котушку у вигляді соленоїда, яку сполучено з джерелом електричного струму.

При наявності струму в котушці соленоїду внаслідок взаємодії намагнічених магнітним полем куль їх обертання стає неможливим. В результаті цього змінюється характер відносного руху куль і ободу, що приводить до зміни (збільшення) моменту інерції маховика. Таким чином,

регулюючи розмір струму в обмотці соленоїду, маємо можливість змінювати момент інерції маховика.

Недоліками зазначеного маховика є: 1) складність конструкції, викликана необхідністю розміщення котушки на обертовому ободі; 2) низька надійність роботи через можливе затискання куль при деформації ободу відцентрованими силами.

З метою усунення недоліків, описаних вище маховиків, розроблено конструкцію пристрою зі змінним і керованим моментом інерції маховика. До складу пристрою входить маточина 1 з горизонтальною віссю обертання, на якій закріплено порожнистий обід 2 з овальним поперечним перерізом, причому більшу вісь овалу орієнтовано в радіальному напрямі (рис. 5.6, а, б). Порожнина ободу повністю заповнена феромагнітною рідиною. Зовні ободу 2 і через однакові проміжки по колу розміщено нерухомо не менше двох котушок 3 на осердях 4 з прямокутним поперечним перерізом (на рис. 5.6, б, як варіант, показано чотири котушки). Котушки 3 приєднано до керованого джерела струму (на рис. 5.6 не показано).



в)

- а) поперечний переріз пристрою;
- б) вид пристрою збоку;
- в) поперечний переріз полюсного наконечника

Рисунок 5.6 - Пристрій зі змінним і керованим моментом інерції маховика

До торців осердь прикріплено полюсні наконечники 5 і 6 таким чином, що вони охоплюють (з відповідним повітряним проміжком) обід 2 з протилежних по його товщині сторін. Довжину полюсних наконечників зроблено не меншою за ширину ободу 2 (рис. 5.6, б). З внутрішньої сторони (з боку ободу) полюсні наконечники 5 і 6 зроблено зубчастими, причому зубці орієнтовано по ширині ободу і зроблено зі зрізаними вершинами, шириною площадки  $d$  (рис. 5.6, б, в). Значення  $d$  повинно бути не меншим визначеного за формулою, а саме:

$$d \geq 31,4Rn\tau ,$$

де  $R$  – зовнішній радіус ободу, м;  $n$  – частота обертання маточини, об/с;  $\tau$  – стала часу феромагнітної рідини, с. Так, при використанні феромагнітної рідини з  $\tau = 2 \cdot 10^{-5}$  с і при  $n = 50$  об/с,  $R = 0,5$  м, маємо  $d \geq 1,57$  см.

Пропонований пристрій працює таким чином. Обід 2 разом з маточиною 1 розкручуються при відсутності електричного струму в котушках 3. При цьому в'язкість феромагнітної рідини в ободі мінімальна, що забезпечує мінімальний момент інерції і, як наслідок, мінімальну пускову потужність. Обід 2 при обертанні під дією відцентрованих сил набуває у поперечному перерізі конусоподібну форму, тобто повітряні проміжки між полюсними наконечниками 5, 6 і ободом 2 збільшуються по радіусу з обох сторін ободу, досягаючи максимального значення на його зовнішньому радіусі. При відборі потужності від розкрученого пристрою вмикається і поступово збільшується струм у котушках 3. При цьому, по-перше, в'язкість феромагнітної рідини в ободі між полюсними наконечниками збільшується, по-друге, зростає дія магнітних сил на рідину з притисканням її зсередини до верхньої і нижньої поверхонь ободу, що сповільнює рух рідини відносно

ободу в напрямі від його внутрішнього до зовнішнього радіусів і змушує феромагнітну рідину віддавати свою кінетичну енергію ободу, внаслідок чого збільшується крутильний момент пристрою.

Після вимкнення струму в котушках 3 зникає дія магнітних сил на феромагнітну рідину і відновлюється її попередня в'язкість, що зменшує момент інерції пристрою і забезпечує безпеку при його експлуатації, особливо при раптовій зупинці маточини або ободу.

Розміщення котушок зовні рухомого ободу та використання феромагнітної рідини для його заповнення спростить конструкцію пристрою, збільшить надійність роботи та рівень безпеки при його експлуатації. Збільшення числа котушок та їх рівномірне розміщення по периметру ободу забезпечить врівноваження ободу при його обертанні. Виконання полюсних наконечників зубчастими зі сторони ободу дозволить збільшити дію магнітних сил або зменшити розмір струму, достатнього для гальмування феромагнітної рідини.

Розроблені маховик та пристрій зі змінним моментом інерції дозволять при спрощенні їх конструкцій збільшити ефективність роботи кінетичних накопичувачів енергії.



## 6 ОБГРУНТУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ СХЕМ ТА СПОСОБІВ ВКЛЮЧЕННЯ ТА ВІДКЛЮЧЕННЯ ЄМНІСНОГО НАКОПИЧУВАЧА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СХЕМІ ЕЛЕКТРОВОЗУ

На попередніх етапах дослідження було доведено доцільність використання для зарядження конденсаторного накопичувального блоку, встановленого на електровоз з метою вирівнювання графіка навантаження та збереження рекуперованої енергії зарядного пристрою із дозуючим реактором.

Перший етап роботи накопичувального блока конденсаторів і його зарядного пристрою – етап накопичення. Для зарядного пристрою із дозуючим реактором характерно, що спочатку доза енергії накопичується в котушці індуктивності, а потім передається до конденсаторного блоку. Розглянемо процес заряду індуктивності.

Схему, відповідну цьому процесу, наведено на рис. 6.1. З курсу ТОЕ відомо, що в даному випадку струм через індуктивність  $L$  можна представити в такому вигляді:

$$i_L(t) = i(\infty) + (i(0) - i(\infty)) \cdot e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (6.1)$$

де  $i(\infty) = U_3 / R_3$  – струм усталеної складової після замикання ключа;  $U_3$  – напруга зарядного джерела;  $R_3$  – опір зарядного ланцюга;  $i(0)$  – значення струму при  $t = 0$ ;  $\tau = L / R_3$  – стала часу;  $L$  – дозуюча індуктивність.

Таким чином, струм індуктивності має вигляд:

$$i_L(t) = \frac{U_3}{R_3} + \left( i(0) - \frac{U_3}{R_3} \right) \cdot e^{-t \frac{R_3}{L}}. \quad (6.2)$$

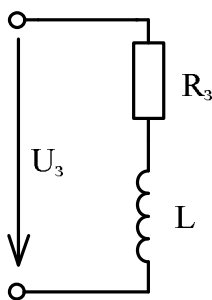


Рисунок 6.1 - Схема, відповідна процесу заряду індуктивності

Розглянемо докладніше існуючі схеми зарядних пристроїв запропонованого типу.

Одна з них – схема з „дзвенячим” дроселем [1]. Принцип її роботи (рис. 6.2) полягає в тому, що коли перемикача замкнено, заряджається індуктивність  $L$ . Потім, коли  $K$  розімкнено, доза енергії з цієї індуктивності передається в конденсаторний накопичувач  $C$ . Варіювання споживаною потужністю може бути здійснено за рахунок змінювання тривалості замикання ключа  $K$ , тобто за рахунок регулювання величини доз енергії, якщо індуктивність достатньо велика, або за рахунок частоти замикання – частоти передавання сталих доз, якщо індуктивність мала.

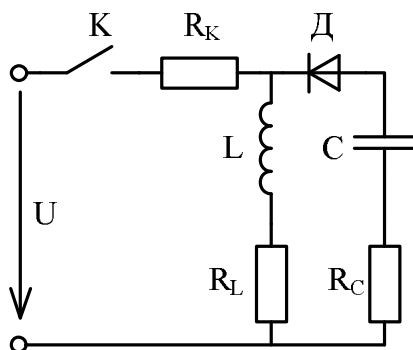
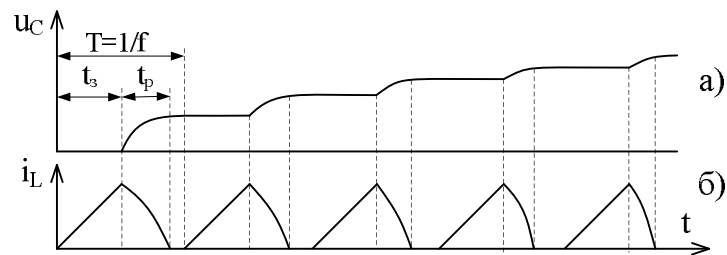


Рисунок 6.2 - Схема з „дзвенячим” дроселем

На рис. 6.3 зображено графіки залежностей від часу напруги на конденсаторі (рис. 6.3, а) та струму індуктивності (рис.6.3, б) впродовж процесу роботи. В схемі, відповідній цій діаграмі, індуктивність, опір, ємність такі, що розряд індуктивності відбувається за коливальним

принципом, тобто індуктивність розряджається повністю до початку наступного періоду.



а) напруги на конденсаторі;

б) струм індуктивності

Рисунок 6.3 - Діаграми напруги та струму схеми з „дзвенячим” дроселем

На рисунку  $t_s$  – час зарядки індуктивності,  $t_p$  – час її розряду,  $T$  – період роботи схеми.

Мостову схему заряду ємнісного накопичувача з двома дозуючими реакторами [1] наведено на рис. 6.4. Принцип її роботи наступний. При надходженні імпульсу до керуючого ланцюга одного з тиристорів, наприклад  $T_1$ , цей тиристор включається і починається процес зарядки дозуючого реактора  $L_1$ . Одночасно через реактор  $L_2$  і тиристор  $T_1$  до напруги джерела живлення заряджається комутуючий конденсатор  $C_k$ . Через певний інтервал часу, що задається частотою блоку управління, керуючий імпульс приходить на тиристор  $T_2$ , що включається, і напруга комутуючого конденсатора  $C_k$  прикладається до тиристора  $T_1$ . Останній вимикається, ланцюг зарядки дозуючого реактора  $L_1$  розривається та він розряджається одночасно на конденсатор  $C_k$  і накопичувальну батарею конденсаторів  $C$ . При цьому конденсатор  $C_k$  перезаряджається, а батарея конденсаторів  $C$  заряджається на величину енергії  $\Delta W$ , накопиченої в дозуючому реакторі  $L_1$ .

Одночасно з розрядом реактора  $L_1$  відбувається процес зарядки дозуючого реактора  $L_2$  від джерела живлення через тиристор  $T_2$ . Через

проміжок часу, який визначається частотою блоку управління, комутуючий конденсатор  $C_k$  при включенні тиристора  $T_1$  замикає тиристор  $T_2$  і ланцюг зарядки реактора  $L_2$  розривається. Процес розрядки дозуючого реактора  $L_2$  через діод  $D_2$  на ємнісний накопичувач  $C$  аналогічний описаному вище процесу розрядки реактора  $L_1$ .

Таким чином, коли перша індуктивність заряджається, інша розряджається. І навпаки: коли друга починає заряджатися, перша розряджається. Періодичність роботи індуктивностей співпадає, але початки періодів зсунуті один від одного.

Діаграми напруги на конденсаторі та струму індуктивностей зображені на рис. 6.5, де  $t_{L1s}$  – час зарядки першої індуктивності,  $t_{L2s}$  – час зарядки другої індуктивності,  $T$  – період роботи схеми.

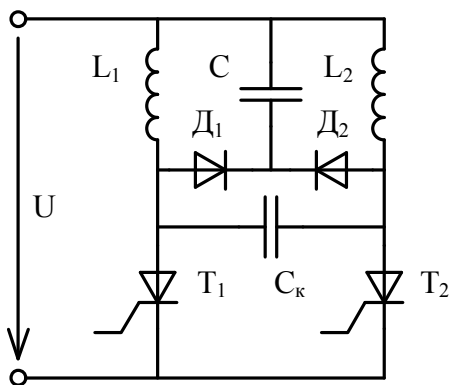
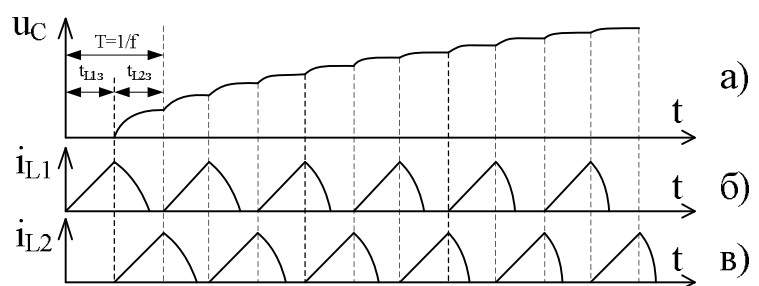


Рисунок 6.4 - Мостова схема заряду ємнісного накопичувача з двома дозуючими реакторами



а) напруги на конденсаторі;  
б,в) струм індуктивності

Рисунок 6.5 - Діаграми напруги та струму відповідні мостовій схемі

Визначимо такі параметри порівнюваних схем, як середній струм, максимальний струм, коефіцієнт пульсацій, середня потужність, споживана котушкою.

Розглянемо схему з „дзвенячим” дроселем.

Запишемо рівняння струму котушки під час її зарядки за нульових початкових умов ( $I_0 = 0$ ):

$$i(t) = \frac{U_3}{R_3} \left( 1 - e^{-t \frac{R_3}{L}} \right), \quad (6.3)$$

де  $U_3$  – напруга джерела живлення,  $R_3$  – опір зарядного ланцюга,  $L$  – індуктивність котушки.

Проінтегрувавши  $i_L(t)$  на періоді часу  $t_3$  та розділивши результат на період  $T$ , отримаємо середнє значення струму, споживаного з мережі при нульових початкових умовах ( $I_0 = 0$ ):

$$i_{cp1} = \frac{1}{T} \int_0^{t_3} i_1(t) dt = \frac{U_3 \left( L \cdot \left( e^{-\frac{R_3 \cdot t_3}{L}} - 1 \right) + R_3 \cdot t_3 \right)}{T \cdot R_3^2}. \quad (6.4)$$

Тут  $t_3$  – час зарядки індуктивності протягом періоду зарядного процесу  $T$ .

Таким чином, змінюючи період підключення котушки до джерела напруги  $T$  або тривалість цього підключення, можна регулювати струм та потужність, що споживається зарядним пристроєм із джерела. При збільшенні  $t_3$  або зменшенні  $T$  середній струм та потужність збільшуються.

Максимальний струм індуктивності буде в кінці зарядки, в момент часу  $t_3$ :

$$i_{m1} = i(t_3) = \frac{U_3}{R_3} \left( 1 - e^{-t_3 \frac{R_3}{L}} \right). \quad (6.5)$$

Коефіцієнт пульсації схеми зарядки можна знайти як відношення максимального струму за період зарядки до середнього струму:

$$k_{n1} = \frac{i_{m1}}{i_{cp1}} = \frac{T \cdot R_3 \left( 1 - e^{-\frac{R_3 \cdot t_3}{L}} \right)}{L \left( e^{-\frac{R_3 \cdot t_3}{L}} - 1 \right) + R_3 \cdot t_3}. \quad (6.6)$$

Середню потужність схеми зарядки за період роботи можна визначити як відношення максимальної енергії, що запасється котушкою за період, до цього періоду:

$$P_{cp1} = \frac{L}{2 \cdot T} \cdot i_{m1}^2. \quad (6.7)$$

У мостовій схемі є дві індуктивності. Процеси в кожній з них аналогічні і рівняння (6.3) справедливе для зарядки однієї індуктивності в перший напівперіод, а іншої – в другий напівперіод.

Запишемо рівняння середнього струму схеми за час зарядки при нульових початкових умовах ( $I_0 = 0$ ) з урахуванням того, що процеси в обох котушках однакові:

$$i_{cp2} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i(t) dt = \frac{U_3 \left( 2L \cdot \left( e^{-\frac{R_3 \cdot T}{2L}} - 1 \right) + R_3 \cdot T \right)}{T \cdot R_3^2}, \quad (6.8)$$

де  $T/2$  - час зарядки однієї котушки.

Максимальний струм у цій схемі буде в кінці зарядки кожної з котушок:

$$i_{m1} = i\left(\frac{T}{2}\right) = \frac{U_3}{R_3} \left( 1 - e^{-\frac{T \cdot R_3}{2L}} \right). \quad (6.9)$$

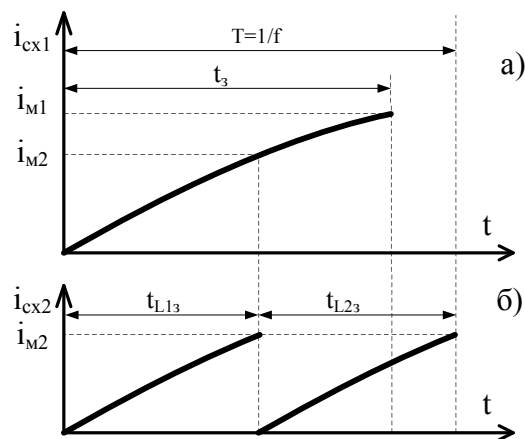
Коефіцієнт пульсації для цієї схеми:

$$k_{n2} = \frac{i_{m2}}{i_{cp2}} = \frac{T \cdot R_3 \left( 1 - e^{-\frac{R_3 \cdot T}{2L}} \right)}{2L \left( e^{-\frac{R_3 \cdot T}{2L}} - 1 \right) + R_3 \cdot T} \quad (6.10)$$

Середню потужність за період роботи можна записати у вигляді відношення енергії, що запасається однією з котушок, до часу роботи цієї котушки (півперіоду):

$$P_{cp1} = \frac{L}{T} \cdot i_{M2}^2 \quad (6.11)$$

Зіставимо струми, що споживаються розглянутими схемами (рис. 6.6), та порівняємо отримані для схем залежності.



- а) спожитий струм схемою з „дзвенячим” дроселем;  
б) спожитий струм мостовою схемою

Рисунок 6.6 - Зіставлення струмів, спожитих схемою з „дзвенячим” дроселем та мостовою схемою

Порівнюючи середні струми, віднімемо вираз, що відповідає схемі з "дзвенячим" дроселем ( $i_{cp1}$ ), від виразу, що відповідає мостовій схемі ( $i_{cp2}$ ), і прирівняємо до нуля:

$$i_{cp2} - i_{cp1} = \frac{U_3 \cdot L}{T \cdot R_3^2} \left( \left( 2 \cdot e^{-\frac{T \cdot R_3}{2L}} - e^{-\frac{R_3 \cdot t_3}{L}} - 1 \right) + \frac{R_3}{L} (T - t_3) \right) = 0 \quad (6.12)$$

Вирішимо складене рівняння відносно часу  $t_3$ . Отримаємо одне рішення:

$$t_{30} = T + \frac{L}{R_3} \cdot \left( 2 \cdot e^{-\frac{T \cdot R_3}{2L}} + LambertW \left( -e \cdot e^{-2 \cdot e^{-\frac{T \cdot R_3}{2L}}} \cdot e^{-\frac{T \cdot R_3}{L}} \right) - 1 \right), \quad (6.13)$$

де  $LambertW(\ )$  – W-функція Ламберта, визначається як зворотна функція до  $f(w) = we^w$ .

Тобто існує таке  $t_3 = t_{30}$ , при якому середні струми обох схем будуть рівні. Враховуючи, що складові рівняння (6.12), що містять  $t_3$ , можна розглядати як функції відносно  $t_3$  безперервні і монотонні на проміжку  $(0, T]$ , проаналізувавши додатково вираз (6.12), можемо бачити, що при  $t_3 < t_{30}$   $i_{cp2} > i_{cp1}$  і навпаки – при  $t_3 > t_{30}$   $i_{cp1} > i_{cp2}$ .

На величину  $t_{30}$  окрім періоду  $T$  впливають також параметри зарядного ланцюга  $R_3$  і  $L$ , що представлені в рішенні дробом  $R_3/L$ . Знайдемо границі залежності  $t_{30}(R_3/L)$  при спрямуванні  $R_3/L$  до нуля справа і нескінченності зліва та отримаємо:

$$\lim_{\frac{R_3}{L} \rightarrow 0^+} t_{30} = \frac{T}{\sqrt{2}}, \quad \lim_{\frac{R_3}{L} \rightarrow \infty^-} t_{30} = T.$$

Таким чином,  $t_{30}$  не може бути менше, ніж  $T/\sqrt{2}$  і більше  $T$ . Це, у свою чергу, означає, що при  $t_3 \leq T/\sqrt{2} = 0,7 \cdot T$  середній струм мостової схеми буде завжди більше середнього струму схеми з "дзвенячим" дроселем.

Порівняємо коефіцієнти пульсацій, розділивши коефіцієнт  $k_{n1}$ , відповідний схемі з "дзвенячим" дроселем, на коефіцієнт  $k_{n2}$ , що відповідає мостовій схемі:

$$\frac{k_{n1}}{k_{n2}} = \frac{i_{m1}}{i_{m2}} \cdot \frac{i_{cp2}}{i_{cp1}}. \quad (6.14)$$

Практичний інтерес представляє аналіз відношення коефіцієнтів на інтервалі зміни часу заряду індуктивності в схемі з "дзвенячим" дроселем  $T/2 \leq t_3 < T$ , оскільки при  $t_3 < T/2$  перевага мостової схеми очевидна.



На цьому інтервалі  $i_{m1} > i_{m2}$ , значить  $i_{m1}/i_{m2}$  завжди більше одиниці. Враховуючи, що на даному інтервалі при  $t_3 < t_{30}$  і завжди при  $t_3 < T/\sqrt{2}$   $i_{cp2} > i_{cp1}$ ,  $i_{cp2}/i_{cp1} > 1$ , у нашому випадку маємо  $k_{n1} > k_{n2}$ .

Порівнюючи середню потужність схеми з "дзвенячим" дроселем  $p_{cp1}$  і мостової схеми  $p_{cp2}$ , віднімемо перший вираз від другого, прирівняємо отримане до нуля:

$$p_{cp2} - p_{cp1} = \frac{L \cdot U_3^2 \left( 2 \cdot e^{-\frac{T \cdot R_3}{L}} - 4 \cdot e^{-\frac{T \cdot R_3}{2L}} + 2 \cdot e^{-\frac{t_3 \cdot R_3}{L}} - e^{-\frac{2 \cdot t_3 \cdot R_3}{L}} + 1 \right)}{2 \cdot T \cdot R_3^2} = 0. \quad (6.15)$$

Вирішивши рівняння відносно  $t_3$ , отримаємо два рішення:

$$t_{30}^{(1)} = \frac{-L \cdot \ln \left( \sqrt{2 \cdot \left( e^{-\frac{T \cdot R_3}{2L}} - 1 \right)^2} + 1 \right)}{R_3}, \quad t_{30}^{(2)} = \frac{-L \cdot \ln \left( 1 - \sqrt{2 \cdot \left( e^{-\frac{T \cdot R_3}{2L}} - 1 \right)^2} \right)}{R_3}. \quad (6.16)$$

Перше рішення завжди від'ємне і його можна відкинути, оскільки розглядається тільки позитивний відрізок часу, тобто:

$$t_{30} = \frac{-L \cdot \ln \left( 1 - \sqrt{2 \cdot \left( e^{-\frac{T \cdot R_3}{2L}} - 1 \right)^2} \right)}{R_3} \quad (6.17)$$

Проаналізувавши вираз (6.15) з урахуванням  $t_{30}$ , можна зробити висновок, що при  $t_3 < t_{30}$   $p_{cp2} > p_{cp1}$ .

Проаналізуємо  $t_{30}$  з урахуванням параметрів зарядного ланцюга  $R_3$  і  $L$ . Знайдемо границю, до якої наближається  $t_{30}$ , коли відношення  $R_3/L$  наближається до нуля справа:

$$\lim_{\frac{R_3}{L} \rightarrow 0^+} t_{30} = \frac{T}{\sqrt{2}}. \quad (6.18)$$

Знайдемо область визначення  $t_{30}$  в залежності від  $T \cdot \frac{R_3}{2 \cdot L}$ . Так як аргумент логарифма має бути більше нуля, складемо нерівність і вирішимо її відносно  $T \cdot \frac{R_3}{2 \cdot L}$ :

$$1 - \sqrt{2 \cdot \left( e^{\frac{T \cdot R_3}{2L}} - 1 \right)^2} > 0, \quad (6.19)$$

$$-\ln\left(\frac{1}{\sqrt{2}} + 1\right) < T \cdot \frac{R_3}{2 \cdot L} < -\ln\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right).$$

Враховуючи, що жодна зі складових виразу  $T \cdot \frac{R_3}{2 \cdot L}$  не може бути меншою за нуль, нерівність можна представити так:

$$0 \leq T \cdot \frac{R_3}{2 \cdot L} < -\ln\left(1 - \frac{1}{\sqrt{2}}\right) \text{ чи } 0 \leq \frac{R_3}{2 \cdot L} < \frac{\ln(\sqrt{2} + 2)}{T}.$$

Таким чином,  $t_{30}$  не може бути менше  $T/\sqrt{2}$ , що, в свою чергу, означає перевищення  $p_{cp2}$  над  $p_{cp1}$  завжди, коли  $t_\zeta < T/\sqrt{2}$  і  $\frac{R_3}{2 \cdot L} < \frac{\ln(\sqrt{2} + 2)}{T}$ .

Розглянувши такі показники процесу заряду, як середній струм, середня потужність, коефіцієнт пульсацій можна зробити висновок: перевага схеми з «дзвенячим» дроселем може бути досягнута при  $t_\zeta$  обмеженому досить маленьким проміжком у рамках періоду зарядного процесу, а конкретно – на інтервалі від  $T/\sqrt{2} \approx 0,7 \cdot T$  до  $T$ . Враховуючи вплив параметрів зарядного ланцюга на зарядний процес, цей проміжок звужується до інтервалу  $(t_{30}; T]$ , де  $t_{30}$  своє для кожного з параметрів.

Тепер слід врахувати, що після зарядки індуктивність повинна розрядитися. В мостовій схемі кожна з індуктивностей розряджається в

другий напівперіод, поки заряджається перша індуктивність. А в схемі з «дзвенячим» дроселем на це відводиться той маленький інтервал  $(t_{30}; T]$ . Із збільшенням ємності (для забезпечення більшої енергоємності накопичувального блоку), на яку розряджатиметься індуктивність, період розряду збільшується і повний розряд може бути реалізований тільки за рахунок зменшення часу зарядки індуктивності, а це виключає перевагу цієї схеми за досліджуваними параметрами.

Окрім розглянутого до недоліків схеми з «дзвенячим» дроселем слід віднести необхідність побудови додаткової схеми замикання дроселя, якщо в якості вентиля використовується, наприклад, тиристор; якщо в якості вентиля використовується повністю керований елемент – конструкція дорожчає; миттєві значення зарядних струмів, що протікають в цій схемі, перевищують струми мостової схеми при аналогічній середній потужності, що веде до збільшення масогабаритних і вартісних показників використовуваних компонентів (дроселя, ключа), необхідності потужнішого фільтруючого пристрою, менш рівномірного завантаження живлячої мережі.

Мостова схема може бути досить просто модифікована для здійснення розряду конденсаторного блоку на навантаження. І в цьому випадку зберігаються її переваги перед схемою з «дзвенячим» дроселем (також модифікованою).

Грунтуючись на вищезазначеному, слід визнати, що використання мостової схеми є раціональнішим і доцільнішим.

## 7 СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ «ТЯГОВА МЕРЕЖА І КАЕЕ» В СТАНАХ «НЕРОБОЧИЙ ХІД ТЯГОВОЇ ЛІНІЇ – ЗАРЯД КАЕЕ», «ШКОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ – РОЗРЯД КАЕЕ»

### 7.1 Аналіз процесу накопичування енергії електромеханічним накопичувачем з машиною постійного струму

Машини постійного струму хоч і мають порівняно складну конструкцію, але забезпечують просте регулювання як у генераторному режимі, так і в двигунному. Проведемо аналіз перехідних процесів заряду та розряду електромеханічного накопичувача з такою машиною. Система рівнянь, що описує його роботу має вигляд:

$$\left. \begin{aligned} c_e \Phi_\delta \Omega \pm L_\gamma \frac{di_\gamma}{dt} \pm R_\gamma i_\gamma &= u_\gamma \\ \pm c_m \Phi_\delta i_\gamma - J \frac{d\Omega}{dt} - M_m &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (7.1)$$

де  $c_e, c_m$  – "машинні" коефіцієнти;  $\Phi_\delta$  – магнітний потік збудження;  $\Omega$  – кутова швидкість обертання машини, сполученої з маховиком;  $i_\gamma$  – струм обмотки якоря;  $R_\gamma, L_\gamma$  – активний опір та індуктивність обмотки якоря;  $u_\gamma$  – напруга обмотки якоря;  $J$  – момент інерції системи "маховик – якір";  $M_m$  – момент тертя.

Верхні знаки в (7.1) мають відношення до режиму зарядки, ніжні – до режиму розряду. Прийнемо в режимі зарядки  $\Phi_\delta = const, M_m = const$ .

Розглянемо процес зарядки, тобто розкрутку маховика машиною постійного струму в режимі двигуна при прямому підключенні якоря до джерела живлення з  $u_\gamma = U_\gamma = const$ . Початковими умовами при цьому  $\Omega(0) = 0$  і  $i_\gamma(0) = I_{\gamma 0}$ , тому що електромеханічний процес розкручування маховика з двигуном починається після зростання струму якоря від нуля до значення  $I_{\gamma 0}$ , яке забезпечує момент зрушування  $M_{зр} = c_m \Phi_\delta I_{\gamma 0} = M_m$ .

При  $\Omega = 0$ ,  $u_{я} = U_{я}$ ,  $i_{я}(0) = 0$  електромагнітний процес у колі обмотки якоря розвивається згідно з рівнянням:

$$i_{я}(t') = I_{яП} \left( 1 - e^{-t'/\tau_{я}} \right) \quad (7.2)$$

де  $I_{яП} = U_{я}/R_{я}$  – пусковий струм (при  $\Omega = 0$ );  $\tau_{я} = L_{я}/R_{я}$  – електромагнітна стала часу.

За час  $t' = t_0$  досягається струм  $i_{я}(t_0) = I_{я0}$ . При аналізі електромеханічного перехідного процесу початок відліку часу  $t = 0$  зменшується на проміжок  $t' = t_0$ . З урахуванням цього розв'язок системи рівнянь (7.1) буде таким:

$$i_{я} = I_{я0} + (I_{яП} - I_{я0}) \frac{\exp(p_1 t) - \exp(p_2 t)}{\sqrt{\Delta}}; \quad (7.3)$$

$$\Omega = \Omega_c \left( 1 + \tau \frac{p_2 \exp(p_1 t) - p_1 \exp(p_2 t)}{\sqrt{\Delta}} \right); \quad (7.4)$$

де

$$p_{1,2} = -\frac{1}{2\tau_{я}} \left( 1 \pm \sqrt{\Delta} \right), \quad \Delta = 1 - 4\tau_{я}/\tau_{ем};$$

$$\tau_{ем} = J\Omega_0/M_{eП}; \quad M_{eП} = c_m \Phi_{\delta} I_{яП}; \quad \Omega_c = \frac{U_{я} - I_{я0} R_{я}}{c_e \Phi_{\delta}};$$

$\Omega_0$  – кутова швидкість, яку можливо було б досягти при керованому розкручуванні маховика з незмінним динамічним моментом  $M_{\delta} = J \frac{d\Omega}{dt} = M_{eП}$  і моментом  $M_T = 0$  з нерухомого стану протягом часу

$$t_{разк} = \int_0^{\Omega_0} \frac{J d\Omega}{c_m \Phi_{\delta} I_{яП}} = \frac{J\Omega_0}{M_{eП}} = \tau_{ем},$$

що дорівнює електромеханічній сталій.

Вигляд коренів  $p_{1,2}$  характеристичного рівняння системи (7.4) визначає характер перехідного процесу. Якщо дискримінант  $D = -\frac{\Delta}{4\tau_{я}} < 0$ , то  $p_{1,2} < 0$ , тобто дійсні корені, що зумовлюють аперіодичну зміну  $i_{я}(t)$  і  $\Omega(t)$ . При цьому в часі струм якоря спочатку збільшується від  $i_{я} = I_{я0}$  до  $i_{я} \leq I_{яП}$ , а потім прямує до усталеного значення  $I_{я}$ . Кутова швидкість збільшується від нуля до усталеного значення  $\Omega_c$ , яке в даному випадку відповідає статичному моменту  $M_{м} = M_{Т}$ . У випадку, коли  $\tau_{ем} < 4\tau_{я}$ ,  $D > 0$  і тоді  $p_{1,2}$  – комплексно-спряжені корені з дійсними частинами  $Re p_{1,2} < 0$ . При цьому зміни  $i_{я}(t)$  і  $\Omega(t)$  будуть у вигляді періодичних коливань із затухаючими амплітудами.

У випадку відносно великих значень  $J$  і малих значень  $L_{я}$ , коли  $\tau_{ем} \ll \tau_{я} \rightarrow 0$ , що має місце при розкручуванні маховика, одержимо експонентальні залежності для струму якоря і кутової швидкості:

$$i_{я} = I_{я0} + (I_{яП} - I_{я0}) \exp(-t/\tau_{ем}); \quad (7.5)$$

$$\Omega = \Omega_c [1 - \exp(-t/\tau_{ем})], \quad (7.6)$$

тобто у цьому випадку  $\tau_{ем}$  еквівалентна сталій часу розкручування маховика при  $M_{ем} = c_{м} \Phi_{\theta} i_{я}(t) \neq const$  і  $M_{Т} \neq 0$ , тому тривалість розкручування  $t_{разк} \approx (3-4)\tau_{ем}$ .

Відомо, що стоянковий момент тертя у підшипниках значно перевищує момент тертя при обертанні маховика. Для зменшення споживаної від джерела живлення потужності бажано перед увімкненням двигуна вивести маховик із нерухомого стану за допомогою спеціального пристрою з ручним приводом. При цьому на вал або на зовнішню поверхню маховика короткочасно діють зовнішнім механічним моментом, що забезпечує малу початкову кутову швидкість маховика. З урахуванням відповідних умов  $i_{я}(0) = I_{я0}$ ,  $\Omega(0) = \Omega_{ПЧ}$  і при  $\tau_{ем} \ll \tau_{я} \rightarrow 0$  одержимо:

$$i_{я} = i_{я0} + (I_{яП} - I_{я0} - \beta) \exp(-t/\tau_{ем}); \quad (7.7)$$

$$\Omega = \Omega_c - (\Omega_c - \Omega_{ПЧ}) \exp(-t/\tau_{ем}), \quad (7.8)$$

де

$$\beta = \frac{c_e \Phi_e \Omega_{ПЧ}}{R_{я}}.$$

Вираз (7.7) вказує на зменшення амплітуди струму якоря при розкручуванні маховика і споживаній потужності відповідно.

## 8 СТВОРЕННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ «ТЯГОВА МЕРЕЖА І ЄАЕЕ» В СТАНАХ «НЕРОБОЧИЙ ХІД ТЯГОВОЇ ЛІНІЇ – ЗАРЯД ЄАЕЕ», «ШКОВЕ НАВАНТАЖЕННЯ – РОЗРЯД ЄАЕЕ»

### 8.1 Енергетика процесу зарядження ємнісного накопичувача енергії

Одним з найважливіших енергетичних показників системи енергопостачання, що визначає габарити і витрати матеріалів, є к.к.д. процесу заряджання накопичувача:

$$\eta_3 = \frac{w_e}{w_e + w_g}, \quad (8.1)$$

де  $w_e = \frac{CU_{cn}}{2}$  – енергія зарядженого конденсатора;  $w_g = r \int_0^t i_3 dt$  – втрати енергії в активному опорі зарядного контуру.

Відомо, що, виходячи з енергетичних міркувань, для низькочастотних систем заряджання ємнісного накопичувача (ЄН) при змінному струмі є нерациональним. Тому зарядження ЄН повинно здійснюватися від джерела постійного струму. При використанні електромашинних джерел заряджання ЄН можливо здійснити як від колекторного генератора постійного струму, так і від генератора змінного струму через напівпровідниковий випрямляч.

Недоліки колекторних машин постійного струму загальновідомі. Крім того, при сталому (нерегульованому) збудженні колекторного генератора постійного струму процес заряджання конденсатора є аперіодичним (практично експоненціальним при малій сталій часу кола якоря) і к.к.д. процесу не перевищує 0,5. Регулювання струму збудження генератора постійного струму за визначеним оптимальним законом в процесі заряджання ЄН хоч і дає змогу суттєво збільшити к.к.д., але погіршує використання габаритної потужності машини та вимагає застосування достатньо складних систем автоматичного регулювання.

У зв'язку з вищенаведеним розглянемо енергетичні показники процесу заряджання ЄН від генератора змінного струму через напівпровідниковий випрямляч на прикладі трифазного синхронного



генератора, що живить мостовий двоівперіодний випрямляч за схемою А.М.Ларіонова (рис. 8.1):

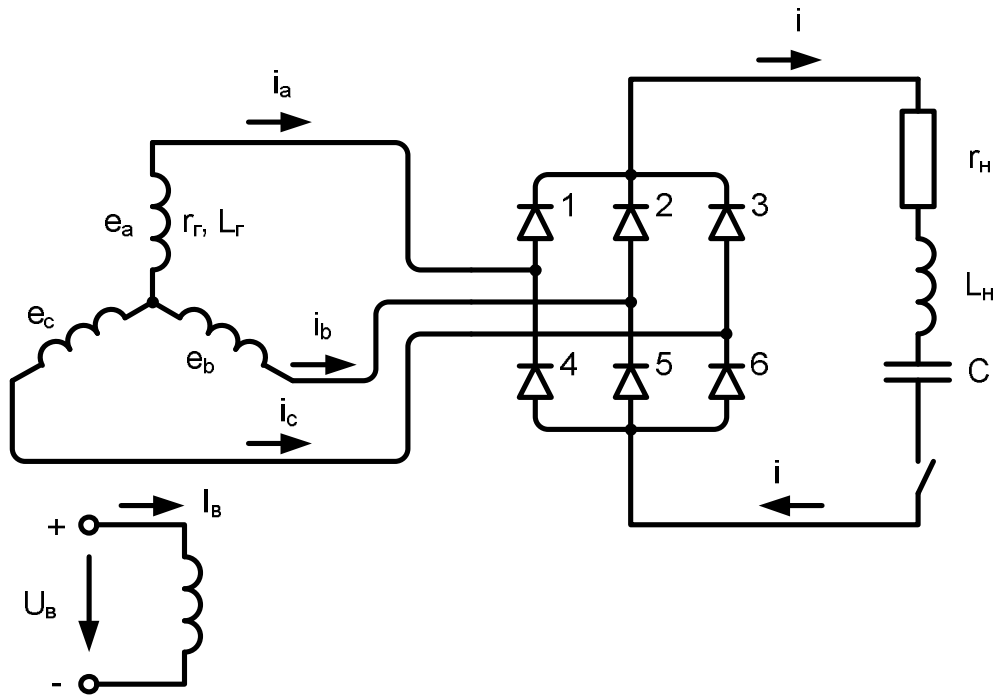
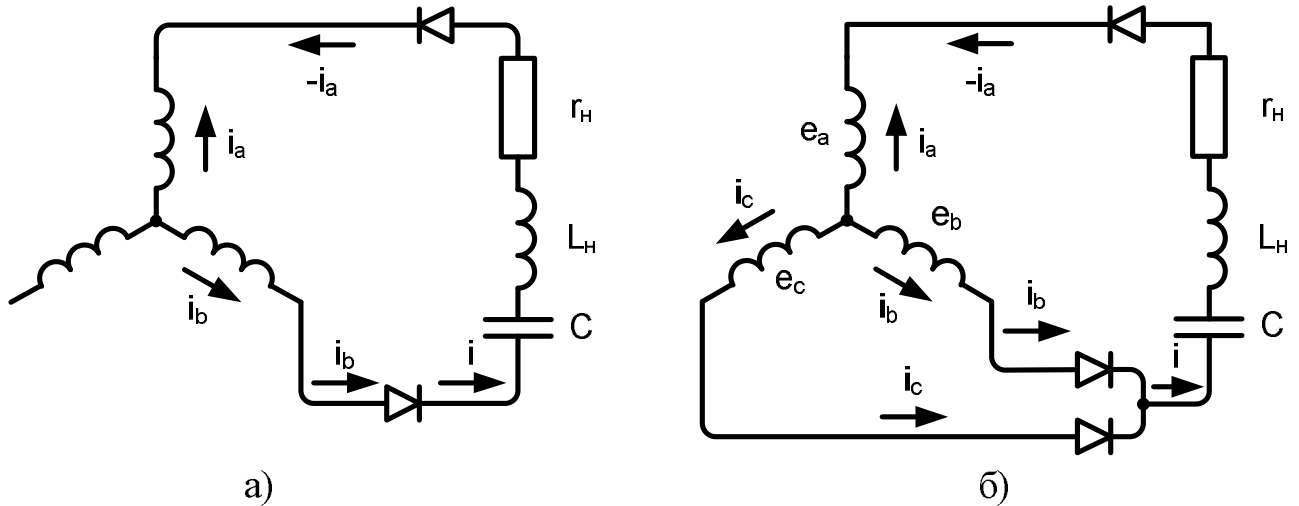


Рисунок 8.1 - Електрична схема системи зарядження конденсатора ЄН

В процесі заряджання конденсатора ЄН через випрямляч у відповідності до рівняння комутації кількість одночасно відкритих вентилів змінюється, тому що змінюється за величиною зарядний струм. На початку процесу, коли  $u_c(0)=0$  і зарядовий струм найбільший, відкритими будуть три, а в деяких випадках і чотири вентиля. Основним режимом роботи випрямляча є режим почергової зміни комутаційних інтервалів: коли одночасно відкрито три вентиля з позакомутаційними інтервалами і коли одночасно відкрито два вентиля. В кінці процесу зарядний струм спадає до нуля. При цьому схема переходить до режиму неробочого ходу і відповідно до рівняння комутації одночасно відкритими будуть два вентиля.

На рис. 8.2,а зображено схему випрямляча для позакомутаційного інтервалу роботи, коли одночасно відкрито два вентиля 2 і 4, а на рис. 8.2,б – схема для комутаційного інтервалу, коли одночасно відкрито вентиля 4, 2 і 1.

У процесі роботи випрямляча схеми комутаційних та позакомутаційних інтервалів залишаються незмінними, а до відповідних схем по чергово вмикаються різні фази генератора і різні вентиля.



а) для позакомутаційного інтервалу;

б) для комутаційного інтервалу

Рисунок 8.2 - Схеми зарядних контурів

За один період випрямленої напруги будуть спостерігатися шість комутаційних і шість позакомутаційних інтервалів (відповідно до шести вентилів двопівперіодної схеми випрямлення).

За схемою рис. 8.2, б для комутаційного інтервалу маємо співвідношення:

$$i_e + i_c = -i_a; \quad i = -i_a. \quad (8.2)$$

$$\left. \begin{aligned} e_e - e_a &= r_2(i_e - i_a) + L_2 \left( \frac{di_e}{dt} - \frac{di_a}{dt} \right) + r_n i + L_n \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \\ e_c - e_a &= r_2(i_c - i_a) + L_2 \left( \frac{di_c}{dt} - \frac{di_a}{dt} \right) + r_n i + L_n \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i dt \end{aligned} \right\} \quad (8.3)$$

При розв'язанні системи (8.3) з врахуванням (8.2) отримаємо:

$$\frac{e_e + e_c}{2} - e_a = \left[ 1,5r_2 i_a + 1,5L_2 \frac{di_a}{dt} - r_n i - L_n \frac{di}{dt} - \frac{1}{C} \int_0^t i dt \right], \quad (8.4)$$

$$1,5E_{0,m} \sin \omega t = 1,5r_2 i_a + 1,5L_2 \frac{di_a}{dt} - r_n i - L_n \frac{di}{dt} - \frac{1}{C} \int_0^t i dt, \quad (8.5)$$

де  $e_a = E_{0,m} \sin \omega t$ ;  $e_s = E_{0,m} \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right)$ ;  $e_c = E_{0,m} \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right)$ ;  $r_2, L_2$  – активний опір та індуктивність фази;  $E_{0,m}$  – амплітуда е.р.с. фази в неробочому режимі генератора.

Співвідношення (8.5) треба розуміти так, що у коло зарядного контуру ввімкнено е.р.с. розміром  $1,5E_{0,m}$  та збільшений у 1,5 рази опір фазової обмотки генератора. Якщо безперервно чергуються комутаційні інтервали, то для кожного з них структура рівнянь (8.4) і (8.5) не змінюється, лише змінюються індекси при струмах та е.р.с. Крім того, в процесі заряджання конденсатора закон зміни випрямленого струму  $i(t)$  і амплітуди першої гармоніки фазного струму  $i_m(t)$  один і той же. Приблизно випрямлений струм  $i(t)$  є обвідною амплітудних значень фазних струмів генератора  $i_m(t)$ .

Визначимо опір, що чинить обмотка фази генератора в процесі заряджання фазному струму  $i_m(t)$ . Припустимо, що

$$i_m(t) = I_m \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \sin \omega t,$$

де  $I_m$  – амплітуда струму;  $\tau$  – стала часу зарядного процесу;  $\omega$  – кутова частота.

Спад напруги в фазній обмотці генератора

$$\begin{aligned} u_m(t) &= r_2 i_m(t) + L_2 \frac{di_m(t)}{dt} = \\ &= I_m \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \left[ \sin \omega t \left( r_2 - \frac{L_2}{\tau} \right) - \omega L_2 \cos \omega t \right] = \\ &= I_m \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) [\sin \omega t - \operatorname{tg} \gamma \cos \omega t] \left( r_2 - \frac{L_2}{\tau} \right), \end{aligned}$$

де  $\operatorname{tg} \gamma = \frac{\omega L_2}{r_2 - \frac{L_2}{\tau}} = \frac{x_2}{r_2 - \frac{x_2}{\tau \omega}}$ ;  $x_2 = \omega L_2$  – індуктивний опір фази.

Після нескладних перетворень маємо:

$$u_m(t) = U_m \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \sin(\omega t - \gamma), \quad (8.6)$$

де  $U_m = I_m \sqrt{\left(r_2 - \frac{x_2}{\omega \tau}\right)^2 + x_2^2}$ ;  $\cos \gamma = \frac{r_2 - \frac{x_2}{\omega \tau}}{\sqrt{\left(r_2 - \frac{x_2}{\omega \tau}\right)^2 + x_2^2}}$ .

Тоді повний опір фазному струму буде:

$$Z_2 = \frac{u_m(t)}{i_m(t)} = \sqrt{\left(r_2 - \frac{x_2}{\omega \tau}\right)^2 + x_2^2}. \quad (8.7)$$

У низькочастотних системах, коли стала часу процесу зарядження достатньо велика і  $\frac{x_2}{\omega \tau} \ll r_2$ , а  $\omega \tau \gg 1$ , модуль повного опору фази генератора  $Z_2 = 1,5 \sqrt{r_2^2 + x_2^2}$  визначається таким же за виглядом співвідношенням, що і при синусоїдному струмі. Тут  $\omega h_2 = x_2$  є синхронним індуктивним опором фази. Для неявнополюсної машини  $x_2 = x_d = x_q$ , для явно полюсної  $x_2 \approx 0,5(x_d + x_q)$ . При стабілізованій частоті обертання ротора генератора  $x_2 = \text{const}$  протягом усього зарядного циклу. При змінній частоті обертання умови  $\frac{x_2}{\omega \tau} \ll r_2$  і  $\omega \tau \gg 1$  повинні виконуватись при мінімальній частоті обертання ротора.

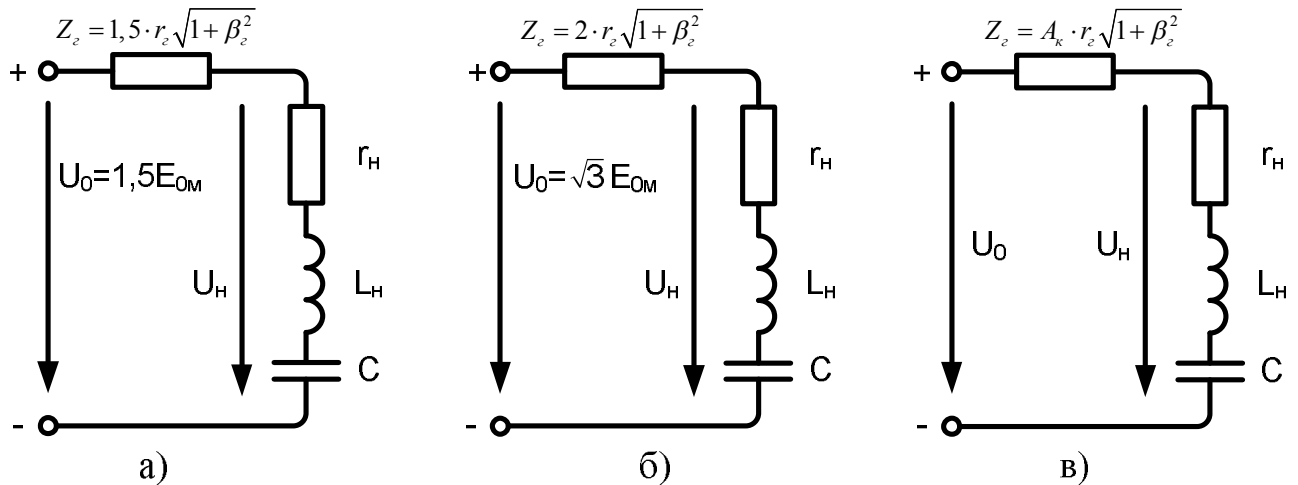
Таким чином, у комутаційних інтервалах в колі зарядного контуру ЄН буде діяти е.р.с.  $1,5 E_{0m}$  і послідовно з параметрами  $r_n$ ,  $L_n$ ,  $C$  цього контуру ввімкнено опір генератора розміром  $1,5 \sqrt{r_2^2 + x_2^2}$ . На рис. 8.3,а зображено еквівалентну схему для комутаційних інтервалів. Напругу

$U_0 = 1,5 E_{0m}$ , ввімкнену до входу схеми, можна розглядати як напругу постійного струму. При цьому в схемі спостерігається амплітудне значення фазного струму, тобто випрямлений струм зарядження в контурі з  $r_n$ ,  $L_n$ ,  $C$  є обвідною амплітудних значень фазного струму генератора. При  $L_n \approx 0$  комплексний опір, що обмежує зарядний струм, згідно з еквівалентною схемою буде:

$$Z_e = r_n + 1,5\sqrt{r_e^2 + x_e^2} = r_e \left( r_n + 1,5\sqrt{1 + \beta_e^2} \right)$$

де  $\beta_e = \frac{x_e}{r_e}$  – відносний синхронний опір генератора;  $r_n = \frac{r_n}{r_e}$  – відносний

активний опір навантаження.



а) для комутаційного інтервалу;

б) для позакомутаційного інтервалу;

в) для поперемінних комутаційних та позакомутаційних

інтервалів

Рисунок 8.3 - Еквівалентні схеми кола зарядного контуру ЄН

Розглянемо роботу схеми рис. 8.2,а для позакомутаційного інтервалу.

При цьому згідно зі схемою маємо:

$$i = i_g = -i_a \quad (8.8)$$

$$e_a - e_b = r_z (i_a - i_b) + L_z \left( \frac{di_a}{dt} - \frac{di_b}{dt} \right) + r_n i + L_n \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i dt . \quad (8.9)$$

Після відповідних перетворень одержимо:

$$\sqrt{3} E_{0m} \sin(\omega t + 30^\circ) = -2i_a r_z - 2L_z \frac{di_a}{dt} - i r_n - L_n \frac{di}{dt} - \frac{1}{C} \int_0^t i dt . \quad (8.10)$$

Для інших позакомутаційних інтервалів структура рівнянь (8.8)-(8.10) не зміниться, лише іншими будуть індекси при е.р.с. та струмах. Відповідно до рівняння (8.10) в позакомутаційних інтервалах у коло зарядного контуру ввімкнено е.р.с.  $\sqrt{3} E_{0m}$ , а послідовно з параметрами  $r_n$ ,  $L_n$ ,  $C$  контуру ввімкнено опір двох фаз генератора, модуль якого дорівнює:

$$Z_z = 2\sqrt{r_z^2 + x_z^2} . \quad (8.11)$$

На рис. 8.3,б зображено еквівалентну схему для позакомутаційних інтервалів. Комплексний опір еквівалентної схеми при  $L_n \approx 0$ , що обмежує зарядний струм, буде:

$$Z_e = r_n + 2\sqrt{r_z^2 + x_z^2} = r_z \left( r_n + 2\sqrt{1 + \beta_z^2} \right) . \quad (8.12)$$

При почерговій зміні комутаційних та позакомутаційних інтервалів у процесі зарядження конденсатора ЄН у загальному випадку еквівалентну схему зарядного контуру можна подати як схему рис. 8,в, а комплексний опір, що обмежує зарядний струм, як:

$$Z_e = r_z \left( r_n + A_\kappa \sqrt{1 + \beta_z^2} \right) , \quad (8.13)$$

де  $A_\kappa = 1,5 \div 2,0$  – комутаційний коефіцієнт.

Розглянемо питання щодо к.к.д. У випадку, коли  $L_n=0$  згідно зі співвідношенням (8.10) має місце експоненціальний процес зарядження конденсатора ЄН. При цьому зарядний струм:

$$i = \frac{U_0}{r_z \left( r_n + A_k \sqrt{1 + \beta_z^2} \right)} \exp\left(-\frac{t}{T_c}\right), \quad (8.14)$$

напряга на конденсаторі:

$$u_c = U_0 \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_c}\right) \right],$$

де  $U_0$  – напряга на вході еквівалентної схеми рис. 8.3,в;  $T_c = CZ_e$  – стала часу зарядного контуру.

Втрати енергії в процесі зарядження ЄН будуть:

$$w_3 = \int_0^t i^2 r_z \left( r_n + A_k \right) dt = \frac{CU_0^2}{2} \frac{r_n + A_k}{r_n + A_k \sqrt{1 + \beta_z^2}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2t}{T_c}\right) \right]. \quad (8.15)$$

Накопичена енергія

$$w_n = \int_0^t i u_c dt = \frac{CU_0^2}{2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{T_c}\right) \right]. \quad (8.16)$$

Коефіцієнт корисної дії експоненціального процесу заряджання:

$$\eta_3 = \frac{w_n}{w_n + w_3} \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{1}{1 + \frac{r_n + A_k}{r_n + A_k \sqrt{1 + \beta_z^2}}}. \quad (8.17)$$

Опір  $r_n$  являє собою опір втрат у конденсаторі та якщо  $\frac{r_n}{r_z}$  мале, то їм можна знехтувати. Тоді

$$\eta_3 = \frac{\sqrt{1 + \beta_2^2}}{1 + \sqrt{1 + \beta_2^2}}. \quad (8.18)$$

З останнього виразу витікає, що к.к.д. процесу заряджання залежить тільки від відносного індуктивного опору  $\beta_2 = \frac{x_2}{r_2}$ . Якщо  $r_2 \ll x_2$ , тобто  $\beta_2 \rightarrow \infty$ , то к.к.д.  $\eta_3 \rightarrow 1,0$ . При  $x_2 \rightarrow \infty$   $\eta_3 \rightarrow 0,5$ , що має місце у класичному випадку заряджання ємності в контурі  $r_1 c$  від джерела постійного струму.

Таким чином, при достатньо великому розмірі  $\beta_2$ , незважаючи на експоненціальний процес заряджання, к.к.д. зарядного контуру може значно перевищувати значення 0,5 і при  $\beta_2 \geq 10$  має місце  $\eta_3 \geq 0,9$ . І в цьому одна з головних переваг заряджання ЄН від генератора змінного струму через випрямляч порівняно з процесом зарядження від колекторного генератора постійного струму.

## 8.2 Процеси при розряді ємнісного накопичувача електричної енергії

Розрядні контури, як правило, складаються із самого ємнісного накопичувача (конденсатора) ЄН, індуктивності та активного опору (резистора). Тому еквівалентну схему розрядного контуру можна зобразити у вигляді послідовно з'єднаних  $C_n$ ,  $L_p$  і  $R_p$ , де  $C_n$  – ємність конденсатора накопичувача; параметри  $L_p$  і  $R_p$  враховують індуктивності і активні опори навантаження  $L_i$ ,  $R_i$  та проводів розрядного контуру  $L_{np}$ ,  $R_{np}$  і внутрішнього опору комутуючого пристрою. В загальному випадку параметри  $L_p(i_p)$  і  $R_p(i_p)$  є змінними, залежними від розрядного струму  $i_p$ , причому ці залежності можуть бути нелінійними. У випадку, коли  $L_i$  і  $R_i$  є сталими і значно перевищуючими решту індуктивностей та опорів розрядного контуру, для оцінки характеристик розрядного процесу ЄН використаємо розв'язки



лінійного диференційного рівняння при початкових умовах  $i_p(0) = 0$  і  $u_{cn}(0) = U_0$ :

$$u_{cn} = i_p R + L_p \frac{di_p}{dt} + \frac{1}{C_n} \int i_p dt, \quad (8.19)$$

де  $U_0$  – напруга зарядженого конденсатора.

Розв'язки рівняння (8.19) мають вигляд:

$$i_p = \frac{U_0}{2aL_p} (-e^{p_1 t} + e^{p_2 t}); \quad (8.20)$$

$$u_c = \frac{U_0}{2a} (-p_2 e^{p_1 t} + p_1 e^{p_2 t}), \quad (8.21)$$

де  $t$  – плинний час;  $p_1, p_2$  – корені характеристичного рівняння:

$$p_1 = -b + a; \quad p_2 = -b - a; \\ b = \frac{R_p}{2L_p}; \quad a = \sqrt{\frac{R_p^2}{4L_p^2} - \frac{1}{LC_n}}. \quad (8.22)$$

**А. Випадок дійсних коренів**

Підкореневе число в (8.22) додатне, коли

$$\frac{R_p^2}{4L_p^2} > \frac{1}{LC_n}, \quad \text{тобто} \quad R_p > \sqrt{\frac{L_p}{C_n}}. \quad (8.23)$$

Тоді обидва корені дійсні і від'ємні, причому  $|\delta_2| > |\delta_1|$ , тому складові в (8.20) і (8.21), що містять  $e^{p_1 t}$ , зменшуються повільніше, ніж складові з  $e^{p_2 t}$ .

Напруга на індуктивності  $L_p$ :

$$u_L = L_p \frac{di_p}{dt} = \frac{U_{C0}}{2a} (-p_1 e^{p_1 t} + p_2 e^{p_2 t}). \quad (8.24)$$

В момент часу

$$t_1 = \frac{1}{2a} \ln \frac{p_2}{p_1}$$

розряджений струм  $i_p$  сягає максимуму, а  $u_L$  стає рівним нулю.

З енергетичної точки зору момент часу  $t_1$  характеризується наступним.

Від початку розряду до моменту часу  $t_1$  зменшується напруга на конденсаторі і його енергія витрачається на опорі  $R_p$  і на запасання енергії магнітного поля в  $L_p$ . В момент  $t_1$  струм  $i_p$  і енергія магнітного поля сягають максимуму. Від моменту  $t_1$  до  $t \rightarrow \infty$  витрати потужності в  $R_p$  покриваються як за рахунок спадаючої енергії електричного, так і енергії магнітного полів.

### Б. Випадок комплексних коренів

При малому значенні  $R_p$ , а саме коли  $R_p < 2\sqrt{\frac{L_p}{C_n}}$ , корені характеристичного рівняння будуть комплексними, а розв'язки рівняння (8.19) будуть такими:

$$i = -\frac{U_0}{\omega_0 L_p} e^{-bt} \cdot \sin \omega_0 t; \quad (8.25)$$

$$u_C = \frac{U_0 e^{-bt}}{\omega_0 \sqrt{L_p C_n}} \cdot \sin(\omega_0 t + \Psi_0); \quad (8.26)$$

$$u_L = \frac{U_0 e^{-bt}}{\omega_0 \sqrt{L_p C_n}} \cdot \sin(\omega_0 t - \Psi_0), \quad (8.27)$$

де

$$b = \frac{R_p}{2L_p}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_p C_n} - \frac{R_p^2}{4L_p^2}}; \quad \Psi_0 = \arctg \frac{\omega_0}{b}.$$

У цьому випадку, що може мати місце при замкненні накоротко резистора  $R_p$ , всі три величини є гармонійними коливаннями з однією круговою частотою  $\omega_0$ , яку називають власною круговою частотою. Всі три коливання однаково затухають, на що вказує множник  $e^{-bt}$  у формулах (8.25)-(8.27). В даному випадку  $b = \frac{R_{np}}{2L_p}$ , а не  $\frac{R_p}{2L_p}$ , що вказує на те, що процес може бути тривалим. Аналізований режим накопичувача не є робочим і для його запобігання необхідно передбачити застосування захисних пристроїв.

### В. Випадок однакових коренів

При цьому значення  $R_p = 2\sqrt{\frac{L_p}{C_u}}$ ;  $a = 0$ ;  $p_1 = p_2 = -b = -\frac{R_p}{2L_p}$ . Розв'язки рівняння (8.19) мають вигляд:

$$i = -\frac{U_0}{L_p} \cdot t \cdot e^{-bt}; \quad (8.28)$$

$$u_C = U_0(bt + 1)e^{-bt}; \quad (8.29)$$

$$u_L = U_0(bt - 1)e^{-bt}. \quad (8.30)$$

У цьому випадку розрядний процес ЄН уже не коливальний. При  $t = 0$  маємо:

$$u_C = U_0; \quad i = 0; \quad u_L = -U_0.$$

Значення струму буде максимальним у момент часу  $t_1 = \frac{1}{b} = \frac{2L_p}{R_p}$ , при цьому  $u_L$  змінює знак на протилежний, а крива  $u_C$  має згин.

Аналіз розрядного процесу конденсатора ємнісного накопичувача енергії дозволить провести відповідні розрахунки і вказує на можливі шляхи керування цим процесом.

## 9 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КАЕЕ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ РУХОМОГО ЕЛЕКТРОСОПОЖИВАЧА

### 9.1. Аналіз відомих конструкцій

Кінетичні акумулятори електричної енергії (КАЕЕ) мають достатньо просте конструктивне виконання, в процесі експлуатації потребують мінімального технічного обслуговування і тривалість зарядного циклу. У них значно менша, ніж у електрохімічних акумуляторних батарей.

Рівняння руху маховика, який є основним елементом КАЕЕ, дійсне в режимах заряду і розряду, має вид:

$$M_{зв} = J \frac{d\omega}{dt} - M_T. \quad (9.1)$$

Зовнішній момент  $M_{зв}$  є рушійним при розкручуванні маховика і гальмівним при розряді КАЕЕ. Динамічний момент  $M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt}$  може бути від'ємним або додатним, залежно від кутового прискорення  $\Sigma = \frac{d\omega}{dt}$ . Момент тертя залежить від аеродинамічного опору при русі маховика й опору в підшипникових опорах та ущільненнях. Після помноження обох частин рівняння (9.1) на  $\Omega dt$  і подальшого інтегрування одержано рівняння балансу енергії:

$$W = W_K - W_T, \quad (9.2)$$

де  $W = \int_{t_1}^{t_2} \omega M_{зв} dt$  – енергія, яку підводять до маховика для його розкручування

при заряді КАЕЕ або використовують для певних потреб при його розряді;

$W_K = 0,5J(\omega_1 - \omega_2) = 0,5J \left( 1 - \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \right)$  – кінетична енергія, накопичена маховиком;

$W_T = \int_{t_1}^{t_2} \omega_1 M_T dt$  – енергія втрат на тертя.

Як витікає з виразу для  $W_K$ , збільшити розмір кінетичної енергії при визначеному значенні моменту інерції  $J$  можливо при забезпеченні  $\omega_1 \rightarrow \min$

та  $\left(\frac{\omega_2}{\omega_1}\right) \rightarrow \max$ . При цьому якість електроенергії при розряді КАЕЕ повинна задовольнити споживачів. З іншого боку, згідно з [2] при розкручуванні маховика необхідно виконати вимогу  $M_{zg} = \text{const}$ , що забезпечить мінімум втрат потужності і оптимальну тривалість процесу заряду. Вказані вище вимоги важко виконати саме в КАЕЕ транспортних установок.

Так, при гальмуванні, коли двигуни електровозу використовуються як генератори електроенергії, достатньо швидко зменшується розмір напруги, що живить двигун, який розкручує маховик. При цьому зменшується інтенсивність гальмування і зростає тривалість розкрути маховика. При розряді КАЕЕ, тобто при відсіванні накопиченої маховиком енергії, безперервно зменшується частота його обертання і, відповідно, розмір вихідної напруги генератора. При цьому споживачі електроенергії, якими є тягові двигуни електровоза, будуть зменшувати обертовий момент.

З наведеного слідує, що в КАЕЕ в якості двигуна і генератора необхідно використовувати електричну машину з електромагнітним збудженням, а саме індукторну, що має безконтактну електромагнітну частину і високі механічні властивості обертових елементів конструкції [12].

У збірнику праць [10] описано конструкцію маховичного генератора для пересувних електростанцій, де використано індукторний електричний генератор із зовнішнім ротором. Стартер генератора зроблено з двома зубчастими радіальними пакетами, взаємно зсунутими в осьовому напрямі. В пазах пакетів, які в осьовому напрямі співпадають, закріплено загальну на два пакети обмотку змінного струму. Розміщено статор в середині обертового порожнистого циліндра, на внутрішній поверхні якого закріплено два зубчастих радіальних пакети, але без обмотки в пазах пакетів. Нерухому обмотку збудження, яку живлять постійним струмом, зроблено у вигляді кільцевої котушки і розміщено між пакетами ротора зовні обмотки змінного струму. Останнє ускладнює конструкцію генератора, зменшує надійність роботи та збільшує витрати обмоткового проводу.

В конструкції електричної машини, описаної в [21], вказаний вище недолік усунуто завдяки тому, що кільцеву обмотку збудження розташовано на статорі, під обмоткою змінного струму. Пропонована в [21] двопакетна індукторна машина має статор з двома радіальними пакетами із зубцями на їх зовнішній поверхні та масивного циліндричного магнітопроводу, ззовні якого закріплено вказані радіальні пакети. В пазах обох пакетів розміщено обмотку змінного струму. Обмотку збудження розташовано безпосередньо на поверхні циліндричного магнітопроводу у проміжку між пакетами статора. Ротор розміщено зовні статора. Він має циліндричний масивний корпус, в який запресовано два безобмоткові зубчасті радіальні пакети, взаємозміщені в осьовому напрямі.

Недоліком описаної електричної машини є значні витрати активних матеріалів, характерні для індукторних електричних машин. Вказаний недолік частково усувається в конструкції генератора змінного струму [22] з комбінованим збудженням, в якому крім обмотки збудження застосовано постійні магніти. Статор генератора має шихтовані радіальні пакети, зміщені в осьовому напрямі. В пазах пакетів, які в осьовому напрямі співпадають, розміщено загальну багатофазну обмотку змінного струму. Шихтовані пакети запресовано на масивний циліндричний магнітопровід. Між пакетами розміщено нерухому кільцеву обмотку збудження. Ротор генератора розміщено ззовні статора. Він має циліндричне ярмо, на внутрішній поверхні якого і проти зубчастих пакетів статора закріплено, створюючи два кільця, поперемінно масивні полюси в постійні магніти. Останні мають радіальну намагніченість і розміщені таким чином, що водному кільці магніти мають „південну” намагніченість на поверхні, а в другому – „північну”.

Недоліками зазначеного генератора є неефективне використання постійних магнітів і малий діапазон регулювання вихідної напруги.

Що стосується маховиків, то в КАЕЕ найбільш перспективним є використання маховика обідного типу, зробленого з багатьох співвісних концентричних кілець, навитих з достатньо пружного анізотропного

матеріалу. Вказаний маховик при заряді здатний одночасно накопичувати кінетичну і потенційну енергії.

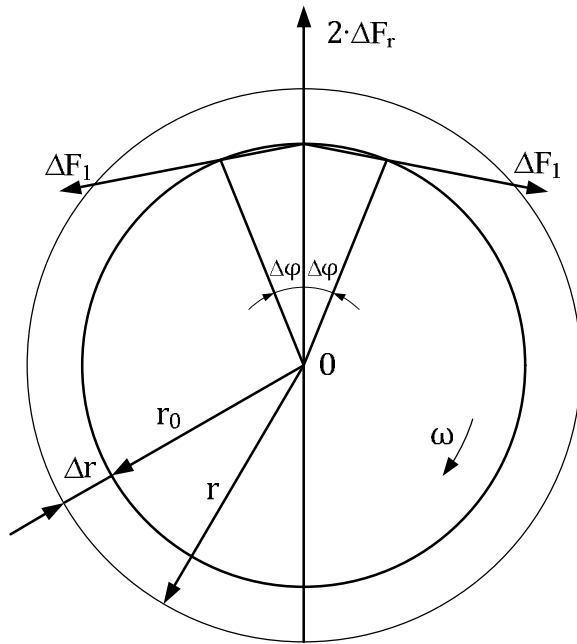


Рисунок 9.1 – Сили натягу при обертанні тонкостінного ободу

Розглянемо це більш докладно на прикладі обертального тонкостінного ободу (рис. 9.1), який має пружність  $N$ . Сила натягу в ободі у тангенціальному напрямку  $\Delta F_\varphi = N \cdot \Delta l$  пропорційна пружному подовженню  $\Delta l = 2\pi(r - r_0)$ , викликаному інерційними силами  $\Delta F_r = \Delta M \frac{U^2}{r}$ , де  $\Delta M = \frac{M}{2\pi} \Delta\varphi$  – маса елемента ободу. Сили  $\Delta F_r$  рівномірно розподілені по колу радіусом  $r$ . Рівновага елемента ободу масою  $2\Delta M$

визначається співвідношенням:

$$2\Delta F_r = 2\Delta F_\varphi \sin \Delta\varphi \approx 2\Delta F_\varphi \cdot \Delta\varphi, \quad (9.3)$$

звідки після підстановки виразів  $\Delta F_\varphi$  і  $\Delta F_r$  одержимо:

$$0,5MU^2 = 2\pi^2(r - r_0)rN, \quad (9.4)$$

тобто, накопичена кінетична енергія ободу складе:

$$W_K = 2\pi^2(r - r_0)rN.$$

Накопичена потенціальна енергія:

$$W_n = 0,5N(\Delta l)^2 = 2\pi^2(r - r_0)N.$$

Відношення:

$$\frac{W_n}{W_K} = 1 - \frac{r_0}{r}; \quad W_n = W_K \left(1 - \frac{r_0}{r}\right) \quad (9.5)$$

і загальна енергія:

$$W = W_K + W_n = W_K \left(2 - \frac{r_0}{r}\right). \quad (9.6)$$

У загальному вигляді для тонкого пружного ободу загальна механічна енергія (кінетична і потенціальна), віднесена до його маси, визначається так [23]:

$$e = \frac{W}{M} = \frac{\sigma}{2\rho} + \frac{(1-2\mu)+2}{2\rho W} \sigma^2 + \frac{(1-2\mu)}{\rho W} \sigma^3 = e_0 + e_1 + e_2, \quad (9.7)$$

де  $e_0 = \frac{\sigma}{2\rho}$  – щільність кінетичної енергії звичайного (нерозтяжного) ободу;  $e_1$  – щільність додаткової енергії, викликаной зміною моменту інерції розтягнутого ободу;  $\rho$  – щільність ободу;  $\sigma$  – напруженість матеріалу ободу;  $\mu$  – коефіцієнт Пуассона матеріалу.

Згідно розрахункам для реальних маховиків можна одержати  $e = 1,4e_0$ . При цьому  $r = 1,67r_0$ , що треба враховувати при проектуванні КАЕЕ.

## 9.2 Нова конструкція кінетичного акумулятора електричної енергії

У розробленому КАЕЕ використано обернену електричну машину індукторного типу, до складу якої входять: нерухомий статор з двома зубчастими пакетами 1 і 2 (рис. 9.2), взаємно зміщеними в осьовому напрямку і напресованими на циліндричну втулку 3 з феромагнітного матеріалу.

Пакети набрано з окремих ізольованих пластин електротехнічної сталі. В пазах пакетів, які в осьовому напрямку співпадають, розміщено котушки 4 і 5 двох обмоток змінного струму, зроблених трифазними і з можливістю з'єднання між собою послідовно або паралельно і за схемами «трикутник» або «зірка». Втулка 3 опирається на два диски 6 і 7 з центральними отворами, які по поверхні цих отворів закріплено на порожнистому валу 8. Між пакетами 1 і 2 статора розташовано кільцеву обмотку збудження 9. Вивідні провідники останньої і котушок обмотки статора прокладено через порожнистий вал.



Ротор електричної машини розміщено зовні статора. До його складу входить ярмо 10 з немагнітного матеріалу, на внутрішній поверхні якого закріплено поперемінно полюси 11 у вигляді поздовжніх пакетів з ізольованих пластин електротехнічної сталі та постійні магніти 12, які орієнтовано і намагнічено в осьовому напрямку і, як варіант, постачено полюсними наконечниками 13. Ярмо 10 опирається на боковини 14 і 15, а останні – на підшипники 16 і 17, які закріплено на валу 8. Полюсні наконечники зроблено клиновидними, скошеними в бік постійних магнітів.

На зовнішній поверхні ярма 10 ротора закріплено обід 18, навитий із стрічки пружинного матеріалу (як варіант органопласту типу „лавсан”), причому витки стрічки сполучені між собою відповідним клеєм. Ззовні ободу навито у кілька шарів (4-5) пружинну металеву сітку 19, призначення якої – запобігти розшаруванню ободу, розкиду його частинок при можливих пошкодженнях та обмежити радіальну деформацію ободу. Корпус 20 кінетичного акумулятора зроблено герметичним, а диск всередині корпусу зменшено порівняно із зовнішнім з метою зменшення втрат енергії від аеродинамічного тертя ротора.

В режимі накопичення кінетичної енергії, тобто при розкручуванні обідного маховика КАЕЕ, електричну машину, а саме обмотку статора, живлять змінним струмом від керованого перетворювача частоти, а обмотку збудження – керованим постійним струмом.

При цьому в магнітопроводі створюється магнітний потік, який проходить по втулці 3 в осьовому напрямку, по пакету 1 у радіальному напрямку, через повітряний проміжок у відповідні поздовжні пакети 11 і знову через повітряний проміжок у пакет 2. Одночасно потік від постійних магнітів 12 проходить по наступному шляху: «північний» полюс магнітів, полюсний наконечник, повітряний проміжок, пакет 1 статора, втулка 3, пакет 2 статора, знову проміжок, полюсний наконечник, «південний» полюс магнітів. Вказаний магнітний потік, як і потік обмотки збудження, пронизує витки котушок 4 і 5 обмоток пакетів, що при наявності змінного струму в останніх,

викличе появу обертового моменту, що забезпечить роботу електричної машини в режимі двигуна.

При зменшенні рівня напруги живлення змінним струмом, що має місце в транспортних установках при використанні енергії гальмування для розкручування маховика, відповідно з'єднують між собою котушки 4 і 5 обох пакетів статора для збереження на достатньому рівні обертового моменту. Так, на початку гальмування котушки 4 пакету 1 і котушки пакету 2 статора з'єднують окремо у дві трифазні обмотки за схемами „зірка”, які у свою чергу сполучають взаємно паралельно і приєднують до джерела живлення.

В режимі чергування, тобто в період після розкручування маховика, і до початку віддавання накопиченої енергії одна з трифазних обмоток вимикається від джерела живлення.

При віддаванні накопиченої кінетичної енергії електрична машина використовується в якості генератора змінного струму. Обмотку збудження 9, як і в попередньому випадку, живлять керованим постійним струмом. При обертанні ротора інерційними силами маховика магнітні потоки від обмотки збудження і постійних магнітів перетинають котушки 4 і 5 обмоток обох пакетів, що викличе появу в останніх електрорушійних сил (ЕРС). В процесі розряду КАЕЕ частота обертання маховика і, відповідно, ротора електричної машини безперервно зменшується. Для збереження ЕРС на достатньому рівні спочатку збільшують розмір струму збудження, а потім змінюють схеми з'єднання котушок 4 і 5. Так, при максимальній частоті обертання ротора котушки 4 і, окремо, котушки 5 з'єднують за схемою «трикутник», а між собою обидві схеми-паралельно. При зменшенні частоти обертання ротора котушки 4 і, окремо, котушки 5 з'єднують за схемою «зірка», а між собою – також паралельно. При подальшому зменшенні частоти обертання котушки 4 і 5 з'єднують між собою послідовно-зустрічно і разом за схемою «трикутник». І, нарешті, при мінімальній частоті обертання котушки 4 і 5 з'єднують між собою послідовно-зустрічно і разом за схемою «зірка». За рахунок такої зміни схем сполучення котушок 4 і 5 розмір ЕРС ( при

відповідному регулюванні струму збудження) залишається практично незмінним при зменшенні частоти обертання ротора майже у чотири рази відносно початкової, що дозволить збільшити розмір енергії, яку віддає КАЕЕ споживачам.

Таким чином, у розробленому КАЕЕ, завдяки використанню маховика із пружинного матеріалу, накопичується і використовується як кінетична, так і потенційна енергія, що дозволить зменшити розміри та масу маховика. Крім того, забезпечення кожного з пакетів статора окремою обмоткою змінного струму дозволить використати кілька різних варіантів ввімкнення котушок обмоток з метою одержання різних за розміром вихідних напруг електричної машини як генератора та приєднання машини в режимі двигуна до різних за розміром напруг живлення, що дозволить збільшити розмір накопиченої енергії і поліпшити якість напруги для споживачів електричної енергії.

### 9.3 Співвідношення для розрахунків КАЕЕ з маховиками обідного типу

Напружений стан в обертовому тонкому кільці близький до одновісного, тому в розрахунках приймають до уваги тільки тангенціальну напруженість  $\sigma = \rho \omega^2 r$ , де  $r$  – максимальний радіус ободу.

З умови міцності ободу максимально допустима кутова швидкість визначається так:

$$\omega_{\max} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{\sigma_{\text{д}}}{\rho}}, \quad (9.8)$$

де  $\sigma_{\text{д}}$  – допустима напруженість матеріалу ободу;  $r$  – зовнішній радіус.

Розмір кінетичної енергії, яку може накопичити КАЕЕ:

$$W_K = \frac{J \omega_{\max}^2}{2}, \quad (9.9)$$

де  $J$  – момент інерції, який для ободу розраховують за виразом:

$$J = 0,5\pi h r^2 (1 - \alpha^4) \rho K_s, \quad (9.10)$$

де  $h$  – ширина ободу;  $\alpha = \frac{r_i}{r}$ ,  $r_i$  – внутрішній радіус ободу;  $K_3$  – коефіцієнт заповнення об'єму ободу (для стрічкового ободу  $K_3=1$ ).

У першому наближенні значення  $J$  розраховують для недеформованого ободу.

З урахуванням виразів для  $\omega_{\max}$  і  $J$ , маємо

$$W_K = 0,25\pi hr^2(1-\alpha^4)\sigma_0 K_3. \quad (9.11)$$

Маса ободу:

$$M = \pi hr^2(1-\alpha^4)\rho K_3. \quad (9.12)$$

Об'єм, що заповнює обід:

$$V = \pi r^2 h. \quad (9.13)$$

Питома енергоємність маховика для кінетичної складової енергії:

$$e_K = \frac{W_K}{M} = \frac{1+\alpha^2}{4} \cdot \frac{\sigma_0}{\rho}. \quad (14)$$

Об'ємна ефективність маховика для кінетичної складової енергії:

$$\frac{W_K}{V} = \frac{1-\alpha^4}{4} \sigma_0 K_3. \quad (9.15)$$

В роботі [23] показано, що оптимальним значенням  $\alpha$  є 0,58, тобто  $\alpha_{opt} = 0,58$ . При цьому забезпечується найкраще поєднання питомої енергоємності та об'ємної ефективності обідного маховика. Так, при виготовленні ободу з органопластика  $[\sigma_0 = 1,9 \cdot 10^9 \text{ Па}, \rho = 1,35 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3]$

забезпечуються такі значення:  $\frac{W_K}{M} = 4,7 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$  і  $\frac{W_K}{V} = 4,7 \cdot 10^8 \text{ Дж/м}^3$ ,

співставні з аналогічними показниками срібно-цинкових акумуляторів.

Визначимо деякі показники при розряді КАЕЕ з синхронною електричною машиною, яка в цьому випадку працює як генератор. Електрорушійна сила, яку створює генератор  $E = K_e \omega \Phi_{\sigma}$ , де  $K_e = const$ ;  $\omega$  – кутова частота обертання ротора (маховика);  $\Phi_{\sigma}$  – магнітний потік обмотки

збудження генератора. Нехтуючи моментом тертя, визначимо  $\omega$  зі співвідношення  $M_z = -J_c \frac{d\omega}{dt}$ , де  $J_c$  – сумарний момент інерції маховика і ротора машини;  $M_z$  – електромагнітний момент генератора, причому:

$$M_z = \frac{mUE}{\omega X_d} \sin \theta = \frac{m\varepsilon E^2}{\omega X_d} \sin \theta, \quad (9.16)$$

де  $\varepsilon = \frac{U}{E} = 0,85 \div 0,9$ ;  $X_d = \omega L_d$ ,  $L_d$  – індуктивність фази генератора у поздовжньому напрямку;  $m$  – число фаз;  $\theta$  – внутрішній кут генератора.

Після підстановок у (9.16) одержимо:

$$M_z = \frac{m\varepsilon k_e^2 \Phi_{3\phi}^2}{L_d} \sin \theta = K_z \Phi_{3\phi}^2 \sin \theta, \quad (9.17)$$

де  $K_z = \frac{m\varepsilon K_e^2 \Phi_{3\phi}^2}{L_d} = const$ .

Очевидно, що

$$\omega(t) = \omega_1 - \frac{K_z \Phi_{3\phi}^2}{J_c} \int_0^t \sin \theta dt, \quad (9.18)$$

де  $\omega_1$  – початкова кутова частота обертання і, відповідно:

$$U \approx E_1 - \frac{\varepsilon K_e K_z \Phi_{3\phi}^2}{J_c} \int_0^t \sin \theta dt, \quad (9.19)$$

де  $E_1 = K_e \omega \Phi_{3\phi}$  – ЕРС генератора на початку процесу заряду КАЕЕ.

Останній вираз дозволяє проаналізувати вплив потоку збудження на розмір напруги генератора. Якщо прийняти кінцеву кутову частоту обертання  $\omega_2$ , то з виразу (9.18) можна знайти тривалість  $t_p$  розряду КАЕЕ:

$$\omega_1 - \omega_2 = \frac{K_z \Phi_{3\phi}^2}{J_c} \int_0^{t_p} \sin \theta dt. \quad (9.20)$$

Вважаючи, що за період розряду  $\sin \theta = const$ , маємо:

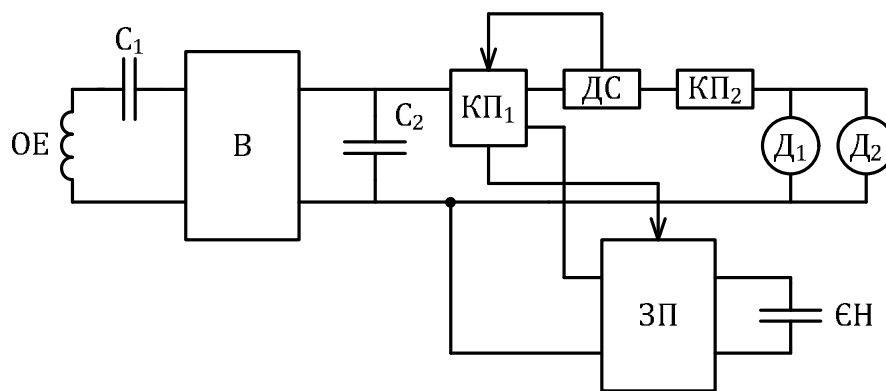
$$t_p \approx \frac{J_c \omega_1 \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1}\right)}{K_z \Phi_{3\phi}^2 \sin \theta}. \quad (9.21)$$

З останнього виразу витікає, що при збільшенні магнітного потоку збудження генератора, що потрібно для стабілізації його вихідної напруги, значно зменшується тривалість розряду КАЕЕ.

## 10 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ЄМНІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ РУХОМОГО ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧА

### 10.1 Загальні положення

Використання ємнісних накопичувачів енергії на електровозах з індуктивною передачею енергії на них (безконтактних) дозволить організувати більш ефективну роботу як системи електропостачання, так і споживачів електроенергії завдяки вирівнюванню графіків навантаження енергоприймачів на електровозах, перетворювачів частоти на вході тягової лінії і силового трансформатора, що живить систему транспорту. При цьому забезпечуються близькі до стабільного режими роботи вказаних вище елементів системи електропостачання, зменшуються втрати потужності в них та зростає надійність роботи. На рис. 10.1 наведено принципову схему електропостачання двигунів електровоза з використанням ємнісного накопичувача енергії.



ОЕ – обмотка енергоприймача;  
 С<sub>1</sub>, С<sub>2</sub> – конденсатори;  
 В – випрямляч струму;  
 КР<sub>1</sub>, КР<sub>2</sub> – керуючі пристрої;  
 ДС – давач струму двигунів Д<sub>1</sub>, Д<sub>2</sub>;  
 ЗП – зарядний пристрій;  
 ЄН – ємнісний накопичувач енергії.

Рисунок 10.1 – Принципова схема електропостачання двигунів електровоза

У схемі рис. 10.1 керуючий пристрій КР<sub>1</sub> залежно від розміру струму двигунів Д<sub>1</sub> і Д<sub>2</sub>, тобто від навантаження електровозу, змушує зарядний пристрій ЗП накопичувача змінювати струм заряду ЄН таким чином, щоб

струм в обмотці  $OE$  енергоприймача залишався практично незмінним для заданого режиму роботи електровоза. При цьому напруга живлення електродвигунів також буде практично незмінною, що спрощує їх керування і збільшить надійність роботи.

## 10.2 Ефективність використання на електровозі ємнісного накопичувача енергії

В системі електропостачання безпосередньо двигунів електровоза найстабільніші втрати потужності спостерігаються в обмотці енергоприймача  $OE$  (рис. 10.1) та в конденсаторах  $C_1$ , що забезпечують у цьому контурі стан резонансу напруг. Визначимо ці втрати при різних графіках навантаження вказаного контуру.

Втрати енергії в обмотці енергоприймача і конденсаторах  $C_1$  за визначений час  $T$  (наприклад, тривалість одного рейсу електровоза з вантажем) будуть такими:

$$\Delta W_e = \int_0^T I_e^2 R_e dt, \quad (10.1)$$

де  $I_e$  – струм обмотки;  $R_e$  – сумарний опір елементів контуру, включаючи вносимий опір через електромагнітний зв'язок з навколишнім середовищем.

Загальна потужність в енергоприймачі є активною, тобто  $S_e = P_e = E_e I_e$ , де  $E_e$  – електрорушійна сила (ЕРС) в обмотці від електромагнітного поля тягової лінії. Тоді:

$$I_e = \frac{P_e}{E_e}. \quad (10.2)$$

Зважаючи на (10.2), запишемо:

$$\Delta W_e = \int_0^T \frac{P_e^2}{E_e^2} R_e dt = K \int_0^T P_e^2 dt, \quad (10.3)$$

де  $K = \frac{R_e}{E_e^2}$ .

В останньому виразі потужність  $P_e$  залежить від навантаження електровозу і є функцією часу. ЕРС  $E_e$  визначається струмом тягової лінії,



який є стабільним, залежить від проміжку між енергоприймачем та тяговою лінією і також практично є стабільною в часі.

Розмір енергії, яку необхідно передати споживачам на електровозі за час  $T$ :

$$W_c = \int_0^T P_e dt . \quad (10.4)$$

Визначимо, як повинна змінюватись потужність  $P_e$  протягом періоду  $T$ , щоб забезпечити мінімум функціоналу (10.3) при умові, що інтеграл (10.4) є незмінним за розміром. Складемо допоміжний функціонал [24]:

$$\Delta W_e^* = \int_0^T (P_e^2 + \lambda P_e) dt . \quad (10.5)$$

Рівняння Ейлера для функціоналу (10.5) буде таким:

$$\frac{d}{dt}(P_e^2 + \lambda P_e) = 2P_e + \lambda = 0 ,$$

звідки 
$$P_e = -\frac{\lambda}{2} . \quad (10.6)$$

Після підстановки  $P_e$  у рівняння (10.4) та інтегрування маємо:

$$W_e = -\frac{\lambda}{2} T \quad \text{або} \quad \lambda = -\frac{W_e}{2} .$$

Далі, підставивши  $\lambda$  у (10.6), отримаємо:

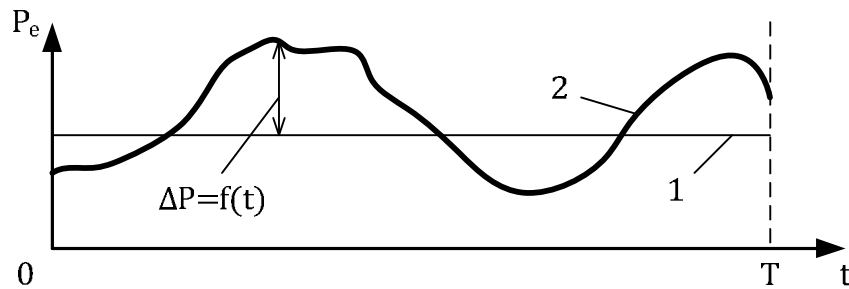
$$P_e = -\frac{W_e}{T} . \quad (10.7)$$

Отже, як це слідує з (10.7), мінімальні витрати енергії в колі обмотки енергоприймача будуть при незмінній в часі потужності  $P_e$  протягом визначеного періоду  $T$ .

Визначимо виграш, що забезпечить незмінне навантаження обмотки енергоприймача електровоза. На рис. 10.2 показано довільний графік навантаження обмотки.

Введемо позначення:  $T_B$  – сумарний час, протягом якого реальна потужність є більшою за усталену;  $T_M$  – сумарний час, протягом якого реальна, споживана двигунами електровоза, потужність є меншою за

усталену;  $\Delta P$  – різниця реальної і усталеної потужностей. Очевидно, що  $T = T_B + T_M$ .



1 – бажаний графік, який забезпечить накопичувач енергії;

2 – реальний (довільний) графік

Рисунок 10.2 – Довільний графік навантаження обмотки енергоприймача

Визначимо втрати енергії в обмотці і конденсаторах енергоприймача без ємнісного накопичувача енергії, тобто для реального графіка навантаження:

$$\Delta W_e = K \int_0^{T_B} \left( \frac{W_e}{T} + \Delta P \right)^2 dt + K \int_0^{T_M} \left( \frac{W_e}{T} + \Delta P \right)^2 dt. \quad (10.8)$$

Зробимо відповідні перетворення й одержимо:

$$\Delta W_e = K \left[ \frac{W_e^2}{T^2} (T_B + T_M) + \frac{2W_e}{T} \left( \int_0^{T_B} \Delta P dt - \int_0^{T_M} \Delta P dt \right) + \int_0^{T_B} \Delta P^2 dt + \int_0^{T_M} \Delta P^2 dt \right]. \quad (10.9)$$

За умови незмінності енергії за період  $T$  отримаємо рівняння:

$$\int_0^{T_B} \Delta P dt = \int_0^{T_M} \Delta P dt.$$

Остаточні втрати енергії:

$$\Delta W_e = K \left( \frac{W_e^2}{T^2} + \int_0^T \Delta P^2 dt \right). \quad (10.10)$$

При використанні ємнісного накопичувача енергії, що повинно забезпечити  $P_e = const$ , зі співвідношень (10.7) і (10.3) визначимо втрати енергії:

$$\Delta W_e^H = K \int_0^T \frac{W_e^2}{T^2} dt = K \frac{W_e^2}{T}. \quad (10.11)$$

Відношення втрат:

$$A = \frac{\Delta W_e}{\Delta W_e^H} = \frac{K \frac{W_e^2}{T} + K \int_0^T \Delta P^2 dt}{K \frac{\Delta W_e^2}{T}}.$$

Остаточню:

$$A = 1 + \frac{T}{W_e^2} \int_0^T \Delta P^2 dt. \quad (10.12)$$

Аналіз виразу (10.12) показує, що вирівнювання графіка навантаження контуру обмотки енергоприймача приводить до зменшення втрат енергії в ньому, тому що другий складник у виразі (10.12) в цьому випадку буде близьким до нуля.

У роботі [6] наведено експериментальні дані для струму тягового двигуна безконтактного електровоза В14: математичне сподівання струму при русі з вантажем  $I_e^M = (120 \pm 9)$  А і без нього (порожняком) –  $I_e^M = (140 \pm 6)$  А; коефіцієнт варіації відповідно  $\nu = 0,34$  і  $\nu = 0,31$ . Орієнтовно прийемо наступний графік навантаження обмотки енергоприймача (рис. 10.3).

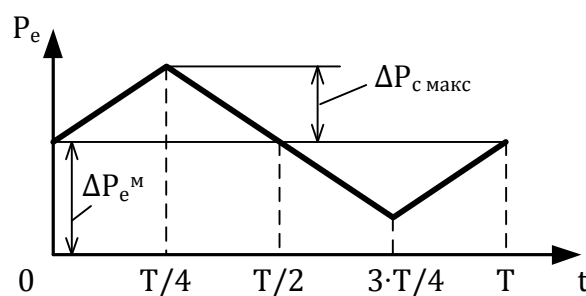


Рисунок 10.3 – Наближений графік навантаження обмотки енергоприймача

Математичне співвідношення потужності енергоприймача, що живить два двигуни електровоза при русі з вантажем:

$$P_e^M = E_e \cdot I_e^M = 205 \cdot 124,5 \cdot 2 = 51 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 51 \text{ кВт}.$$

Максимальне значення потужності:

$$P_{e_{\max}} = E_e \cdot I_e^M (1 + \nu) = 51(1 + 0,34) = 68,4 \text{ кВт.}$$

Максимальне перевищення математичного сподівання потужності:

$$\Delta P_{\max} = P_{e_{\max}} - P_e^M = P_e^M \cdot \nu = 51 \cdot 0,34 = 17,3 \text{ кВт.} \quad (10.13)$$

Зважаючи на форму наближеного графіку навантаження, запишемо:

$$\Delta P = \Delta P_{\max} \frac{4t}{T}$$

і знайдемо значення коефіцієнту:

$$A = 1 + \frac{T \cdot 4}{(E_e \cdot I_e^M)^2 \cdot T^2} \int_0^{T/4} \left( \Delta P_{\max} \frac{4t}{T} \right)^2 dt = 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{\Delta P_{\max}}{P_e^M} \right)^2. \quad (10.14)$$

Після підстановок маємо:

$$A = 1 + \frac{1}{3} \left( \frac{17,3}{5} \right)^2 = 1,04.$$

У випадку, коли графік навантаження такий, що  $\Delta P = \Delta P_{\max}$ , коефіцієнт

$$A = 1 + \left( \frac{\Delta P_{\max}}{P_e^M} \right)^2 = 1,12.$$

З (10.14) з урахуванням (10.13) одержимо більш просту формулу:

$$A = 1 + \frac{\nu^2}{3}. \quad (10.15)$$

Уведення в систему електропостачання ємнісного накопичувача  $\epsilon H$  енергії, крім корисного впливу на систему, супроводжується також втратами енергії в самому накопичувачі. Коефіцієнт корисної дії (ККД) накопичувача в режимах заряду и розряду:

$$\eta_z = 1 - \frac{\Delta W_z}{W_z}; \quad (10.16)$$

$$\eta_p = 1 - \frac{\Delta W_p}{W_p}, \quad (10.17)$$

де  $W_z$  і  $W_p$  – енергія, яку споживає та видає  $\epsilon H$  в режимах заряду і розряду відповідно;  $\Delta W_z$  і  $\Delta W_p$  – втрати енергії і режимах заряду і розряду.

З метою спрощення подальших розрахунків прийнемо  $\eta_z = \eta_p = \eta$ .

З (10.16) і (10.17) витікає:

$$\Delta W_3 = W_3(1-\eta); \quad \Delta W_p = W_p(1-\eta),$$

а сумарні втрати енергії в  $\mathcal{CH}$ :

$$\Delta W_\Sigma = \Delta W_3 + \Delta W_p = (1-\eta)(W_3 + W_p). \quad (10.18)$$

Очевидно, що  $W_p = \eta^2 W_3$  і, зважаючи на (10.18), одержимо:

$$\Delta W_\Sigma = (1-\eta)(1+\eta^2)W_3 = \frac{(1-\eta^4)}{(1+\eta)}W_3. \quad (10.19)$$

Ємнісний накопичувач має можливість заряджатися, коли  $\Delta P < 0$  (рис. 10.2), тобто протягом відрізка часу  $T_M$ . Тому:

$$W_3 = \int_0^{T_M} \Delta P dt$$

$$\Delta W_\Sigma = (1-\eta)(1+\eta^2) \int_0^{T_M} \Delta P dt. \quad (10.20)$$

Зі співвідношень (10.10) і (10.11) визначимо зменшення втрат енергії в енергоприймачі при ввімкненні в схему  $\mathcal{CH}$ :

$$\Delta W_e - \Delta W_e^H = K \int_0^{T_M} \Delta P^2 dt. \quad (10.21)$$

Порівнюючи (10.20) і (10.21), маємо можливість визначити, чи є сенс від вирівнювання графіку навантаження обмотки енергоприймача з точки зору зменшення сумарних втрат енергії в системі електропостачання:

$$B = K \int_0^T \Delta P^2 dt - (1-\eta)(1+\eta^2) \int_0^{T_E} \Delta P dt. \quad (10.22)$$

Очевидно, що при  $B > 0$  одержимо деякий економічний ефект за рахунок зменшення сумарних втрат енергії.

З виразу (10.12) для  $A$  маємо:

$$K \int_0^T \Delta P^2 dt = (A-1) \frac{K_e^2}{T} = (A-1) \frac{R_e E_e^2 I_e^2 T^2}{E_e^2 T} = (A-1) I_e^2 R_e T = (A-1) \Delta P_e T, \quad (10.23)$$

де  $\Delta P_e = I_e^2 R_e$  – витрати потужності в колі обмотки енергоприймача при математичному сподіванні струму в ньому.

Розрахуємо:

$$\Delta P_e = (124,5 \cdot 2)^2 \cdot 0,2 = 12,4 \cdot 10^3 \text{ Вт} = 12,4 \text{ кВт}.$$

Прийmemo  $A = 1,12$ ;  $\eta = 0,9$ ;  $\Delta P = \Delta P_{\max} \frac{4t}{T}$ , тоді:

$$B = (A-1)\Delta P_e T - (1-\eta)(1+\eta^2) \cdot 2 \int_0^{T/4} \Delta P_{\max} \frac{4t}{T} dt =$$

$$= (1,12-1)12,4 \cdot T - (1-0,9)(1+0,81)0,25 \cdot 17,3 \cdot T = (1,49-0,78)T = 0,71 \text{ кВт} \cdot \text{год.},$$

тобто зменшення втрат потужності в колі обмотки енергоприймача складе 0,71 кВт.

Вирівнювання графіку навантаження енергоприймача не вплине на втрати енергії у тяговій лінії, тому що розмір струму в ній забезпечується незмінним конструкцією джерела живлення. Але у самому джерелі живлення (перетворювачі частоти), силовому трансформаторі та з'єднуючих кабелях втрати енергії при цьому помітно зменшуються.

### 10.3 Використання ємнісних накопичувачів енергії для зменшення втрат енергії в кабелях тягової лінії

При роботі на відповідному маршруті тільки одного електровоза відносно великі втрати енергії спостерігаються у кабелях тягової мережі, де струм є незмінним і не залежить від кількості працюючих електровозів і їх навантаження. Для зменшення вказаних втрат енергії пропонується наступне технічне рішення.

На маршруті в даний період часу працює один електровоз, оснащений ємнісним накопичувачем (ЄН) енергії. У початковий період енергія, що передається з тягової лінії в енергоприймач електровоза електромагнітним полем забезпечує живлення двигунів електровоза і заряджання ЄН. При цьому енергія, яка поступає до енергоприймача за відрізок часу  $T$ , буде такою:

$$W_{e1} = E_e I_e T_1 = E_e (I_\delta + I_{HK}) T_1, \quad (10.24)$$

де  $E_e$ ,  $I_e$  – діючі значення електрорушійної сили (ЕРС) і струму обмотки енергоприймача, в якій забезпечено стан резонансу напруг;  $I_\delta$ ,  $I_{HK}$  – діючі значення струмів обох двигунів та накопичувача при його заряді.

У момент часу  $t = T_1$  починають автоматично зменшуватись струми в тяговій лінії й обмотці енергоприймача (практично до нуля і за короткий відрізок часу). Роботу двигунів електровоза протягом відрізка часу  $T_2$  забезпечує енергія, накопичена  $\epsilon H$ . Отже, тривалість циклу роботи електровоза з накопичувачем:  $T = T_1 + T_2$ .

При відсутності на електровозі накопичувача і такому ж навантаженні розмір енергії, необхідної для роботи електровозу впродовж часу  $T$ , складе:

$$W_{e2} = E_e I_{gc} T, \quad (10.25)$$

де  $I_{oc}$  – середнє значення струму двигунів за цикл.

Вважаючи на першому етапі розрахунків коефіцієнт корисної дії накопичувача достатньо високим, запишемо:

$$W_{e1} = W_{e2} \quad \text{або} \quad E_e I_e T_1 = E_e I_{oc} T, \quad (10.26)$$

звідки

$$I_e = I_{oc} \frac{T}{T_1} = I_{oc} \cdot n, \quad \text{де} \quad n = \frac{T}{T_1} > 1.$$

Втрати енергії в кабелях тягової лінії й обмотці енергоприймача за час  $T_1$ :

$$\Delta W_n = I_n^2 R_n T_1; \quad (10.27)$$

$$\Delta W_e = I_e^2 R_e T_1 = I_{oc}^2 R_e \frac{T^2}{T_1}, \quad (10.28)$$

де  $R_n$ ,  $R_e$  – активні опори лінії й обмотки;  $I_n$  – діюче значення струму лінії. При наявності на електровозі  $\epsilon H$  струм обмотки  $I_e > I_{oc}$ , що змусить збільшити переріз проводу обмотки та приведе до зменшення  $R_e$  також у  $n$  разів, тобто  $R_e' = \frac{R_e}{n}$ .

Втрати потужності в лінії та в обмотці енергоприймача в розрахунку на один цикл роботи тривалістю  $T$ :

$$\Delta P_n = \frac{\Delta W_n}{T} = I_n^2 R_n \frac{T_1}{T} = \frac{\Delta P_n'}{n}; \quad (10.29)$$

$$\Delta P_e = \frac{\Delta W_e}{T} = I_{dc}^2 R_e \frac{T}{T_1} = \Delta P'_e \cdot n, \quad (10.30)$$

де  $\Delta P'_l = I_l^2 R_l$ ;  $\Delta P'_e = I_{dc}^2 R_e$  – втрати потужності за умови роботи електровоза без накопичувача енергії.

Сумарні втрати потужності при використанні накопичувача:

$$\Delta P = \Delta P'_l + \Delta P_e = \frac{\Delta P'_l}{n} + \Delta P'_e \cdot n \quad (10.31)$$

і без нього:

$$\Delta P' = \Delta P'_l + \Delta P'_e. \quad (10.32)$$

Запишемо відношення:

$$\frac{\Delta P}{\Delta P'} = \frac{\Delta P'_l + \Delta P'_e \cdot n}{\Delta P'_l + \Delta P'_e}. \quad (10.33)$$

З'ясуємо, при якому значенні  $n$  виконується нерівність  $\frac{\Delta P}{\Delta P'} < 1$ :

$$n < \frac{\Delta P'_l}{\Delta P'_e} = \frac{I_l + R_l}{I_{dc} + R_e}. \quad (10.34)$$

У цьому випадку використання ємнісного накопичувача забезпечує зменшення сумарних втрат потужності в системі електропостачання електровозу.

Досліджуючи (10.33) на мінімум, одержимо оптимальне значення:

$$n_{opt} = \left( \frac{T}{T_1} \right)_{opt} = \sqrt{\frac{\Delta P'_l}{\Delta P'_e}}. \quad (10.35)$$

Після підстановки (10.35) у (10.33) маємо:

$$\left( \frac{\Delta P}{\Delta P'} \right)_{min} = \frac{2 \sqrt{\frac{\Delta P'_l}{\Delta P'_e}}}{\frac{\Delta P'_l}{\Delta P'_e} + 1} = \frac{2n_{opt}}{n_{opt}^2 + 1}. \quad (10.36)$$

У табл. 10.1 наведено результати розрахунків за останньою формулою.

Таблиця 10.1

$\frac{\Delta P'_l}{\Delta P'_e}$	1	2	3	4	5	6	7	8
-----------------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---



$\left(\frac{\Delta P}{\Delta P'}\right)_{\min}$	1	0,94	0,865	0,8	0,745	0,7	0,66	0,63
--	---	------	-------	-----	-------	-----	------	------

Так, для відомої системи електропостачання безконтактних електровозів з  $I_{\text{л}} = 150$  А;  $R_{\text{л}} = 1,26$  Ом;  $I_{\text{дс}} = 240$  А;  $R_{\text{е}} = 0,15$  Ом маємо:

$$n_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{150^2 \cdot 1,26}{240^2 \cdot 0,15}} = 1,81 \quad \text{і} \quad \left(\frac{\Delta P}{\Delta P'}\right)_{\min} = \frac{1,81 \cdot 2}{1,81^2 + 1} = 0,84.$$

При умові, що  $R'_e = \frac{R_e}{2} = \frac{0,15}{2} = 0,075$  Ом, одержимо:

$$n_{\text{opt}} = \sqrt{\frac{150^2 \cdot 1,26}{240^2 \cdot 0,075}} = 2,56 \quad \text{і} \quad \left(\frac{\Delta P}{\Delta P'}\right)_{\min} = 0,68.$$

Розрахуємо:

$$\begin{aligned} \Delta P' = \Delta P'_l + \Delta P'_e &= I_{\text{л}}^2 R_{\text{л}} + I_{\text{е}}^2 R_{\text{е}} = 150^2 \cdot 1,26 + 240^2 \cdot 0,15 = 28,3 \cdot 10^3 + 8,6 \cdot 10^3 = 32,4 \cdot 10^3 \text{ Вт} \\ &= 32,4 \text{ кВт} \end{aligned}$$

Сумарні втрати потужності при використанні СН і дискретному живленні обмотки енергоприймача:

$$\Delta P_{\min} = 0,84 \cdot \Delta P' = 0,84 \cdot 32,4 = 27,2 \text{ кВт.}$$

Зменшення втрат потужності в тяговій лінії й обмотці енергоприймача при дискретному живленні:

$$\Delta P' - \Delta P_{\min} = 32,4 - 27,2 = 5,2 \text{ кВт.}$$

З урахуванням ККД при заряді і розряді накопичувача зменшення втрат потужності складе:

$$5,2 \cdot \eta^2 = 5,2 \cdot 0,9^2 = 4,2 \text{ кВт.}$$

що значно перевищує ефект від вирівнювання графіка навантаження енергоприймача.

Запишемо для опору лінії:  $R_{\text{л}} = R_{\text{л}0} \cdot l_{\text{л}}$ , де  $R_{\text{л}0}$  – опір кабелів лінії довжиною 1 м;  $l_{\text{л}}$  – загальна довжина лінії, м. Тоді:

$$\frac{\Delta P'_{\text{л}}}{\Delta P'_e} = \frac{I_{\text{л}}^2 \cdot R_{\text{л}0} \cdot l_{\text{л}}}{I_{\text{дс}}^2 \cdot R_{\text{е}}}. \quad (10.37)$$

З табл. 10.1 видно, що відношення повинно бути не меншим двох. Отже при довжині тягової лінії:

$$l_{лг} \leq \frac{2I_{дс}^2 \cdot R_e}{I_l^2 \cdot R_{л0}}. \quad (10.38)$$

використання ємнісних накопичувачів енергії з метою зменшення втрат потужності не має сенсу. Так, для наведеного вище прикладу

$$l_{лг} \leq 915 \text{ м.}$$

### **Висновки**

1. Проведено аналіз впливу графіка навантаження енергоприймача на розмір втрат енергії в колі його обмотки. Мінімальні втрати будуть при незмінній в часі потужності навантаження. При нерівномірному графіку навантаження втрати помітно зростають (максимум до 100 %).

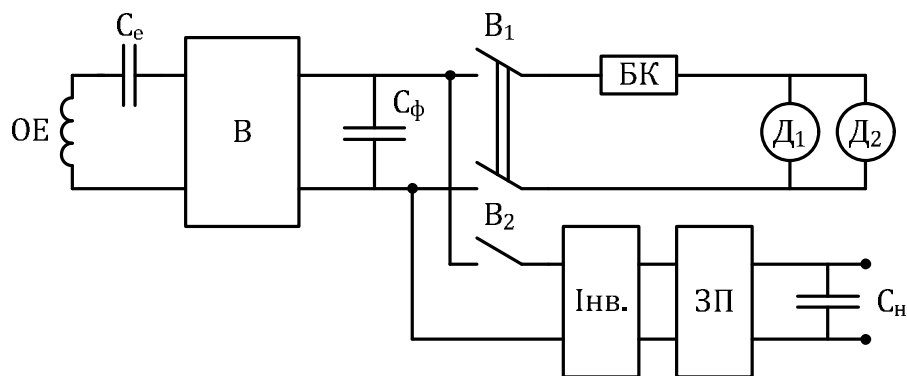
2. Визначено умови, за яких використання ємнісного накопичувача енергії на електровозі забезпечує зменшення сумарних втрат енергії.

3. Запропоновано й обґрунтовано застосування переривчастого живлення тягової лінії й обмотки енергоприймача електровозу з метою зменшення в них втрат енергії. При цьому можна одержати зниження втрат до 30 %.

## 11 АНАЛІЗ ОСНОВНИХ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ ХАРАКТЕРИСТИК НАКОПИЧУВАІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВІД ЧАСУ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ ЕЛЕКТРОВОЗУ

### 11.1 Схемні рішення щодо використання ємнісних накопичувачів енергії в шахтному електровозному транспорті

1. Для зменшення втрат потужності у тяговій лінії транспорту з індуктивною передачею енергії на електровоз в останньому, як це було зазначено раніше, встановлюють ємнісний накопичувач енергії, вхід якого приєднують, як варіант, до виходу випрямляча згідно зі схемою рис. 11.1.



ОЕ – обмотка енергоприймача;  
 $C_e, C_\phi$  – конденсатори;  
 В – випрямляч;  
 $V_1, V_2$  – вимикачі;  
 БК – блок керування;  
 $D_1, D_2$  – двигуни;  
 Інв. – інвертор напруги;  
 ЗП – зарядний пристрій накопичувача  $C_n$ .

Рисунок 11.1 – Принципова схема електропостачання двигунів електровоза з ємнісним накопичувачем енергії:

2. Для використання енергії гальмування транспорту (потягу) на період гальмування або на окрему його частину двигуни електровоза переводять в генераторний режим роботи. Енергія, що при цьому виробляється, заряджає ємнісний накопичувач.

Для ефективного електродинамічного гальмування обмотку збудження кожного з двигунів електровоза відокремлюють від обмотки якоря і приєднують до керованого джерела живлення постійним струмом. Обмотки якорів на початку гальмування вмикають взаємно-паралельно, а через деякий

час – взаємно-послідовно. Це, а також збільшення струму збудження двигунів дає змогу забезпечити достатньо високий рівень вихідної напруги обмоток якорів протягом значної частини періоду гальмування, що, у свою чергу, робить більш ефективною роботу ємнісного накопичувача.

Для подальшого збільшення ефективності використання енергії гальмування необхідно застосовувати відповідні зарядні пристрої з трансформаторами для підвищення вхідної напруги накопичувача.

**3.** Ємнісний накопичувач, що живиться вихідною напругою випрямляча  $B$  (рис. 11.1), працює при практично сталій вхідній напрузі, що не дозволяє безпосередньо забезпечити заряд конденсаторів накопичувача сталим за часом струмом, найбільш бажаним з точки зору економічності процесу. Тому виникає необхідність у використанні спеціального зарядного пристрою. Після аналізу відомих схем зарядних пристроїв [25, 26, 17] вибрано схему [28], в якій випрямляч зроблено з лінійними дроселями, увімкненими в плечі моста, суміжними відносно точки приєднання одного з виводів конденсатора накопичувача (рис. 11.2).

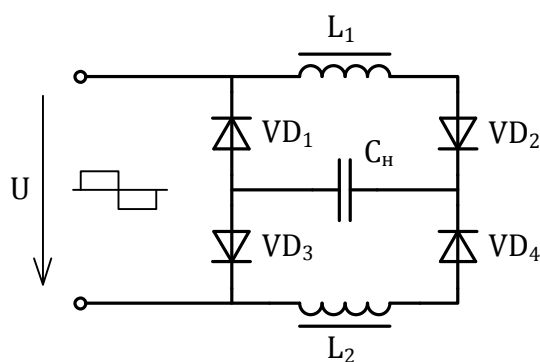


Рисунок 11.2 – Електрична схема зарядного пристрою з конденсатором  $C_n$  накопичувача

Зарядний пристрій (рис. 11.2) живиться від інвертора з прямокутною формою вихідної напруги. На рис. 3 показано струми у зарядному пристрої в довільні  $n$ -й і  $(n+1)$ -й півперіоди вхідної напруги.

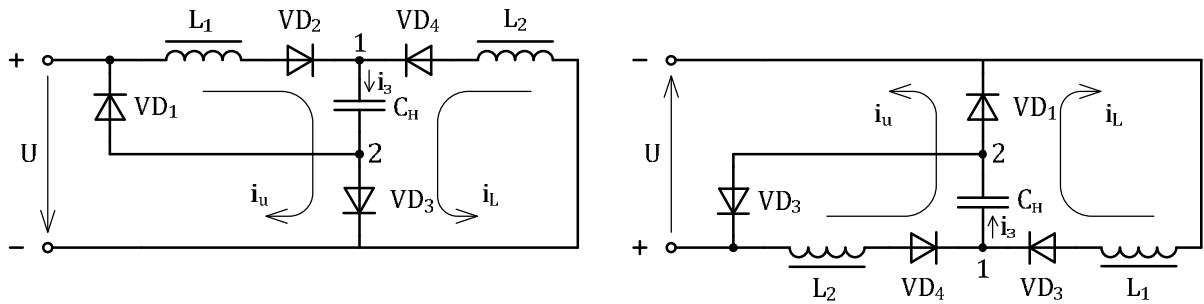


Рисунок 11.3 – Струми в схемі ЗП

На схемах рис. 11.2, 11.3 не показано активні опори дроселів, тому що вони суттєво не впливають на перехідні процеси. Вважаємо, що індуктивності дроселів не залежать від розміру струмів у них, а діоди в схемі – ідеальні. З урахуванням прийнятих допущень процеси в ЗП (рис. 11.3) в  $n$ -й півперіод вхідної напруги характеризують наступні рівняння:

$$\left. \begin{aligned} U &= L_1 \frac{di_u}{dt} + u_c \\ 0 &= L_1 \frac{di_L}{dt} + u_c \\ i_3 &= i_u + i_L \end{aligned} \right\}, \quad (11.1)$$

де  $L = L_1 = L_2$ ;  $i_u$ ,  $i_L$ ,  $i_3$  – миттєві значення вхідного струму, реактивного струму дроселя  $L_2$  і струму зарядки конденсатора  $C_H$ ;  $u_c$  – плинна напруга на  $C_H$ ;  $U$  – амплітуда вхідної напруги.

При аналізі процесів ЗП вважаємо, що  $t_3 \gg T$ , де  $t_3$  – тривалість зарядження конденсатора  $C_H$ ;  $T$  – період вхідної змінної напруги.

З аналізу схеми рис. 11.2, 11.3 витікає, що вхідний струм ЗП у кожному півперіоді вхідної напруги дорівнює струму дроселя  $L_1$  або  $L_2$ . Приріст струму кожного з дроселів за період вхідної напруги – це різниця між приростом струму за час дії імпульсу (півперіод) вхідної напруги та спадом струму під час паузи, тобто у наступному півперіоді, яка дорівнює:

$$\Delta i_L = \frac{1}{2fL} (U - 2u_c), \quad (11.2)$$

де  $f = \frac{1}{T}$  – частота вхідної напруги.

Як це слідує з (11.2) на початку заряджання, коли  $u_c \approx 0$ , приріст струмів дроселів буде максимальним, що забезпечує швидке зростання зарядного струму  $i_z$  і напруги  $u_c$ . При приріст струмів стає рівним 0, при цьому струми дроселів сягають максимальних значень, вхідні струми в обидва півперіоди також стають максимальними  $I_{u \text{ макс}}$  і зарядний струм буде:

$$I_{z \text{ макс}} \approx 2I_{u \text{ макс}}. \quad (11.3)$$

При  $u_c > 0,5U$  приріст струмів дроселів стає від'ємним і зарядний струм поступово зменшується до 0 при  $u_c = U$ .

Виконаємо аналіз роботи ЗП при частковому розряді конденсатора  $C_n$ , коли  $U_{cn} > 0,5U$ , де  $U_{cn}$  – остаточна напруга на конденсаторі. Максимальне значення вхідного струму в довільний півперіод вхідної напруги може бути визначено за формулою:

$$I_{u \text{ макс}} = T(U - u_c) / 2L. \quad (11.4)$$

Середнє значення зарядного струму у довільний півперіод:

$$i_{зсп} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} i_u dt + \frac{2}{T} \int_0^{T_L} i_L dt, \quad (11.5)$$

де час протікання струму дроселя

$$t_L = T(U - u_c) / 2u_c. \quad (11.6)$$

Після інтегрування (11.5) з урахуванням (11.1), (11.4) і (11.6) одержимо:

$$i_{зсп} = \frac{U}{4Lf} \left( \frac{U}{u_c} - 1 \right). \quad (11.7)$$

З останнього виразу, який являє собою зовнішню характеристику ємнісного накопичувача, видно залежність струму зарядки від частоти вхідної напруги зарядного пристрою при роб оті накопичувача в режимі дозарядки від напруги  $U_{cn} > 0,5U$  до  $U_{cn} = U$ . Отже, регулюючи відповідним чином частоту  $f$  вхідної напруги, маємо можливість забезпечити зарядження конденсатора  $C_n$  накопичувача незмінним (в середньому) струмом.

Відносна зміна частоти вхідної напруги ЗП для підтримки  $i_{3cp} = const$ :

$$f^* = \frac{1-U_{cn}^*}{1-U_{ck}^*}, \quad (11.8)$$

де  $U_{cn}^*$ ,  $U_{ck}^*$  – відносні напруги на конденсаторі  $C_n$  на початку дозарядки і в кінці її, що дорівнюють відповідно  $U_{cn} / U$  і  $U_{ck} / U$ ;  $f^* = \frac{f_n}{f_k}$ ;  $f_n, f_k$  – частоти вхідної напруги на початку і в кінці дозарядки.

Наприклад, якщо  $U_{cn}^* = 0,5$  і  $U_{ck}^* = 0,8$ , то

$$f^* = \frac{1-0,5}{1-0,8} = 2,5.$$

## 11.2 Тривалість зарядження ємнісного накопичувача

З розв'язання системи рівнянь (11.1) маємо:

$$\begin{aligned} i_u &= \frac{U - u_c}{L_1} t; & i_L &= -\frac{u_c}{L_2} t; \\ i_3 &= \frac{U - u_c}{L_1} t + \frac{u_c}{L} t = \frac{U}{L} t \end{aligned} \quad (11.9)$$

при умові  $L_1 = L_2 = L$ ;  $t$  – плинний час.

З рівняння  $i_3 = C_n \frac{du_c}{dt}$  отримаємо:

$$du_c = \frac{i_3 dt}{C_n} = \frac{t}{LC_n} dt. \quad (11.10)$$

За час одного півперіоду напруги  $U$  приріст напруги на конденсаторі  $C_n$ :

$$\Delta u_c = \int_0^{T/2} \frac{Ut}{LC_n} dt = \frac{UT^2}{8LC_n}. \quad (11.11)$$

Число  $n$  півперіодів  $K_1$ , потрібних для зарядження  $C_n$  до напруги  $0,5U$ :

$$K = \frac{0,5U}{\Delta u_c} = \frac{4LC_n}{T^2}. \quad (11.12)$$

Тривалість заряджання  $C_n$  до напруги  $u_c = 0,5U$ :

$$t_{31} = K \frac{T}{2} = \frac{LC_n}{T} = 2LC_n. \quad (11.13)$$

При напругах  $u_c > 0,5U$  відповідною зміною частоти  $f$  вхідної напруги можна забезпечити незмінним середнє значення зарядного струму, наприклад, таким, кий має місце при  $u_c = 0,5U$ :

$$i_3 = \frac{U}{4Lf} \left( \frac{U}{0,5U} - 1 \right) = \frac{U}{4Lf}. \quad (11.14)$$

Прийmemo  $U = 400 \text{ В}$ ,  $i_3 = 50 \text{ А}$ , тоді:

$$Lf = \frac{U}{4i_3} = \frac{400}{4 \cdot 50} = 2 \text{ Ом}.$$

Тривалість заряду накопичувача від :

$$t_{32} = C_n \int_{0,5U}^{0,8U} \frac{du_c}{i_3} = \frac{4fLC_n U}{U} (0,8 - 0,5) = 1,2LC_n f, \text{ с}.$$

При обмеженні тривалості  $t_{32}$ , граничне значення  $C_n$  буде таким:

$$C_n \leq \frac{t_{32} \cdot \eta_3}{1,2Lf}, \quad (11.15)$$

де  $\eta_3$  – коефіцієнт корисної дії ЗП.

Ємність конденсатора накопичувача визначається за умови накопичення потрібної енергії  $W_e$  при дозаряді конденсатора від  $u_c = 0,5U$  до  $u_c = 0,8U$ , виходячи з виразу:

$$W_e = \frac{C_n (U_{cn}^2 - U_{ck}^2)}{2} = \frac{C_n U^2 (0,8^2 - 0,5^2)}{2} = 0,2C_n U^2,$$

звідки

$$C_n = \frac{W_e}{0,2U^2}. \quad (11.16)$$

Витрати енергії на рух навантаженого потягу з усталеною швидкістю

$$W_p = (W_0 - i)(G_n + G_l)l_y = F_y l_y, \quad (11.17)$$



де  $W_0$  – питомий опір руху;  $i$  – ухил рейкового шляху;  $G_n + G_l$  – вага потягу та локомотиву;  $l_y$  – довжина шляху при русі з усталеною швидкістю;  $F_y =$

$(W_0 - i)(G_n + G_l)$  – сила тяги.

Прийmemo  $t_{32} = 50$  с,  $U = 400$  В,  $\eta_s = 0,85$  – коефіцієнт корисної дії ЗП;  $Lf = 2$ . Визначимо ємність конденсатора  $C_n$ , при якій забезпечуються вказані показники

$$C_n = \frac{50 \cdot 0,85}{1,2 \cdot 2} = 17,7 \text{ Ф.}$$

Енергія, яку можна використати при розряді накопичувача,

$$W_e = 0,2 C_n U^2 = 0,2 \cdot 17,7 \cdot 400^2 = 0,57 \cdot 10^6 \text{ Дж.}$$

Ця енергія забезпечить рух потягу з необхідною силою тяги  $F_y = 3800$  Н на відрітку шляху:

$$l_y = \frac{W_e}{F_y} = \frac{0,57 \cdot 10^6}{3800} = 150 \text{ м.}$$

Шлях, на якому забезпечується заряд накопичувача при русі поїзда зі швидкістю  $V_y = 5$  м/с, буде таким:

$$l_z = t_{32} \cdot V_y = 50 \cdot 5 = 250 \text{ м.}$$

Для прискорення накопичення енергії або збільшення накопичуваної енергії використовують кілька конденсаторів, що окремо й одночасно заряджаються від своїх зарядних пристроїв.

### **11.3 Зарядний пристрій ємнісного накопичувача, що використовує енергію електродинамічного гальмування поїзда**

У процесі гальмування тягові двигуни електровоза зменшують частоту обертання, що приводить до відповідного зменшення їх вихідної напруги в режимі генератора. Це не дозволяє повністю використати енергію гальмування поїзда, тому що без спеціальних пристроїв та деяких заходів

неможливо зарядити конденсатори накопичувача до потрібного рівня напруги.

Як базову схему зарядного пристрою ЗП накопичувача для вказаного випадку прийемо описану в [32] (рис. 11.4).

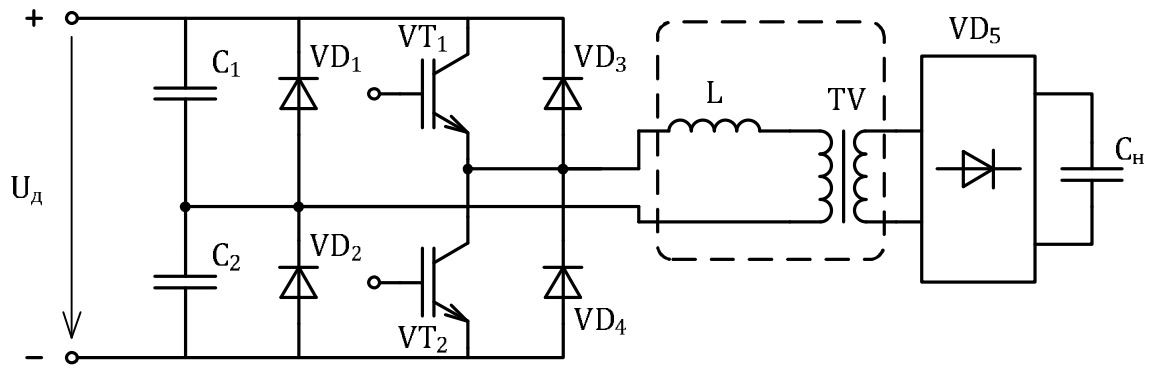


Рисунок 11.4 – Принципова схема зарядного пристрою

Згідно зі схемою ЗП є транзисторно-конденсаторним з дозуючими конденсаторами  $C_1 = C_2 = C$ , що входять до складу послідовного резонансного  $LC$ -контурі. Розмір ємності конденсаторів  $C_1 = C_2 = C$  визначає дозу енергії, яка передається конденсатору накопичувача за кожен робочий такт. Принцип дії даного ЗП полягає в резонансній зарядці дозуючих конденсаторів  $C_1, C_2$  до напруги  $U$  джерела живлення і подальшій передачу енергії цих конденсаторів в  $C_n$  через підвищуючий трансформатор  $TV$  та випрямляч  $VD_5$  при почерговому увімкненні транзисторів  $VT_1$  і  $VT_2$ .

Наведемо основні співвідношення, що характеризують роботу ЗП (рис. 11.4). На рис. 11.5 показано еквівалентну схему,

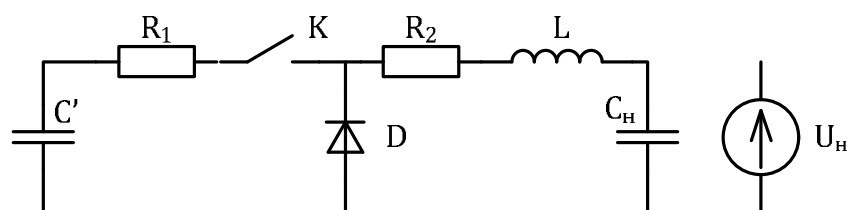


Рисунок 11.5 – Еквівалентна схема ЗП

на якій позначено:  $C' = 2C/K_{mp}^2$  – ємність, приведена до вторинної обмотки;  $C_1 = C_2 = C$ ;  $K_{mp}$  – коефіцієнт трансформації трансформатора;  $L'$  – індуктивність в колі первинної обмотки, приведена до вторинної з урахуванням індуктивності розсіювання трансформатора;  $U_n$  – напруга на конденсаторі накопичувача, що представлена як джерело з проти-ЕРС  $U_n$ ;  $R_1$  – опір, що враховує втрати потужності в транзисторах;  $R_2$  – втрати в діодах і котушці індуктивності.

Елементи схеми  $C'$ ,  $L'$  створюють коливальний контур, в якому на інтервалі часу  $[0, t_1]$  протікає струм розряду конденсатора  $C$  від напруги  $U_0$  джерела живлення до нульової напруги через індуктивність  $L$ , первинну обмотку трансформатора  $TV$  та через один з транзисторів  $VT_1$  або  $VT_2$ . Напруга на конденсаторі  $C'$  (рис. 11.5):

$$u = U_n + (E - U_n) \cos \omega_0 t, \quad (11.18)$$

де  $U_n$  – напруга на конденсаторі  $C_n$ ;  $E = U_0 \cdot K_{mp}$ ,  $U_0$  – напруга джерела живлення;  $\omega_0 = (L'C')^{-1/2}$  – власна частота коливального контуру. А розрядний струм (струм вторинної обмотки):

$$i = \frac{E - U_n}{\rho} \sin \omega_0 t, \quad (11.19)$$

де  $\rho = (L'/C')^{1/2}$  – хвильовий опір контуру.

Момент часу  $t_1$  визначимо за умови розряду конденсатора  $C'$  до нуля, тобто  $= 0$ , звідки  $\cos \omega_0 t_1 = U_n / (E - U_n)$ , а значення струму в цей момент:

$$i(t_1) = \frac{\sqrt{E(E - 2U_n)}}{\rho}. \quad (11.20)$$

В інтервалі часу  $[t_1, t_2]$  енергія, що була накопичена в індуктивності  $L'$  через зворотній діод  $D$ , поступає в конденсатор  $C_n$  і струм  $i(t)$  лінійно спадає до 0, тобто:

$$i(t) = -\frac{U_n}{L'}(t - t_1) + i(t_1), \quad (11.21)$$

звідки  $t_2$  за умови  $i(t_2) = 0$ :

$$t_2 = t_1 + \frac{L}{U_n} i(t_1).$$

Середнє значення струму заряду  $C_n$  за певний період процесу:

$$i_n = \frac{2}{T} \int_0^{t_2} i(t) dt = \frac{C' E^2}{TU_n}. \quad (11.22)$$

Очевидно, що  $\frac{T}{2} > t_2$ .

З останнього виразу після приведення параметрів до первинної обмотки одержимо зовнішню статичну характеристику накопичувача енергії:

$$U_n = \frac{2fCU_\delta^2}{i_n}. \quad (11.23)$$

Потужність зарядного пристрою

$$P_n = U_n i_n = 2fCU_\delta^2. \quad (11.24)$$

Наведені вище вирази справедливі при  $U_n \leq 0,5E$ . Також прийнято, що за час дії одного зарядного імпульсу напруга  $U_n$  залишається незмінною.

Енергія, що передається накопичувачу одним зарядним імпульсом:

$$W_i = P_n \frac{T}{2} = \frac{2}{T} \cdot \frac{T}{2} CU_\delta^2 = CU_\delta^2. \quad (11.25)$$

Накопичена в конденсаторі  $C_n$  енергія:

$$W_n = \frac{C_n \cdot U_n^2}{2}. \quad (11.26)$$

Кількість імпульсів для заряду накопичувача:

$$n = \frac{W_n}{W_i} = \frac{C_n U_n^2}{2CU_\delta^2}. \quad (11.27)$$

Максимальне значення  $U_{nm} = 0,5E = \frac{U_\delta \cdot K_{mp}}{2}$ .

Реальне значення або  $U_n \leq U_{nm}$  або  $U_n = K_3 U_{nm}$ , де  $K_3 \leq 1$ .

Запишемо

$$n = \frac{C_n (K_3 U_{nm})^2}{2CU_\delta^2} = \frac{C_n \left( \frac{K_3 U_\delta K_{mp}}{2} \right)^2}{2CU_\delta^2} = \frac{C_n}{8C} (K_3 K_{mp})^2. \quad (11.28)$$

При виборі  $U_{nm} = 1,1U_\delta$ ,  $K_{mp} = 1,1 \cdot 2 = 2,2$ ,  $K_3 = 0,9$  одержимо  $n = \frac{C_n}{2C}$ .

Тривалість заряду накопичувача:

$$t_3 = n \frac{T}{2} = \frac{C_n}{4C} T = \frac{C_n}{4Cf}, \quad (11.29)$$

де  $f = \frac{1}{T}$ .

Запишемо вираз для напруги  $U_n$ :

$$U_n = \frac{1}{C_n} \int_0^t i_n dt = 2f \frac{C}{C_n} U_\delta^2 \int_0^t \frac{dt}{U_n}. \quad (11.30)$$

З розв'язку (11.30) одержимо залежність  $U_n$  від часу:

$$U_n = 2U_\delta \sqrt{f \frac{C}{C_n} t}. \quad (31)$$

Коли  $U_n = U_{нм} = 0,5U_\delta K_{mp}$ , тоді тривалість заряду  $C_n$  буде:

$$t_3 = \left( \frac{U_n}{2U_\delta} \right)^2 = \frac{C_n}{C} \cdot \frac{1}{f} = \frac{(K_{mp} K_3)^2}{16f} \cdot \frac{C_n}{C}. \quad (11.32)$$

При  $K_{mp} \cdot K_3 = 2$ , маємо  $t_3 = \frac{C_n}{4Cf}$ , що співпадає з попередньо одержаним результатом. Тут  $f = \frac{1}{T}$ , де  $T$  – період імпульсів керування транзисторами.

Режим роботи ЗП при переривчастому струмі, який забезпечує безструмову комутацію силових транзисторів та діодів має місце в діапазоні напруг накопичувача  $U_{zp}^* < U_n^* \leq 1$ , де  $U_n^* = \frac{2U_n}{K_{mp} U_\delta}$  – відносне значення зарядної

напруги;  $U_{zp}^*$  – відносне значення її нижнього граничного рівня

$$U_{zp}^* = U_{zp}^* \frac{K_{mp} U_\delta}{2}.$$

Напруга  $U_{zp}^*$  визначається зі співвідношення:

$$T^* = \frac{2}{\pi} \left( \frac{1}{2} \arccos \frac{U_{zp}^*}{U_{zp}^* - 2} + \frac{\sqrt{1 - U_{zp}^*}}{U_{zp}^*} \right), \quad (11.33)$$

де  $T = \frac{T}{T_0}$ ;  $T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$ .

Результати розрахунків за формулою (11.33) занесені до таблиці 11.1.

Таблиця 11.1

$U_{zp}^*$	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$T^*$	1,51	1,3	1,18	1,09	1,03	1,0

З таблиці видно, що при забезпеченні періоду імпульсів керування транзисторами, наприклад  $T_0 = 1,18 \frac{2\pi}{\omega_0}$ , зарядний пристрій буде працювати при переривчастому струмі в процесі зарядження  $C_n$  від напруги  $U^* = 0,7$  до  $= 1$ .

Тривалість зарядження  $C_n$  від напруги  $U_{n1}$  до напруги  $U_{n2}$ :

$$\Delta t_z = \left( \frac{C_n}{C} \right) \frac{U_{n2}^2 - U_{n1}^2}{(2U_\delta)^2} \cdot \frac{1}{f}. \quad (11.34)$$

На початковому стані зарядження конденсатора  $C_n$  накопичувача до напруги  $U_{zp}$ , середнє значення потужності  $P$ , що споживається ЗП і далі передається в  $C_n$ , зростає від 0 до максимальної  $P_{\max}$ , що зменшує тривалість зарядження. При цьому дещо зменшується коефіцієнт використання джерела живлення ( $K_\delta = 0,8-0,9$ ).

На основному етапі розрядження в діапазоні напруг від  $U_{zp}$  до  $U_{nm}$  потужність  $P$  при  $U_\delta = const$ ,  $f = const$  залишається незмінною і рівною  $P = P_{\max} = 2CU_\delta^2 f$ . При цьому коефіцієнт використання джерела живлення  $K_\delta = 1$ , тобто максимальний.

При зарядженні конденсатора  $C_n$  накопичувача в режимі електродинамічного гальмування двигунів електровоза в процесі заряджання зменшується напруга джерела живлення  $U_\delta$ , що приведе до зменшення напруги  $U_{nm}$  та не до використання енергії гальмування. Запишемо (11.23) у вигляді:

$$U_n = \frac{2CU_\delta^2}{i_n T}. \quad (11.35)$$

З останнього виразу видно, що для забезпечення  $U_n = const$  при даному струмі  $i_n$  необхідно зі зменшенням  $U_\delta$  зменшувати період  $T$  імпульсів керування ЗП таким чином:

$$T = \left( \frac{U_\delta}{U_{\delta c}} \right)^2 \cdot T_c = \gamma^2 T_c, \quad (11.36)$$

де  $U_{\delta c}$ ,  $T_c$  відповідають режиму при стабільному  $U_\delta$ ;  $\gamma = \frac{U_\delta}{U_{\delta c}}$ .

При зменшенні  $T$  зарядний пристрій може перейти в режим безперервного струму, що приведе до збільшення втрат потужності в ЗП, але прискорить заряджання  $C_n$  і збільшить гальмівний момент.

При потребі зменшення втрат потужності в ЗП необхідно забезпечити період  $T$  по (11.33), тоді:  $T_c = \frac{T}{\gamma^2}$ , а частота

$$f_c = \gamma^2 f \quad (11.37)$$

і в режимі заряджання  $C_n$  частоту імпульсів керування необхідно збільшувати від  $f_c$  до  $f$ .

### 11.4 Вибір параметрів накопичувача

За умови балансу енергії в кінці зарядного процесу маємо

$$\frac{U_n^2 C_n}{2} = n C U_\delta^2. \quad (11.38)$$

Звідки відношення

$$\frac{C_n}{C} - 2n \left( \frac{U_\delta}{U_n} \right)^2 = 2 \frac{t_3}{T/2} \left( \frac{U_\delta}{U_n} \right)^2 = 4 f t_3 \left( \frac{U_\delta}{U_n} \right)^2,$$

де  $U_n = K_3 U_{nm} = \frac{U_\delta K_3 K_{mp}}{2}$ . Тоді

$$\frac{C_n}{C} - 2n \left( \frac{U_\delta}{U_n} \right)^2 = 4 f t_3 \left( \frac{2U_\delta}{U_\delta K_3 K_{mp}} \right)^2 = \frac{16 f t_3}{(K_3 K_{mp})^2}. \quad (11.39)$$

Прийmemo  $f = 1 \cdot 10^4$  Гц,  $t_3 = 50$  с,  $K_3 K_{mp} = 2$ . Одержимо

$$\frac{C_n}{C} = \frac{16 \cdot 1 \cdot 10^4 \cdot 50}{4} = 2 \cdot 10^6.$$

При  $C_n = 20 \text{ Ф}$ ,  $C = \frac{20}{2 \cdot 10^6} = 10 \cdot 10^{-6} = 1 \cdot 10^{-5} = 10 \text{ мкФ}$ .

Прийmemo  $T = 1,5T_0$ , тоді  $T_0 = \frac{T}{1,5}$ ,

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0} = \frac{2\pi}{T} \cdot 1,5 = 2\pi f \cdot 1,5.$$

Звідки (якщо  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C'L}}$ ) знайдемо:

$$L = \frac{1}{\omega_0^2 C} = \frac{K_{mp}^2}{\omega_0^2 2C} = \frac{2,2}{(3 \cdot 3,14 \cdot 10^4)^2 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-5}} = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ Гн} = 2,7 \cdot 10^{-2} \text{ мГн}.$$

Тривалість заряджання конденсатора  $C_n = 20 \text{ Ф}$ , від напруги  $U_{n1} = 0,7U_0$  до  $U_{n2} = 0,9U_0$ :

$$\Delta t_3 = 2 \cdot 10^6 \frac{(0,81 - 0,49)}{4 \cdot 10^4} = 0,16 \cdot 10^2 \text{ с}.$$

## Висновки

Розглянутий зарядний пристрій має наступні важливі достоїнства:

- відносно малі масу та габарити;
- високі енергетичні характеристики та надійність роботи завдяки простоті схеми й алгоритму керування;
- принципова можливість використання індуктивності розсіювання трансформатора в якості елемента резонансного контуру, що спрощує конструкцію ЗП;
- можливість ефективного використання при зменшенні напруги живлення.



## **12 УЗГОДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА РЕЖИМІВ РОБОТИ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕНЕРГІЇ З ЕЛЕМЕНТАМИ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ РУХОМОГО ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧВ З ІНДУКТИВНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ**

### **12.1 Використання накопичувачів енергії для забезпечення стабільної роботи системи електропостачання з рухомими електроспоживачами**

Використання накопичувачів енергії в системі електропостачання шахтного електровозного транспорту дозволить вирішити кілька важливих проблем. По-перше – з’явиться можливість раціонально використати енергію гальмування електровозів, по друге – зробити більш стабільним загальне навантаження тягової лінії і високочастотного джерела живлення на її вході і, нарешті, - одержать додаткове джерело живлення, що збільшить надійність електропостачання.

Сучасні «швидкодіючі» накопичувачі енергії – ємнісні або кінетичні – для запасання значних об’ємів енергії вимагають відповідних геометричних об’ємів, чого не можуть забезпечити звичайні шахтні електровози. Тоді виникає необхідність створення стаціонарних накопичувачів енергії, розміщених у кількох місцях по довжині транспортної магістралі і зв’язаних з електровозами безконтактним способом, тобто с індуктивною передачею енергії до них. Один із варіантів системи електропостачання зі стаціонарними накопичувачами енергії розроблено в ході виконання цієї науково-дослідницької роботи.

Пропонована система електропостачання безконтактного електровоза містить основну тягову лінію з двох кабелів 1 і 2, взаємно зміщених по ширині і з ввімкненими послідовно конденсаторами 3 (рис. 12.1). По довжині лінії зроблено кілька транспозицій її кабелів ( на рис. 12.1 показано дві транспозиції). Допоміжну тягову лінію також зроблено з двох кабелів 4 і 5 з

транспозиціями по довжині і з ввімкненими послідовно конденсаторами 6. Лінію розміщено на ділянці, кратній за розміром проміжку між сусідніми пунктами транспозиції кабелів основної лінії (на рис. 12.1, як варіант, довжина ділянки дорівнює одному такому проміжку) і поблизу місця зупинки транспортного засобу або на проміжку транспортної колії з ухилом. Кабелі допоміжної лінії прокладено впритул до відповідних кабелів основної лінії, а пункти їх транспозиції зроблено посередині між такими останньою.

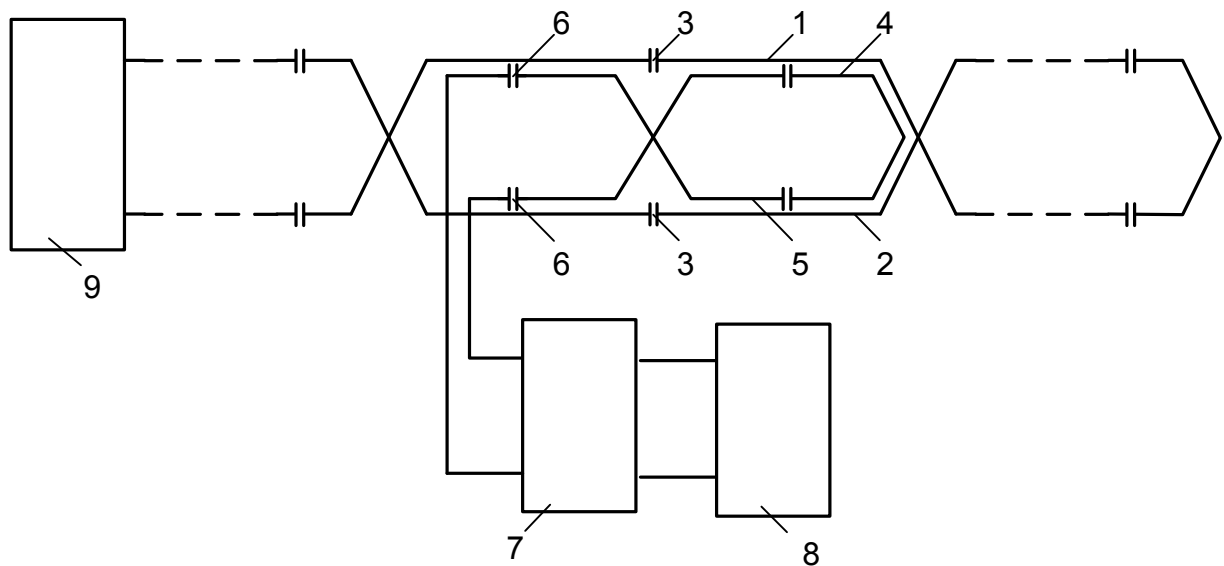


Рисунок 12.1 – Схема системи електропостачання безконтактного електровоза з накопичувачем енергії

З одного краю кабелі 4 і 5 допоміжної лінії з'єднано між собою, а з протилежного – ввімкнено до реверсивного інвертора 7. З іншого боку до інвертора 7 приєднано накопичувач енергії 8, ємнісний або електромеханічний, який розміщено нерухомо поряд з транспортною колією. Розмір конденсаторів 6 зроблено таким, що забезпечує частоту власних електричних коливань  $f_d$  контуру допоміжної лінії не меншою  $k \cdot f_0$ , де  $f_0$  – частота власних електричних коливань контуру основної лінії;  $k = 5d + 2\sqrt{25d^2 + 1}$ ,  $d$  – більше за розміром значення згасання будь-якої з двох тягових ліній. Кабелі 1 і 2 основної тягової лінії приєднано до джерела

високочастотного струму 9 на початку транспортної магістралі і з'єднано між собою в її кінці.

Система електропостачання включає також енергоприймач на електровозі з магнітопроводом, в пазах якого розміщена обмотка. Обмотку поділено на окремі групи витків 10 (рис. 12.2), які з'єднані між собою послідовно посередництвом конденсаторів, кожний з двох частин – першої 11 і другої 12, ввімкнених взаємно паралельно. В електричне коло кожної другої частини введено вимикач 13. Співвідношення ємностей першої  $C_1$  та другої  $C_2$  частин зроблено таким :  $C_1/C_2 = \frac{1}{k^2 - 1}$ , де значення  $k$  розраховують за наведеною вище формулою. Загальну ємність конденсаторів  $C = n(C_1 + C_2)$  вибрано такою, що забезпечує в контурі обмотки енергоприймача стан резонансу напруг на частоті струму живлення основної тягової лінії (  $n$  – кількість груп витків обмотки).

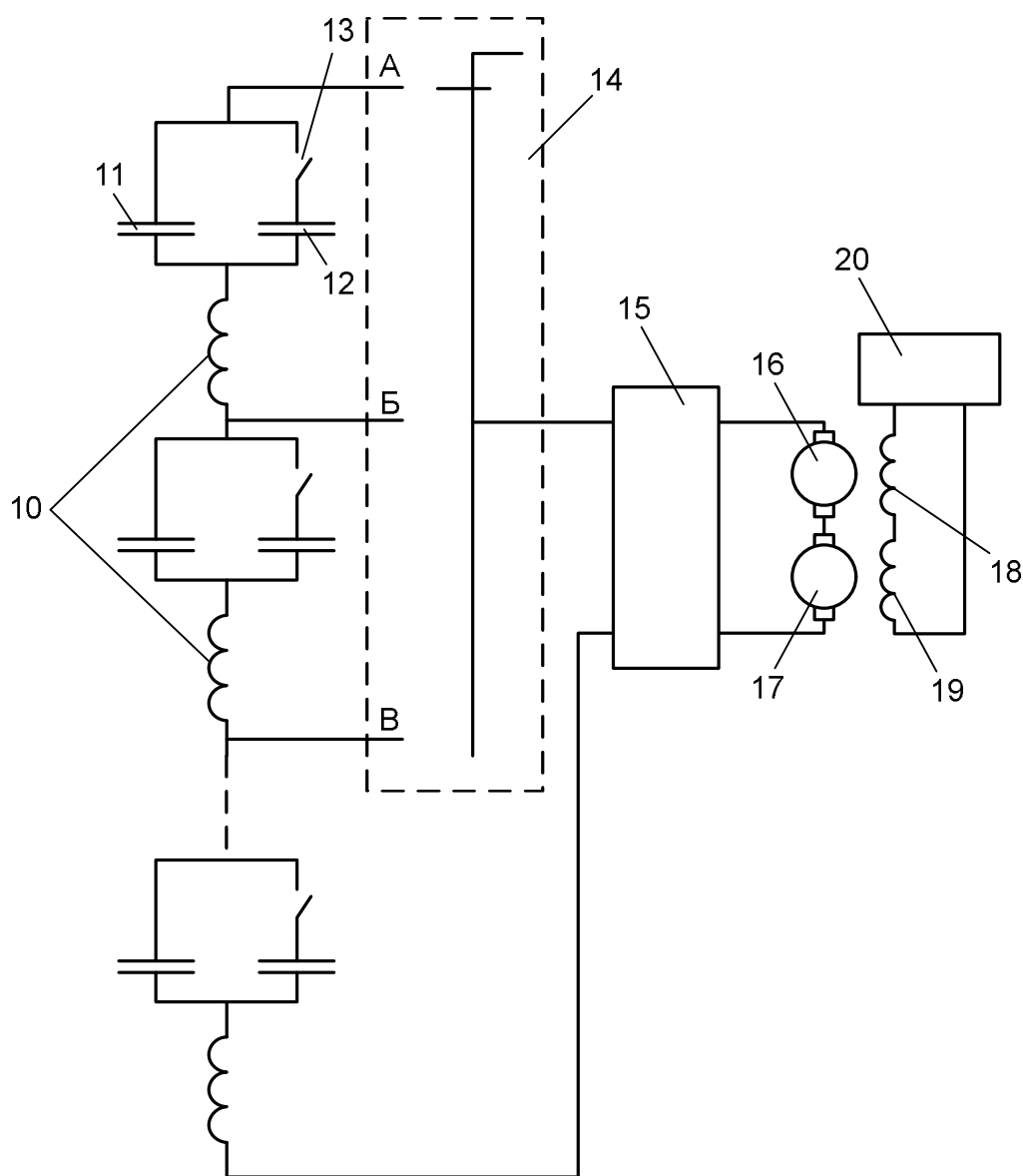


Рисунок 12.2 – Схема системи електропостачання безконтактного електровоза з модернізованою обмоткою енергопіймача

Виводи груп витків 10 обмотки приєднано до вхідних клем перемикача 14, вихід якого сполучено зі входом випрямляча 15, який зроблено з можливістю роботи інвертором у зворотному напрямку. До виходу випрямляча 15 приєднують обмотки тягових двигунів електровоза у характерному для них режимі роботи. У періоди гальмувань транспортного засобу до входу випрямляча 15, ввімкненого як інвертор, приєднують обмотки якорів 16 і 17 двигунів, які можуть бути сполучені між собою паралельно або послідовно (на рис. 12.2 наведено схему з послідовним з'єднанням). При цьому, обмотки збудження 18 і 19 з'єднують, як варіант, взаємно послідовно

і вмикають до виходу керованого джерела живлення 20 постійного струму. Частоту струму на виході інвертора 15 роблять близькою до частоти власних електричних коливань контура допоміжної тягової лінії і такою, що забезпечує резонанс напруг у контурі обмотки енергоприймача у вимкненому стані вимикачів 13.

Система електропостачання працює таким чином. Вводять в роботу джерело живлення 9 основної тягової лінії. Послідовно ввімкнені в обидва кабелі лінії конденсатори 3 забезпечують частоту власних електричних коливань  $f_0$ , близькою до частоти струму живлення лінії. На електровозі переводять у замкнене положення вимикачі 13, що робить частоту власних електричних коливань контура обмотки енергоприймача близькою до частоти струму живлення основної тягової лінії. З електричного кола останньої посередництвом електромагнітної індукції в обмотку енергоприймача передається енергія змінного струму, яка після перетворення випрямлячем 15, ввімкненого у прямому напрямі, живить тягові двигуни і забезпечує рух електровоза.

У періоди гальмувань транспортного засобу тягові двигуни переводять у генераторний режим роботи, для чого обмотки збудження 18 і 19 тягових двигунів з'єднують між собою паралельно або послідовно і разом приєднують до виходу керованого джерела постійного струму 20 (рис. 12.2). Обмотки якорів 16 і 17 двигунів з'єднують між собою, як варіант, послідовно і сполучують з випрямлячем 15, ввімкненого для роботи інвертором. Розмикають вимикачі 13, що робить частоту власних електричних коливань кола обмотки енергоприймача близькою до частоти змінного струму на виході інвертора-випрямляча 15. Після вводу в роботу джерела постійного струму 20 і руху транспортного засобу виникає напруга в обмотках якорів 16 і 17, яка посередництвом 15 викликає змінний струм в обмотці енергоприймача. Змінний магнітний потік, який виникає при цьому в обмотці, наводить електрорушійні сили (ЕРС) в електричних колах основної і допоміжної тягових ліній. У колі допоміжної лінії, частота власних

електричних коливань якого близька до частоти наведеної в ній ЕРС, остання викликає відповідний змінний струм, який посередництвом інвертора 7 в режимі роботи випрямлячем забезпечує заряджання накопичувача енергії 8. ЕРС у колі основної лінії також викликає струм, який за розміром не перевищує 0,1 струму допоміжної лінії, що пояснюється різницею між частотою власних електричних коливань  $f_0$  і частотою ЕРС, яка близька до значення  $k \cdot f_0$ . Інтенсивність гальмування електровоза регулюють шляхом зміни струму збудження в обмотках 18 і 19 (рис. 12.2) та переміщенням рухомого контакту перемикача 14 із положення А у наступні положення Б і В. Після заряджання накопичувача 8 до граничного рівня, можливо, за декілька періодів гальмування інвертор 7 перемикається в режим «очікування». При потребі використання енергії накопичувача 8, за відповідним сигналом з електровоза інвертор 7 вводиться в роботу і забезпечує протікання у кабелях 5,6 допоміжної тягової лінії змінного струму, частота якого близька до частоти власних електричних коливань контура цієї лінії. Далі, розмикають вимикачі 13 у електричному колі обмотки електроприймача, що робить частоту власних електричних коливань цього кола близькою до частоти струму допоміжної лінії. Змінний магнітний потік останньої викликає появу в обмотці енергоприймача ЕРС, яка посередництвом випрямляча 15, ввімкненого у прямому напрямі, живить тягові двигуни електровоза. Більш глибоке розрядження накопичувача 8 і, відповідно, віддача більшої за розміром енергії тяговим двигунам здійснюється переміщенням рухомого контакту перемикача 14 у напрямі від положення А до наступних положень Б і В.

Введення в систему електропостачання безконтактного електровоза допоміжної тягової лінії, приєднаної через реверсивний інвертор до накопичувача енергії, забезпечить накопичення енергії гальмування транспортного засобу та її ефективне використання в подальшому.

Розташування кабелів допоміжної лінії впритул до відповідних кабелів основної та розміщення пунктів транспозиції допоміжної лінії посередині

між такими основної лінії забезпечить мінімальний електромагнітний вплив однієї лінії на другу.

Забезпечення частоти власних електричних коливань  $f_d$  контуру допоміжної тягової лінії не меншої  $k \cdot f_0$ , де  $k = 5d + 2\sqrt{25d^2 + 1}$ ;  $f_0$  – частота власних електричних коливань контуру основної тягової лінії,  $d$  – більше за розміром згасання будь-якої з двох тягових ліній, та вибір частоти струму інвертора на електровозі, близькою до  $f_d$ , робить ефективною передачу енергії у контур допоміжної лінії і практично унеможливорює передачу її у контур основної лінії.

Поділ кожного з конденсаторів у колі обмотки енергоприймача на дві частини – першу та другу і вимкнення останніх у періоди роботи допоміжної тягової лінії, тобто у періоди накопичення та використання енергії гальмування транспортного засобу, забезпечить ефективність передачі енергії від допоміжної лінії у контур обмотки енергоприймача і у зворотному напрямку.

Сполучення виводів груп витків обмотки енергоприймача з вихідними клемми перемикача з можливістю зміни кількості груп, ввімкнених до входу випрямляча-інвертора, та уведення регульованого джерела постійного струму для живлення обмоток збудження тягових двигунів забезпечить більш ефективно використання накопичувача енергії.

У початковому стані накопичувач 8 (рис. 12.1) частково (його окремі секції) заряджається від стороннього джерела енергії або від основної тягової лінії. В останньому випадку треба тимчасову усунути транспозицію кабелів допоміжної тягової лінії на відповідній ділянці основної за допомогою автоматичних перемикачів.

Кількість накопичувачів, які встановлюють по довжині відкотних виробок, приймають у два рази меншою кількості працюючих електровозів або по одному накопичувачу на 1 км. довжини виробки. Якщо накопичувач енергії емнісного типу, тоді раціонально зробити його з кількох секції, які можна окремо заряджати і розряджати.

Керування системою електропостачання роблять таким, щоб забезпечити стабільне (практично незмінне) навантаження основної тягової лінії у всіх можливих режимах роботи електровозів, забезпечити раціональний розподіл енергії між основною тяговою лінією і накопичувачами енергії – стаціонарними та встановленими на електровозах, а також гарантувати мінімально необхідний запас енергії на випадок аварії.

## 12.2 Використання накопичувального блоку для вирівнювання графіку навантаження електровозу

На попередніх етапах було встановлено, що для вирівнювання графіку навантаження електровозу доцільніше встановити накопичувальний блок між джерелом живлення постійної напруги (випрямляч електровозу) та навантаженням (блок керування двигунами та самі двигуни).

Таке підключення може бути спрощено зображено як на рис. 12.3.

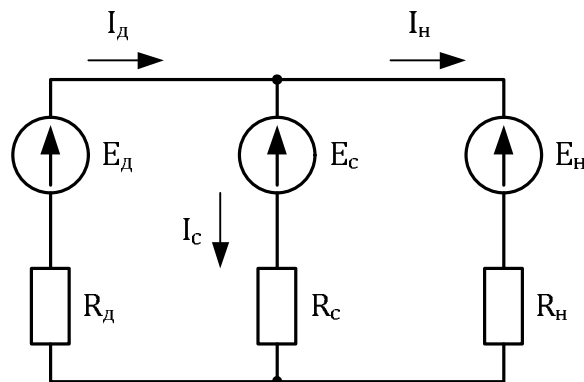


Рисунок 12.3 – Спрощена схема встановлення накопичувача на електровоз в режимі зарядження

На схемі:  $A_a$ ,  $A_{\bar{a}}$ ,  $A_i$  – ЕРС джерела ємнісного накопичувального блоку навантаження відповідно;  $R_a$ ,  $R_{\bar{n}}$ ,  $R_i$  – опори ланцюгів джерела, ємнісного накопичувального блоку, навантаження відповідно;  $I_a$ ,  $I_{\bar{n}}$ ,  $I_i$  – струми джерела, ємнісного накопичувального блоку, навантаження відповідно.

Визначимо значення струмів в гілках схеми, прийнявши, що решта параметрів відома. Для цього за законом Кірхгофа складемо систему рівнянь:



$$\begin{cases} I_{\bar{a}} - I_{\bar{n}} - I_i = 0 \\ I_{\bar{a}} R_{\bar{a}} + I_{\bar{n}} R_{\bar{n}} + 0 = E_{\bar{a}} - E_{\bar{n}} \\ 0 - I_{\bar{n}} R_{\bar{n}} + I_i R_i = E_c - E_i \end{cases} \quad (12.1)$$

Розв'язавши систему, отримаємо:

$$I_{\bar{a}} = \frac{E_{\bar{a}} R_{\bar{n}} + E_{\bar{a}} R_i - E_{\bar{n}} R_i - E_i R_{\bar{n}}}{R_{\bar{a}} R_{\bar{n}} + R_{\bar{a}} R_i + R_{\bar{n}} R_i}; \quad (12.2a)$$

$$I_{\bar{n}} = -\frac{E_{\bar{n}} R_{\bar{a}} - E_{\bar{a}} R_i - E_i R_{\bar{a}} + E_{\bar{n}} R_i}{R_{\bar{a}} R_{\bar{n}} + R_{\bar{a}} R_i + R_{\bar{n}} R_i}; \quad (12.2б)$$

$$I_i = \frac{E_{\bar{a}} R_{\bar{n}} + E_{\bar{n}} R_{\bar{a}} - E_i R_{\bar{a}} - E_i R_{\bar{n}}}{R_{\bar{a}} R_{\bar{n}} + R_{\bar{a}} R_i + R_{\bar{n}} R_i}. \quad (12.2c)$$

Встановивши датчики струму в ланцюгах джерела та навантаження, з'являється можливість корегувати струм накопичувача таким чином, щоб струм джерела залишався незмінним, тим самим забезпечивши вирівнювання графіку навантаження електровоза.

Підставимо спочатку значення струму  $I_c$  у перше рівняння системи (12.1), а в результат першої підстановки – значення  $E_i$ , виражене з рівняння для струму  $I_i$  (12.2в). Розв'язавши отриману рівність відносно  $E_c$ , отримаємо закон керування накопичувальним блоком по напрузі:

$$E_{\bar{n}} = E_{\bar{a}} - I_{\bar{a}} R_{\bar{a}} + R_{\bar{n}} (I_i - I_{\bar{a}}). \quad (12.3)$$

З іншого боку відповідно до спрощеної схеми встановлення накопичувача (рис. 12.3), та виходячи з першого рівняння формули (12.1), що пов'язує між собою величини струмів в ланцюзі джерела  $I_{\bar{a}}$ , в ланцюзі накопичувального блоку  $I_c$  та ланцюзі навантаження  $I_i$ , може бути отриманий закон керування накопичувальним блоком по струму:

$$I_{\bar{n}} = I_{\bar{a}} - I_i. \quad (12.4)$$

На попередніх етапах було встановлено, що при використанні накопичувача для вирівнювання графіка навантаження доцільніше використовувати зарядно-розрядний пристрій на базі мостової схеми. Для цієї схеми було знайдено середній зарядний струму:

$$I_{\bar{n}0} = \frac{U_{\zeta} \left( 2L \left( e^{\frac{R_c T}{2L}} - 1 \right) + R_c T \right)}{TR_c^2}, \quad (12.5)$$

де  $U_{\zeta}$  – напруга джерела заряду;  $L$  – індуктивність дозуючих котушок;  $R_c$  – опір зарядного ланцюгу;  $T$  – період роботи схеми.

Відповідно до спрощеної схеми, що розглядається, напруга зарядження:

$$U_{\zeta} = E_{\bar{a}} - I_{\bar{a}} R_{\bar{a}}, \quad (12.6)$$

а опір зарядного ланцюга  $R_c = R_{\bar{n}}$ .

З урахуванням заміни рівняння (5) запишеться так:

$$I_{\bar{n}0} = \frac{(E_{\bar{a}} - I_{\bar{a}} R_{\bar{a}}) \cdot \left( 2L \left( e^{\frac{R_c T}{2L}} - 1 \right) + R_c T \right)}{TR_c^2}. \quad (12.7)$$

Підставимо струм  $I_{\bar{n}0}$  до рівняння (12.4) як струм накопичувального блоку:

$$\frac{(E_{\bar{a}} - I_{\bar{a}} R_{\bar{a}}) \cdot \left( 2L \left( e^{\frac{R_c T}{2L}} - 1 \right) + R_c T \right)}{TR_c^2} = I_{\bar{a}} - I_i,$$

або

$$\frac{(E_{\bar{a}} - I_{\bar{a}} R_{\bar{a}})}{R_c} \cdot \left( \frac{2L}{R_c T} \left( e^{\frac{R_c T}{2L}} - 1 \right) + 1 \right) = I_{\bar{a}} - I_i. \quad (12.8)$$

Прийmemo

$$\frac{R_c T}{2L} = a, \quad (12.9)$$

тоді рівняння (12.8) можна записати так:

$$\frac{1}{a} (e^{-a} - 1) = \frac{1 - e^a}{a \cdot e^a} = \frac{(I_{\bar{a}} - I_i) R_{\bar{a}}}{E_{\bar{a}} - I_{\bar{a}} R_{\bar{a}}} - 1. \quad (12.10)$$

Проаналізуємо функцію, що описується лівою частиною рівняння (12.10):

$$f(a) = \frac{1 - e^a}{a \cdot e^a}. \quad (12.11)$$

Функція має характерні границі:

$$\lim_{a \rightarrow -\infty} f(a) \rightarrow -\infty; \quad \lim_{a \rightarrow \infty} f(a) \rightarrow 0; \quad \lim_{a \rightarrow 0} f(a) \rightarrow 0. \quad (12.12)$$

Назвемо функцію, зворотну до  $f(a)$ , як  $\text{finv}(b)$ , де  $b = f(a)$ , тоді змінну  $a$  можна виразити:

$$a = \text{finv}(b), \quad (12.13)$$

Як відомо, графік зворотної функції є відображенням прямої функції відносно бісектриси першого та другого квадрантів координатної площини. В нашому випадку графік  $\text{finv}(b)$  (залежність  $a$  від  $b$ ) виглядатиме так:

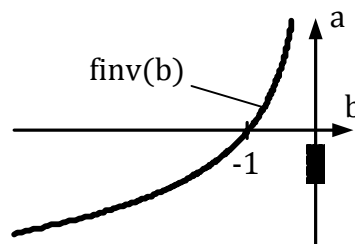


Рисунок 12.4 – Залежність  $a$  від  $b$ .

Враховуючи (12.12) та рис. 12.4, залежність  $\text{finv}(b)$  має характерні границі та точки:

$$\lim_{b \rightarrow -\infty} \text{finv}(b) \rightarrow -\infty; \quad \lim_{b \rightarrow 0} \text{finv}(b) \rightarrow \infty; \quad \text{finv}(-1) = 0.$$

Область визначення  $b \in (-\infty; 0)$ .

Представлений графік описує результат вирішення рівняння (12.10) відносно  $a$ , якщо

$$\frac{(I_{\bar{a}} - I_i) R_{\bar{a}}}{E_{\bar{a}} - I_{\bar{a}} R_{\bar{a}}} - 1 = b. \quad (12.14)$$

Враховуючи, що всі складові  $a$  – величини додатні (див. (12.9)), тоді й сама величина  $a$  – завжди додатна. Тобто практичний сенс має ділянка  $b \in [-1; 0)$ .

Аналітичний вираз для  $\text{finv}(b)$  при  $b \in [-1; 0)$  може бути записаний так:

$$a = \text{finv}(b) = \frac{b \cdot \text{Lambert}W_0(b^{-1}e^{b^{-1}}) - 1}{b} = \text{Lambert}W_0(b^{-1}e^{b^{-1}}) - b^{-1}, \quad (12.15)$$

де  $LambertW_0(\ )$  – основна гілка W-функції Ламберта, що визначається як зворотна функція до  $f(w) = we^w$ .

З урахуванням (12.10), (12.6) та (124) значення  $b$  можна записати так:

$$b = \frac{I_{\bar{n}} R_{\bar{n}}}{U_{\zeta}} - 1 = \frac{I_{\bar{n}} R_{\bar{n}} - U_{\zeta}}{U_{\zeta}}. \quad (12.16)$$

Таким чином, отримано залежність  $a$  від відношення падіння напруги на опорі накопичувального блоку до напруги зарядки.

З урахуванням (12.9) залежність періоду керування схемою від відношення напруг  $\frac{I_{\bar{n}} R_{\bar{n}}}{U_{\zeta}}$ :

$$T = \frac{2L \cdot a}{R_c},$$

$$T = \frac{2L}{R_c} \left( LambertW_0 \left( \left( \frac{I_{\bar{n}} R_{\bar{n}}}{U_{\zeta}} - 1 \right)^{-1} e^{\left( \frac{I_{\bar{n}} R_{\bar{n}}}{U_{\zeta}} - 1 \right)^{-1}} \right) - \left( \frac{I_{\bar{n}} R_{\bar{n}}}{U_{\zeta}} - 1 \right)^{-1} \right). \quad (12.17)$$

Мета впровадження накопичувача – вирівнювання графіку навантаження. Отже алгоритм керування повинен забезпечити незмінність струму  $I_{\bar{n}}$ . В такому випадку  $U_{\zeta}$  залишається незмінною,  $R_{\bar{n}}$  також незмінний і формула (12.17) зв'язує період керування схемою та струм накопичувального блоку  $I_c$ .

На рис. 12.5 зображено залежність питомого періоду керування схемою від відношення падіння напруги на

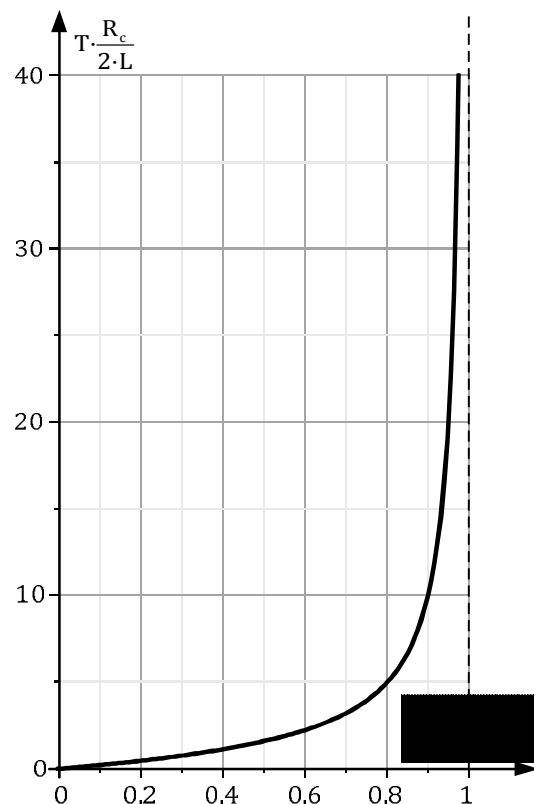


Рисунок 12.5 – Регулювальна характеристика накопичувального блоку

накопичувальному блоці до напруги зарядки  $\frac{I_{\bar{n}}R_{\bar{n}}}{U_{\zeta}}$  або від питомого струму накопичувального блоку  $I_{\bar{n}} \cdot \frac{R_{\bar{n}}}{U_{\zeta}}$ .

Проаналізувавши цю залежність, бачимо, що для збільшення зарядного струму  $I_{\bar{n}}$  необхідно забезпечити збільшення періоду керування накопичувальним блоком. З іншого боку,  $I_{\bar{n}} = I_{\bar{a}} - I_i$ ,  $I_{\bar{a}} = const$ , себто при збільшенні  $I_i$  струм  $I_{\bar{n}}$  повинен зменшитися, а для цього необхідно зменшити період  $T$ .

## В И С Н О В О К

При виконанні НДР 2009 - 2011 років отримані наступні результати:

- Визначено оптимальний час заряду кінетичного накопичувача енергії.
- Знайдено параметри, при яких витрачається мінімум енергії на зарядку кінетичного накопичувача.
- Розраховано струм для набору необхідної кутової швидкості маховика.
- Проведено порівняння заряду кінетичного накопичувача керованого й некерованого з позиції зменшення втрат.
- Розглянуто варіанти схем із зарядним пристроєм ємнісного накопичувача на змінному струмі.
- Розглянуто варіанти схем із зарядним пристроєм ємнісного накопичувача на постійному струмі.
- Визначено оптимальний час заряду ємнісного накопичувача енергії.
- Знайдено параметри, при яких витрачається мінімум енергії на зарядку ємнісного накопичувача.
- Визначено кінцеве значення напруги на конденсаторах за оптимальний час заряду ємнісного накопичувача енергії.
- Проведено порівняння заряду ємнісного накопичувача керованого й некерованого з позиції зменшення втрат.
- Розроблено конструкцію кінетичного накопичувача електричної енергії з генератором змінного струму, в якому ротор розміщено зовні статор, а в пазах ротора закріплено постійні магніти з радіальною намагніченістю для розкручування маховика накопичувача з метою використання його на безконтактному електровоз.
- Розроблено спосіб використання кінетичного накопичувача енергії, встановленого на безконтактному електровозі, що дозволить раціонально використати енергію гальмування електровоза, забезпечить стале навантаження тягової лінії та дозволить мати на електровозі достатній запас енергії.

- Розроблено нову конструкцію маховика з вертикальною віссю обертання та порожнистою овальною камерою в поперечному перерізі та постійному магніті у вигляді порожнистого циліндра, намагніченого по твірній і з кільцевими полюсними наконечниками, що дозволить збільшити об'єм ефективно діючої феромагнітної рідини і, як наслідок, розмір накопичуваної маховиком механічної енергії.
- Розроблено нову конструкцію маховика зі змінним моментом інерції у складі внутрішнього та зовнішнього ободів, які створюють циліндричну камеру, заповнену рідиною. В камері розміщено вигнуті у рівень із зовнішньою поверхнею внутрішнього ободу лопаті, які одним кінцем закріплені на ньому, підпружинені до нього і симетрично розміщені між собою. У внутрішньому ободі зроблено канали, що виходять під внутрішні поверхні сусідніх лопатей.
- Проведено аналіз перехідних процесів заряду та розряду електромеханічного накопичувача з машиною постійного струму.
- Розглянуті енергетичні показники процесу зарядження ЄН від генератора змінного струму через напівпровідниковий випрямляч трифазного синхронного генератора, що живить мостовий двопівперіодний випрямляч за схемою А.М.Ларіонова.
- Проведено аналіз впливу графіка навантаження енергоприймача на розмір втрат енергії в колі його обмотки. Мінімальні втрати будуть при незмінній в часі потужності навантаження. При нерівномірному графіку навантаження втрати помітно зростають (максимум до 100 %).
- Визначено умови, за яких використання ємнісного накопичувача енергії на електровозі забезпечує зменшення сумарних втрат енергії.
- Проведено аналіз підключення мостової схеми зарядного пристрою ємнісного накопичувача енергії на електровозі та визначено закони керування накопичувальним блоком по напрузі та по струму. Визначена залежність питомого періоду керування схемою від питомого струму накопичувального блоку.

**Наукове значення** роботи полягає в дослідженні енергетичних показників комплексу електроустаткування в системі електропостачання рухомих споживачів при застосуванні акумулятора кінетичної енергії та ємнісних накопичувачів електричної енергії.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Розроблені маховик та пристрій зі змінним моментом інерції, який дозволяє при спрощенні їх конструкцій збільшити ефективність роботи кінетичних накопичувачів енергії.

Отримано співвідношення втрати енергії в некерованому й керованому процесі розгону при оптимальному часі заряду кінетичного накопичувача  $W_{em} / W_{em_m} = 1,95$ .

Визначено коефіцієнт корисної дії кінетичного накопичувача у випадку, коли  $t_z = \tau_m$ ,  $\eta = 0,6$ .

Одержано співвідношення втрати енергії в некерованому й керованому процесі розгону при оптимальному часі заряду ємнісного накопичувача  $\frac{W_{em_n}}{W_{em_m}} = 2,7$ .

Економія енергії за один рейс при використанні енергії гальмування складає 0,79 кВт.

Запропонований зарядний пристрій ємнісного накопичувача, що використовує енергію електродинамічного гальмування поїзда має наступні важливі достоїнства:

- відносно малі масу та габарити;
- високі енергетичні характеристики та надійність роботи завдяки простоті схеми й алгоритму керування;
- принципова можливість використання індуктивності розсіювання трансформатора в якості елемента резонансного контуру, що спрощує конструкцію ЗП;
- можливість ефективного використання при зменшенні напруги живлення.



Пропонована система електропостачання безконтактного електровоза зі стаціонарними накопичувачами енергії та допоміжної тягової лінії, приєднаної через реверсивний інвертор до накопичувача енергії, якій забезпечить накопичення енергії гальмування транспортного засобу та її ефективне використання в подальшому та гарантування мінімального необхідного запасу енергії на випадок аварії.

Розроблено КАЕЕ з використанням маховика із пружинного матеріалу, в якому накопичується і використовується як кінетична, так і потенційна енергія, що дозволить зменшити розміри та масу маховика.

Використання акумулятора кінетичної енергії та ємнісних накопичувачів електричної енергії дасть скорочення розміру електроспоживання від джерела живлення і відповідний вплив на баланс потужності в системі електропостачання - зменшення втрат потужності до 30 – 40% при застосуванні цього обладнання.

Матеріали НДР використані в друкарських працях:

1. Патент України № 85439 „ Система електропостачання безконтактного електровоза з багатопроводною багатофазною тяговою мережею” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, С.В.Дибрін // (Промислова власність, 2009, бюл. № 8.)

2. Патент України № 86439 „ Система електропостачання безконтактного електровоза ” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // (Промислова власність, 2009, бюл. № 2.)

3. Патент України № 86833 „ Система електропостачання безконтактного електровоза з трифазною трипроводною мережею ” // Г.Г.Півняк, М.Г.Поляков, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко // (Промислова власність, 2009, бюл. № 10.)

4. Оценка поглощения электромагнитной энергии телом человека / Рибалко А.Я. // В сб. матер. IV Межд. науч.-практ. конф. „Безопасность

жизнедеятельности в третьем тысячелетии” в 2 т. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – Т.1. – С. 247-253.

5. Кольцов И.Б. Повышение безопасности бесконтактной передачи электроэнергии к передвижному объекту// Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии: сборник материалов IV Международной научно-практической конференции: в 2 т.-Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – Т. 1.- с.147-152

6. Особливі режими електричних мереж: Навч. посібник/ Г.Г.Півняк, А.К. Шидловський, Г.А. Кігель, А.Я. Рибалко, О.І. Хованська; За ред. академіка НАН України Г.Г. Півняка. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2009. – С. 376.

7. Transients in Electric Power Supply Systems: Texbook for institutions of higher education / G. Pivnyak, V. Vinoslavskiy, A. Rybalko, L. Nesen; under the general editorship of G. Pivnyak, Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine. Editorship of the English version and terminology by Professors O. Ivanov and S. Kostritskaya – 4th edition: Translation from Ukrainian. – Dnepropetrovsk: National Mining University. – 2009. –406pp.

8. Рыбалко А.Я., Дыбрин С.В. Выбор емкости накопителя энергии для обеспечения снижения максимума потребляемой мощности (симпозиум «Неделя горняка-2007, семинар 22, МГГТУ 2008-2009) С.356-361.

9. Патент України № 89863, МПК (2009), H02J 3/18, B60M 1/00. „Стрічкова тягова мережа транспорту з безконтактною передачею енергії на” // .Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // Промислова власність.-2010.-бюл. № 5.

10. Патент України № 90352, МПК(2009), Y02J 3/00, B60M 1/00. „Тягова мережа для транспорту з безконтактною передачею енергії на електровоз”// Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // Промислова власність.-2010.-бюл. № 8.

11. Патент України № 91081, МСП (2009), В60L 5/00, В60М 7/00. „Пристрій для енергопостачання безконтактного електровоза”// Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // Промислова власність.-2010.-бюл. № 12.

12. Патент України № 91746 Україна, МПК(2009), В60L 5/00, В60М 7/00. „Система електропостачання безконтактних електровозів для двоколійної схеми транспортування вантажів”// Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // Промислова власність.-2010.-бюл. № 16.

13. Кольцов І.Б., Панченко В.І., Рибалко А.Я.Аналіз використання кінетичного накопичувача енергії з позиції зменшення втрат енергії// «Школа підземної розробки» IV Міжнародна науково-практична конференція 12-18 вересня 2010 року - Дніпропетровськ: ТОВ «ЛізуновПрес», 2010. – С. 225-231.

14. Патент України № 93624 UA Україна, В60L 5/00, В60М 7/00. „Система електропостачання з лінійним електродвигуном”// Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // Промислова власність.-2011.-бюл. № 4.

15. Патент України № 94243 UA Україна, В60L 5/00, В60М 7/00. „Пристрій для передачі електромагнітної енергії на електровоз”// Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, С.В.Дибрін// Промислова власність.-2011.-бюл. № 8.

16. Патент України № 94281 UA Україна, В60L 5/00, В60М 7/00. „Тягова мережа транспорту з індуктивною передачею енергії на електровози”// Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // Промислова власність.-2011.-бюл. № 8.

17. Патент України № 94282 UA Україна, В60L 5/00, В60М 7/00. „Пристрій для безконтактної передачі електроенергії на електровоз”// Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // Промислова власність.-2011.-бюл. № 8.

18. Патент України № 94740 UA Україна, B60L 5/00, B60M 7/00. „Спосіб збільшення індуктивного зв'язку кабелів тягової мережі з обмоткою енергоприймача безконтактного електровоза та пристрій для його реалізації”// Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // Промислова власність.-2011.-бюл. № 11.

19. Патент України № 95534 UA Україна, B60L 5/00, B60M 7/00. „Система електропостачання з монорейкою”// Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов, С.В.Дибрін // Промислова власність.-2011.-бюл. № 15.

20. Патент України № 95545 UA Україна, B60L 5/00, B60M 7/00. „Трифазна 2р-полюсна електрична машина ”// В.І.Панченко // Промислова власність.-2011.-бюл. № 15.

**ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ**

1. Бут Д.А., Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р. и др. Накопители энергии / Под ред. Д.А.Бута.– М.: Энергоатомиздат, 1991.
2. Алиевский Б.Л., Мизюрин С.Р. Обобщение математического описания процес сов заряда накопите лей энергии в автономных электрических системах. – Электричество, 1999, № 7.
3. Пентегов И.В. Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. – Киев: Наукова думка, 1982.
4. Гулиа Н.В. Накопители энергии. – М.: Наука, 1980.
5. Шевлюгин М.В., Желтов К.С. Снижение расхода электроэнергии на движение поездов в московском метрополитене при использовании емкостных накопителей энергии// Наука и техника транспорта.- 2008. № 1.
6. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт/Г. Г. Пивняк, И. П. Ремизов, С. А. Саратикянц и др.; Под ред. Г. Г. Пивняка.— М.: Недра, 1990.—245 с.
7. Электровоз рудничный высокочастотный В14-900. Руководство по эксплуатации В14. 00.00.000 РЭ
8. Инерционные механические системы/ Будник В.С., Свиреденко Н.Ф., Кузнецов В.И. и др. – Киев: Наукова думка, 1986. -175 с.
9. Джента Дж. Накопление кинетической энергии. Теория и практика современных маховичных систем: Пер. англ. – М.: Мир, 1988. – 430 с.
- 10.Калныньш И.Р. Маховичные генераторы для передвижных электростанций. – Бесконтактные электрические машины. – Рига, 1965. – Вып. IV. – С. 115-140.
- 11.Витолиньш Я.А., Куцевалов В.М. Экспериментальные исследования бесконтактного синхронного двигателя индуктивного типа. – Бесконтактные электрические машины. – Рига, 1963. – Вып. III. – С. 205-211.

12. Проблемы создания кинетических аккумуляторов электрической энергии / Ледовский А.Н., Литвинов И.И., Новиков М.Э. и др. // Электричество. – № 3, 1978. – С. 41-45.
13. Остриров В.Н., Тухикян А.С. Применение электромеханических накопителей энергии в системе электроснабжения метрополитена. – Электричество. – № 4, 2007. – С. 51-64.
14. А.с. СССР № 213956. Бесконтактная синхронная машина / Домбур Л.Э., Пугачев В.А., Сика З.К. – Бюл. № 11, 1968.
15. Патент России № 2244996, Кл. H02K 19/16, 1/06. Генератор переменного тока / Ганджа С.А., Соломин Е.В., Шауфлер А.Д. – Бюл. № 2, 2005.
16. А.с. СССР № 1023560, Кл. H02K 15/06. Синхронная редукторная электрическая машина / Жуловян В.В., Комаров А.В., Шаншуров Г.А. – Бюл. № 22, 1983.
17. А.с. СССР № 1201687, Кл. F16F 15/30. Маховик переменного момента с вертикальной осью вращения / Дьячук Г.Г., Финченко В.С. – Бюл. № 48, 1985.
18. А.с. СССР № 1171619, Кл. F16F 15/30. Маховик переменного момента инерции / Скрыбин В.В. – Бюл. № 29, 1985.
19. А.с. СССР № 1640481, Кл. F16F 15/30. Маховик Лашевича / Лашевич А.Б. – Бюл. № 13, 1991.
20. А.с. СССР № 937823, Кл. F16F 15/30. Маховик / Зиновьев М.Т., Киселев О.М., Зиновьева Т.М. – Бюл. № 23, 1982.
21. Патент RU2058656. Двухпакетная индукторная машина / Волков Ю.Н. // Бюл. 11, 1996.
22. Патент RU2244996. Генераторы переменного тока / Ганджа С.А., Соломин Е.В., Шауфлер А.Д. // Бюл. 2, 2005.
23. Будник В.С., Свириденко Н.Ф., Кузнецов В.И. и др. Инерционные механические энергоаккумулирующие системы. – Киев: Наук. думка, 1986.

24. Возможности транспорта электрической энергии с помощью линейных накопителей энергии / Ю.Н.Астахов, В.А.Веников, А.Г.Сурин, А.Г.Тер-Газарян // Нетрадиционные источники энергии. Тр. МЭИ, 1983. – Вып. 619. – С.59-64.
25. Кніш В.А. Полупроводниковые преобразователи в системах заряда накопительных конденсаторов. – Ленинград: Энергоиздат, 1981. – 160 с.
26. Чиженко И.М., Бердинских Г.С. Зарядные устройства емкостных накопителей энергии. – Киев: Наукова думка, 1980. – 152 с.
27. Булатов О.Г., Иванов В.С., Панфилов Д.И. Полупроводниковые зарядные устройства емкостных накопителей энергии. – Москва: Радио и связь, 1983.
28. Катасовнов Н.М. Выпрямитель с индуктивными ограничителями тока зарядки емкостных накопителей энергии // Электротехника, 2004. – № 1. – С. 28-30.
29. Транзисторно-конденсаторные зарядные устройства мегаджоулевых емкостных накопителей энергии / Е.А.Капилович, В.В.Ваняев, М.М.Троицкий и др. // Электротехника, 2010. – № 7. – С. 11-16.
30. Кириенко В.П., Капилович Е.А. Режимы работы высоковольтных зарядных устройств с дозирующими конденсаторами для электрофизических установок // Электричество, 2006. – № 5. – С. 25-31.
31. Мовшевич Б.З., Капилович Е.А. Мощный импульсный преобразователь для стабилизированного заряда емкостных накопителей энергии // Техническая электродинамика, 1987. – № 2. – С. 47-53.
32. Курчик Б.З., Покрывайло А.Д., Шварц А.Н. Преобразователь для заряда емкостных накопителей энергии // Приборы и техника эксперимента, 1990. – № 4. – С. 121-124.
33. Мелешин В.И., Новицкий В.Н. Транзисторные преобразователи напряжения с последовательным резонансным контуром // Электротехника, 1990. – № 8. – С.47-53.

**РОЗРАХУНОК ВИТРАТ ЕНЕРГІЇ НА ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ  
БЕЗКОНТАКТНИМ ЕЛЕКТРОВОЗОМ В14 З УРАХУВАННЯМ  
КАТЕГОРІЙНОСТІ ШАХТИ**

**I. Вихідні дані для розрахунку**

Категорійність шахти по газу та пилу – зверхкатегорійна

Сумарний змінний вантажопотік = 1300 т/зм.

Число навантажувальних пунктів – 1

Довжина транспортування – 1200 м

Середній ухил рейкового шляху = 4 ‰

**II. З урахуванням категорійності шахти, довжини транспортування, змінного вантажопотоку приймаємо для переміщення вантажів безконтактний електровоз В14. Технічні дані електровоза:**

згінна маса	– 14 т
сила тяги:	годинна – 17800 Н = 17,8 кН тривала – 5100 Н = 5,1 кН
швидкість руху:	годинна – 12,2 км/год тривала – 18,0 км/год
тяговий двигун	– ДТР 23,5: потужність годинна – 23,5 кВт струм годинний – 148 А струм тривалий – 68 А сумарна потужність двигунів – 47 кВт

Як транспортні посудини приймемо вагонетки ВГ3,3 місткістю 3,3 м<sup>3</sup> і масою 1,27 т. Вантажі, що транспортуються: вугілля насипне густиною 0,91 т/м<sup>3</sup>, порода густиною 1,2 т/м<sup>3</sup> в наступному стані. Робочих днів у році – 300, робочих змін – 3, кожна тривалістю 6 годин.



### III. Визначення розміру поїзда

1. Максимально допустима вага потягу при зрушенні навантаженого поїзда під мінімальний ухил за умови зчеплення коліс з рейками:

$$Q \leq P_{\lambda} \left( \frac{1000\psi_n}{W_{\Pi} - i_{\min} + 108a_{\Pi}} - 1 \right), \text{ кН,}$$

де  $P_{\lambda} = m_{\lambda}g = 14 \cdot 981 = 137,3$ , кН – зчіпна вага локомотиву (електровоза);  $W_{\Pi}$  – пусковий опір руху вагонеток;

$$W_{\Pi} = W_0 \cdot 1,4 = 8 \cdot 1,4 = 11,2 \text{ Н/кН;}$$

$W_{0n} = 8$  Н/кН – основний питомий опір навантажених вагонеток;  $a_{\Pi}$  – пускове прискорення, прийmemo  $a_{\Pi} = 0,05$  м/с<sup>2</sup>;  $\psi_n$  – коефіцієнт зчеплення;  $\psi_n = 0,24$  з підсипанням піску на чисті сухі рейки:

$$Q \leq 137,3 \left( \frac{1000 \cdot 0,24}{11,2 - 2 + 108 \cdot 0,05} - 1 \right) = 2120 \text{ кН.}$$

2. Максимально припустима вага поїзда під час зрушування порожнього потягу на максимальному підйомі:

$$Q_{\text{нор1}} \leq P_{\lambda} \left( \frac{1000\psi_n}{W_{\text{нор}} + i_{\max} + 108a_{\Pi}} - 1 \right) = 137,3 \left( \frac{1000 \cdot 0,24}{14 + 5 + 108 \cdot 0,05} - 1 \right) = 1213 \text{ кН,}$$

де  $W_{\text{нор}} = W_{0n} \cdot 1,4 = 10 \cdot 1,4 = 14$  Н/кН – пусковий опір руху.

3. За потужністю тягових двигунів:

$$Q_{\text{нор2}} \leq \frac{F_{\text{мп}}}{0,6(W_{0n} + i_{\text{ср}})} - P_{\lambda} = \frac{5,1 \cdot 10^3}{0,6(10 + 4)} - 137,3 = 470 \text{ кН,}$$

де  $F_{\text{мп}} = 5,1$  кН – тягове зусилля у тривалому режимі.

4. Кількість вагонеток у потязі:

$$n_{\text{нор}} = \frac{Q_{\text{нор2}}}{G_0} = \frac{470}{12,5} = 37,6;$$

$$n_n = \frac{Q_n}{G + G_0} = \frac{2120}{29,4 + 12} = 50,6,$$

де  $G_0$  – вага порожньої вагонетки,  $G_0 = 1,27 \cdot 9,81 = 12,5$  кН;

$G$  – вага вантажу у вагонетці,  $G = 3,3 \cdot 0,91 \cdot 9,81 = 29,4$  кН.

Для подальшого розрахунку приймемо число вагонеток  $n = 38$ .  
Уточнимо вагу навантаженого і порожнього поїздів за прийнятим числом вагонеток.

Вага навантаженого потягу:

$$G_n = n(G + G_0) = 38(29,4 + 12,5) = 1592,2 \text{ кН.}$$

Вага порожнього потягу:

$$Q_{nop} = nG_0 = 38 \cdot 12,5 = 475 \text{ кН.}$$

#### IV. Гальмівні задачі

1. Максимальна гальмівна сила, яку може реалізувати електровоз, оснащений рельсовими гальмами:

$$B_m = 1000 g m_{л} \psi_{\Gamma} + \varphi_m n_{pz} \cdot K_{mII} \cdot l_{pz} = 1000 \cdot 9,81 \cdot 14 \cdot 0,2 + 0,15 \cdot 2 \cdot 0,8 \cdot 60 \cdot 10^3 = 41868 \text{ Н,}$$

де  $\psi_{\Gamma} = 0,2$  – коефіцієнт зчеплення при гальмуванні;  $\varphi_m = 0,15$  – коефіцієнт тертя полозів гальм об рейки;  $n_{pz}$  – кількість рельсових гальм ( $n_{pz} = 2$ );  $K_{mII} = 60$  кН/м – питома (на 1 м полозів сила примагнічування гальм до рейок);  $l_{pz} = 0,8$  м – довжина полозів гальма.

2. Уповільнення поїзду на розрахунковому схилі при гальмуванні:

$$a_m = 0,01 \left( \frac{B_m}{g m_n} + W_{0n} - i_m \right) = 0,01 \left( \frac{41868}{1792,5} + 8 - 5 \right) = 0,26 \text{ м/с,}$$

де  $m_n \cdot g = G_n P_n = 1592,2 + 137,3 = 1792,5$  кН.

3. Максимально допустима швидкість підходу поїзда до розрахункового схилу, при якій буде забезпечено нормований гальмівний шлях ( $l_2 = 40$  м):

$$U_{дон} = \sqrt{2 a_m l_2 + (a_m t_n)^2} - a_m t_n = \sqrt{2 \cdot 0,26 \cdot 40 + (0,26 \cdot 3)^2} - 0,26 \cdot 3 = 3,84 \text{ м/с,}$$

де  $t_n = 3$  с – термін технічної підготовки гальм до дії.

#### 4. Гальмівний шлях поїзда

$$l_z = U_n t_n + \frac{U_n^2}{2a_m},$$

де  $U_n$  – початкова швидкість гальмування. Якщо забезпечити  $U_n = 5$  м/с,  $a_m = 0,4$  м/с<sup>2</sup>; то  $l_z = 5 \cdot 3 + 5^2 / 2 \cdot 0,4 = 46,3$  м.

Вважаючи на застосування рейкових гальм, прийmemo  $t_n = 1,8$  с, тоді гальмівний шлях  $l_z = 1,8 \cdot 5 + 5^2 / 2 \cdot 0,4 = 40,3$  м.

#### 5. Тривалість періоду гальмування

$$t_r = \frac{V_n}{a_m} = \frac{5}{0,4} = 12,5 \text{ м.}$$

### V. Витрати енергії

#### 1. Питомі витрати енергії на розгін навантаженого потягу:

$$E_{pn} = (W'_0 - i_{cp}) l_p + \sigma \frac{V_{mp}^2}{2},$$

де  $W'_0 = 1,2 \cdot W_0 = 1,2 \cdot 8 = 9,6$  Н/кН – середній питомий опір руху вагонеток;  $V_{mp} = 18$  км/год = 5 м/с – тривала швидкість руху (в кінці розгону);  $\sigma = 108$  с<sup>2</sup>/м;  $l_p$  – шлях розгону потягу:

$$l_p = \frac{V_{mp}^2}{2a_p} = \frac{5^2}{2 \cdot 0,15} = 83,5 \text{ м;}$$

$a_p = 0,15$  м/с<sup>2</sup> – середнє прискорення за час розгону.

Час розгону потягу:

$$t = \sqrt{\frac{2S}{a}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 83,5}{0,15}} = 33,3 \text{ с}$$

або

$$t = \frac{U_{mp}}{a} = \frac{5}{0,15} = 33,3 \text{ с.}$$

$$E_{pn} = (9,6 - 4)83,5 + 108 \frac{5^2}{2} = 1818 \text{ Дж/кН.}$$

2. Питомі витрати енергії на руж з усталеною швидкістю:

$$E_{ycn} = (W_0 - i_{cp})l_y = (8 - 4) \cdot 1076 = 4304 \text{ Дж/кН,}$$

де  $l_y = 40$  м – допустимий шлях гальмування.

3. Питома енергія, що розсіюється при механічному гальмуванні

$$E_{гп} = b_m l_{zm} = 17,3 \cdot 6 = 104 \text{ Дж/кН,}$$

де  $b_m = \frac{B'_m}{G_l + G_n} = \frac{27468}{1792,5} = 17,3 \text{ Н/кН.}$

$l_{zm} = 6$  м – шлях гальмування.

4. Загальні питомі витрати енергії на рух навантаженого потягу:

$$E_{зп} = E_{pn} + E_{ycn} = 1818 + 4304 = 6122 \text{ Дж/кН} = 2,78 \cdot 10^{-7} \cdot 6122 = 1,70 \cdot 10^{-3} \text{ кВт} \cdot \text{год/кН.}$$

5. Питома кінетична енергія руху поїзда:

$$E_{kn} = \sigma \frac{V_{mp}^2}{2} = 108 \frac{5^2}{2} = 1350 \text{ Дж/кН,}$$

яка розсіюється механічним гальмом або перетворюється в електричну при переводі тягових двигунів у генераторний режим роботи.

6. Питома енергія, яка може бути розсіяна при електродинамічному гальмуванні:

$$E_{едп} = E_{kn} - [(W_0 - i)l_T + b_m l'_T] = 1350 - [(8 - 4) \cdot 40 + 17,3 \cdot 6] = 1350 - [106 + 104] = 1142 \text{ Дж/кН,}$$

де  $l'_T = 6$  м – довжина шляху механічного гальмування.

7. Відношення:

$$K_{нк} = \frac{E_{e0п}}{E_{зп}} = \frac{1142}{6122} = 0,186.$$

8. Загальні витрати енергії на рух навантаженого потягу

$$E_3 = E_{зп} (G_n + P_l) = 6122 \cdot 1792,5 = 1,097 \cdot 10^7 \text{ Дж} = 1,097 \cdot 10^7 \cdot 2,78 \cdot 10^{-7} = 3,05 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

9. Енергія, яку можливо повернути при електродинамічному гальмуванні:

$$E_{e0} = K_{нк} \cdot E_3 = 0,186 \cdot 3,05 = 0,57 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$$

## VI. Узагальнення

1. Питома енергія, використана на розгін та рух потягу з усталеною швидкістю:

$$E_1 = \sigma \frac{V_{mp}^2}{2} = (W_{0n} \pm i) l_n + (W_{0y} \pm i) l_y,$$

де  $V_{mp}$  – тривала швидкість руху, м/с;  $W_{0n}$ ,  $W_{0y}$  – питомий опір руху поїзда при пуску і в усталеному режимі, Н/кН; знак „+” відноситься до руху на підйом (звичайно ненавантаженого потягу); знак „-” – до руху під ухил (звичайно навантаженого потягу);  $l_n$ ,  $l_y$  – шлях при пуску та в усталеному русі, м.

2. Питома кінетична енергія поїзду  $E_2 = \sigma \frac{V_{mp}^2}{2}$  розсіюється при механічному гальмуванні, в навантаженні при електродинамічному гальмуванні та на подолання опору руху, тобто:

$$E_2 = E_{e0} + (W_0 \pm i) l_T + b_K l'_T,$$

де  $E_{e0}$  – питома енергія електродинамічного гальмування;  $l_T$  – гальмівний шлях (загальний);  $l'_T$  – гальмівний шлях при механічному гальмуванні ( $l'_T =$

6-8 м);  $b_K = \frac{B_K}{G_G + G_L}$  – питома гальмівна сила; звідки:

$$E_{e0} = \sigma \frac{V_{mp}^2}{2} - (W_{0n} \pm i)l_n + (W_{0y} \pm i)l_y.$$

### 3. Відношення енергії:

$$\text{а) } K_{HK_{II}} = \frac{E_{e0}}{E_1} = \frac{\sigma \frac{V_{mp}^2}{2} - [(W_{0y} + i)l_T + b_K l_T']}{\sigma \frac{V_{mp}^2}{2} + [(W_{0n} + i)l_n + (W_{0y} + i)l_y]}$$

при русі навантаженого потягу на підйом;

$$\text{б) } K_{HK_{II}} = \frac{E_{e0}}{E_1} = \frac{\sigma \frac{V_{mp}^2}{2} - [(W_{0y} - i)l_T + b_K l_T']}{\sigma \frac{V_{mp}^2}{2} + [(W_{0n} - i)l_n + (W_{0y} - i)l_y]}$$

при русі навантаженого потягу під ухил.

Розрахуємо для порожнього потягу:

$$K_{HK_{II}} = \frac{E_{e0}}{E_1} = \frac{108 \frac{6^2}{2} - [(10+4)40 + 17,3 \cdot 6]}{108 \frac{6^2}{2} + [(14+4)83,5 + (10+4)1076]} = \frac{1944 - [560 + 104]}{1944 + 1503 + 15064} = \frac{1280}{18511} = 0,07.$$

### 4. Загальні витрати енергії на рух порожнього потягу:

$$E_3 = 18511(G_{пор} + P_l) = 18511(475 + 137) = 1,13 \cdot 10^7 \text{ Дж} = 2,78 \cdot 10^{-7} \cdot 1,13 \cdot 10^7 = 3,15$$

кВт·год.

### 5. Енергія, яку можна повернути:

$$E_{e0} = K_{HK_{II}} \cdot E_3 = 0,07 \cdot 3,15 = 0,22 \text{ кВт}.$$

### 6. Витрати енергії за один рейс:

$$E_p = 3,05 + 3,15 = 6,2 \text{ кВт} \cdot \text{год}.$$

### 7. Енергія, яку можна зекономити за один рейс

$$E_{e0} = 0,57 + 0,22 = 0,79 \text{ кВт},$$

що складає  $(0,79/6,02) \cdot 100 = 13,1 \%$  від витрат.

## VII. Визначення швидкостей руху та тривалості рейсу й їх кількості

1. Дотична сила тяги, реалізована одним двигуном електровоза на даній ділянці маршруту, Н:

– для порожнякового напрямку

$$F_{\text{оп}} = (G_{\text{п}} + P_{\text{л}}) \frac{W_{0\text{п}} + i_{\text{сп}}}{n_{\text{о}}} = (475 + 137,5) \frac{10 + 4}{2} = 4284 \text{ кН};$$

– для вантажного напрямку

$$F_{\text{оН}} = (G_{\text{Н}} + P_{\text{л}}) \frac{W_{0\text{г}} - i_{\text{сп}}}{n_{\text{о}}} = (1592 + 137) \frac{8 - 4}{2} = 3458 \text{ кН}.$$

2. Відповідно до цих значень сили тяги з електромеханічних характеристик двигуна ДТР23,5 визначимо струми та швидкості руху потягу.

Параметр	Напрямок руху	
	порожняковий	вантажний
Сила тяги, кН	4284	3458
Сила струму, А	110	80
Стала швидкості, м/с	5 (18 км/год)	6,1 (22 км/год)

3. Тривалість одного рейсу, хв.

$$T = \frac{60L}{K_{\text{ш}} V_{\text{п}}} + \frac{60L}{K_{\text{ш}} V_{\text{Н}}} + \theta,$$

де  $L$  – довжина маршруту, км ( $L = 1,2$  км);  $V_{\text{п}}$ ,  $V_{\text{Н}}$  – швидкості руху в порожняковому і вантажному напрямках;  $K_{\text{ш}} = 0,8-0,9$  – коефіцієнт;  $\theta$  – тривалість маневрів в кінцевих пунктах,  $\theta = (30-40)$  хв.

Прийmemo  $K_{\text{ш}} = 0,85$ ,  $\theta = 30$  хв.

$$T = \frac{1200 \cdot 60}{0,85 \cdot 18} + \frac{1200 \cdot 60}{0,85 \cdot 18} + 30 = 40 \text{ хв}.$$

4. Кількість рейсів одного електровоза в зміну:

$$r = \frac{60t_{зм} \cdot K_g}{T} = \frac{60 \cdot 6 \cdot 0,8}{40} = 7,2.$$

Прийmemo 7 рейсів.

5. Загальна кількість вантажних рейсів для вивозу змінногo видобутку вугілля:

$$n_r = \frac{KQ_{зм}}{nm_g} = \frac{1,25 \cdot 1300}{38 \cdot 3} = 14,25,$$

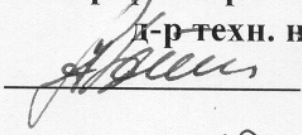
де  $m_g = 3,3 \cdot 0,91 = 3$  т – маса вантажу в одній вагонетці;  $K = 1,25$  – коефіцієнт. Прийmemo  $n_r = 14$ .



Додаток Б 149

Державний ВНЗ «НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ»

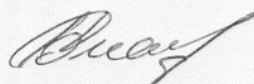
ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи  
д-р техн. наук, проф. О. С. Бешта

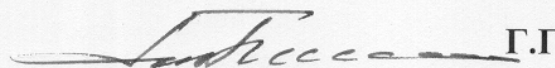
"15" 12 2011 р.

**ЗВІТ**  
**про патентні дослідження**08.12.2011 р. № 1  
(дата)Тема ГП-420 „ Енергозберігаючі технології електропостачання транспорту з  
(найменування, шифр теми)індуктивним підводом енергії ”Етап „Аналіз якості електроенергії в системі електропостачання рухомого  
електроспоживача після використання нових технологій живлення ”**Начальник НДЧ**

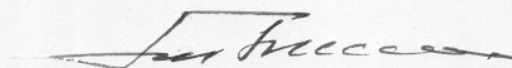
канд. техн. наук, доц.



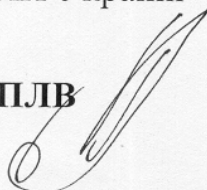
Р. О. Дичковський

**Керівник підрозділу-виконавця**д-р техн. наук,  
академік НАН України

Г.Г. Півняк

**Керівник НДР**д-р техн. наук,  
академік НАН України

Г.Г. Півняк

**Керівник ПЛВ**

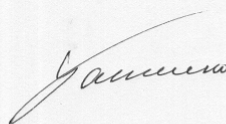
О.О. Філонова

**Нормоконтроль**

Л. О. Савостенко

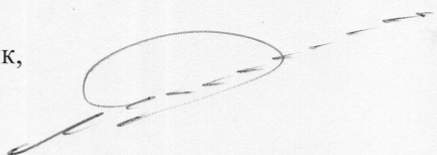
**СПИСОК АВТОРІВ**

Науковий співробітник,  
доцент



В.І.Панченко  
(всі розділи)

Науковий співробітник,  
ст. викладач



І.Б.Кольцов  
(всі розділи)

## ЗАГАЛЬНІ ДАНІ ПРО ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

**Організація (підприємство) - виконавець розробки**  
Державний ВНЗ «Національний гірничий університет»

**Термін виконання** 2009 - 2011 рр.

### **Призначення, область користування, короткий опис об'єкта.**

Об'єкт дослідження відноситься до системи транспорту підземних виробок гірничих підприємствах.

Область застосування - вугільні шахти, небезпечні за газом та пилом.

Об'єкт - система електропостачання рухомих транспортних засобів з індуктивною передачею на них електричної енергії.

**ЗМІСТ**

1. Патентна документація, відібрана для подальшого аналізу (Форма Г.1.1)	5
2. Інша науково – технічна документація, відібрана для подальшого аналізу(Форма Г.1.2)	6
3. Техніко - економічні показники ОГД і об'єктів аналогічного призначення (Форма Г.1.4)	7
4. Аналіз новизни, рівня винахідництва і промислової застосовності ОГД (Форма Г.1.5)	8
5. Аналіз можливості користування в ОГД відомих об'єктів промислової власності (Форма Г.2.4)	9
6. Висновки	12
Додаток:	
Завдання на проведення патентних досліджень	13
Регламент пошуку	14
Довідка про пошук	15
Довідка про оцінку науково - технічного рівня НДР	16



## Форма Г.1.1 Патентна документація, відібрана для подальшого аналізу

ОГД, його складові частини	Документи на об'єкти промислової власності	
	Бібліографічні дані	Відомості про його дію
Кінетичний накопичувач енергії, система використання енергії.	Накопитель кинетической энергии. Авт.свид.СССР, №1032238, авт. Б.М. Столбов, В.А. Бажанова, И.М. Кирко и др., Б.И. №28, 1983 г.	Відомостей немає
Кінетичний накопичувач енергії.	Локомотив с аккумулятором энергии в виде вращающегося маховика. Авт.свид.СССР, №1516389, авт. А.Л. Западский, С.Е. Старчук, И.А. Карев, Б.И. №39, 1989 г.	Відомостей немає
Електромеханічний накопичувач енергії, система розкручування маховика.	Транспортный засіб. Патент UA, №47832, авт. Дзензерський В.О., Соколовський І.І., Житник М.Я., «Промислова власність», Бюл. №7, 2002 р.	Діє
Кінетичний накопичувач енергії, технологія розкручування.	Маховик переменного тока с вертикальной осью вращения. Авт.свид.СССР, №1201687, авт. Г.Г. Дьячук и В.С. Финченко, Б.И. №48, 1985 г.	Відомостей немає
Кінетичний накопичувач енергії, технологія розкручування.	Маховик переменного момента инерции. Авт.свид.СССР, №1171619, авт. В.В. Скрыбин, Б.И. №29, 1985 г.	Відомостей немає
Кінетичний накопичувач енергії, технологія розкручування.	Маховик. Авт.свид.СССР, №937823, авт. М.Т. Зиновьев, О.М. Киселев и Т.М. Зиновьев, Б.И. №23, 1982 г.	Відомостей немає
Кінетичний накопичувач енергії, технологія розкручування.	Маховик Лашевича. Авт.свид.СССР, №1640481, авт. А.Б. Лашевич, Б.И. №19, 1991 г.	Відомостей немає
Двигун для розкручування кінетичного накопичувача енергії	Двухпакетная индукторная машина. Патент RU № 2058656, авт. Ю.И. Вуколов, Б.И. №11, 1996 г.	Відомостей немає
Генератор для використанні у кінетичному накопичувачі енергії	Генератор переменного тока. Патент RU № 2244996, авт. С.А. Ганджа, Е.В. Соломин, А.Д. Шауфлер, Б.И. №2, 2005 г.	Діє
Кінетичний накопичувач енергії, елементи конструкції	Електромобіль з мехатронним накопичувачем енергії. Корисна модель UA, №49346, авт. О.В. Бажинов, О.П. Смирнов, Бюл. №8, 2010 р.	Діє
Кінетичний накопичувач енергії, елементи конструкції	Буферный накопичувач кінетичної енергії. Патент UA, №84040, авт. М.Я. Житник, Ю.Й. Ліпський, С.І Плаксін та ін., Бюл. №17, 2008 р.	Діє

Форма Г.1.2 Інша науково – технічна документація, відібрана для подальшого аналізу

ОГД, його складові частини	Джерела інформації	Бібліографічні дані
Конструктивні схеми накопичувачів енергії	Книга. «Накопители энергии». авт. Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин и П.В. Васюкевич.	М.: Энергоатомиздат, 1991, 400 с.
Структурні схеми електромеханічних накопичувачів енергії	Стаття «Проблемы создания кинетических аккумуляторов электрической энергии», авт. А.Н. Ледовский. И.И. Литвинов, М.Э. Новиков и А.Т. Тимофеев	Ж. «Электричество», №3, 1978, с. 41-45
Конструкції електричних машин для кінетичних накопичувачів енергії.	Стаття «Маховичные генераторы для передвижных электростанций», авт. И.Р. Калныныш, збірник наук. праць «Бесконтактные электрические машины», вып. 1965	Видавництво «Зінатне», м. Ріга, 1965

Форма Г.1.4 Техніко - економічні показники ОГД і об'єктів аналогічного призначення

Найменування і одиниця вимірювання	Техніко - економічних показників			
	Об'єкта за стандартом або технічними умовами	Об'єкта - аналога (державна, фірма, організація, модель, рік освоєння)	ОГД	Перспективного зразка
1. Питома енергоємність кінетичного (інерційного) накопичувача енергії, кДж/кг.	50	А.с. ССРСР, № 1516389, 1989 г. 72	74	85
2. Маса кінетичного накопичувача енергії, кг.	2500	2400	2400	2250
3. Витрати провідникового матеріалу, кг/км.	1070	1070	1070	580



Форма Г.1.5 Аналіз новизни, рівня винахідництва і промислової придатності  
ОГД

ОГД, його складові частини		Прототип		Очікуваний результат	Можливість користування в промисловості або іншій сфері діяльності	Номер поданої заявки, дата подачі заявки
Назва	Сукупність ознак	Бібліографічні дані	Сукупність ознак			
Пристрій зі змінним моментом інерції	Пристрій включає маточину з горизонтальною віссю обертання, на якій закріплено порожнистий обід з немагнітного матеріалу з овальним поперечним перерізом. Порожнину ободу заповнено феромагнітною рідиною. Зовні ободу розміщено котушки з осердями, на торцях яких закріплено полюсні наконечники, що охоплюють обід з протилежних сторін.	А.с. СССР № 937823 Бюл. № 23, 1982	Маховик з маточиною, на якій закріплено порожнистий тороїдальний обід. Порожнину ободу заповнено мастильною рідиною та контактувальними один з одним і ободом кулями з феромагнітного матеріалу. На ободі закріплено котушку у вигляді соленоїду.	Спряження конструкції, підвищення надійності роботи та рівня безпеки.	В якості накопичувача кінетичної енергії в транспортних та стаціонарних установках.	Заявка на винахід № a201015150 від 16.12.2010 р.
Маховик зі змінним моментом інерції	Маховик з вертикальною віссю обертання, що має порожнисту камеру, частково заповнену феромагнітною рідиною, овальну у поперечному перерізі з вмонтованими в її верхню частину пружними кільцевими гофрами. Внутрішньою боковою стороною камеру прикріплена до зовнішньої поверхні кільцевого магніту, намагніченого по висоті.	А.с. СССР № 1171619, Бюл. № 29, 1985	Маховик з горизонтальною віссю обертання в складі порожнистої камери у вигляді зрізаного конуса, частково заповненого феромагнітною рідиною, та закріпленого на меншій основі конуса постійного магніта, намагніченого по діаметру основи.	Збільшення розміру накопичувача маховиком кінетичної енергії на одиницю об'єму.	Можливе використання в якості накопичувача кінетичної енергії в транспортних установках.	Заявка на винахід № a201015156 від 16.12.2010 р.



**Форма Г.2.4 Аналіз можливості користування в ОГД відомих об'єктів  
промислової власності**

ОГД, його складові частини	Документи на об'єкти промислової власності (бібліографічні дані)	Суть об'єкта промислової власності	Очікуваний результат від користування
<p>1. Система електропостачання з лінійним двигуном. Складові частини: основна та допоміжна тягові мережі з магнітопроводом по довжині; енергоприймач на транспортному засобу з магнітопроводом та обмоткою, секції якої з'єднані за мостовою схемою; ємнісний накопичувач енергії на транспортному засобу..</p>	<p>Патент на винахід UA № 93624, Бюл. № 4, 2011 р.</p>	<p>Система електропостачання з лінійним електродвигуном в складі основної тягової мережі з просторово розподілених, прямокутних за формою котушок, які приєднано на початку мережі до джерела змінного струму. Введено допоміжну тягову мережу з двох подовжніх кабелів ввімкнених на початку мережі до джерела постійного струму і з'єднаних між собою в кінці мережі. Тягові мережі споряджено магнітопроводом з подовжніми (по напрямку мережі) та поперечним пазами, причому в подовжні пази вкладено кабелі допоміжної, а в поперечні-котушки основної мережі. Магнітопровід енергоприймача на електровозі зроблено з поперечними по напрямку мережі пазами, в які вкладено витки обмотки із окремих секцій. Секції в кількості чотирьох з'єднані за мостовою схемою, першу діагональ якої ввімкнено через конденсатор до входу випрямляча, а другу-через блок керування до виходу цього випрямляча. Електровоз оснащено ємнісним накопичувачем енергії з можливістю його приєднання до другої діагоналі мостової схеми.</p>	<p>Спрощення конструкції транспортного засобу, зменшення витрат матеріалів, можливість використання енергії гальмування.</p>
<p>2. Система електропостачання з монорейкою. Складові частини:</p>	<p>Патент на винахід UA № 95534, Бюл. № 15, 2011 р.</p>	<p>Система електропостачання з монорейкою в складі основної тягової мережі з подовжніх кабелів, лінійного тягового</p>	<p>Спрощення конструкції системи, зменшення</p>

<p>основна тягова мережа з поздовжніх кабелів; лінійний тяговий двигун з трифазною обмоткою; допоміжна тягова мережа з окремих котушок, магнітопровід якої закріплено з нижньої сторони монорейки; енергоприймача на електровозі з обмоткою, до якої приєднано випрямляч та інвертор; ємнісний накопичувач енергії.</p>		<p>електродвигуна з трифазною обмоткою, розміщеною в поперечних пазах магнітопроводу енергоприймача на електровозі. Введено допоміжну тягову мережу з магнітопроводом, закрапленим з нижньої сторони монорейки, яку зроблено з окремих котушок, сполучених між собою послідовно - зустрічно і з'єднаних з джерелом постійного струму. Магнітопровід статора лінійного двигуна доповнено з торців два поздовжніми пазами, в яких та у крайніх (по довжині) поперечних пазах розміщено обмотку енергоприймача, до якої послідовно приєднано випрямляч та інвертор з блоком керування. Також введено ємнісний накопичувач енергії та перемикач, вхід якого приєднано до випрямляча та накопичувача, а вхід – до інвертора, який зроблено реверсивним.</p>	<p>втрат потужності в кабелях тягової мережі, зменшення витрат магнітного матеріалу, використання енергії гальмування.</p>
<p>3. Спосіб збільшення індуктивного зв'язку кабелів тягової мережі з обмоткою енергоприймача безконтактного електровоза та пристрій для його реалізації. Складові частини: обмотка енергоприймача безконтактного електровоза, розміщена на магнітопроводі з поздовжнім пазом у його верхній частині; кабель тягової мережі, введений у внутрішній простір магнітопроводу</p>	<p>Патент на винахід UA № 94740, Бюл. № 11, 2011 р.</p>	<p>Спосіб збільшення індуктивного зв'язку кабелів тягової мережі з обмоткою енергоприймача безконтактного електровоза полягає у введенні кабелю мережі у внутрішній простір встановленого на електровозі енергоприймача через поздовжній паз у його верхній частині та розміщення у цьому пази феромагнітної рідини і забезпечення відповідних розмірів струмів кабелів мережі та обмотки енергоприймача. Відповідний пристрій постачено допоміжною обмоткою з двох секцій, розміщених на магнітопроводі енергоприймача. Введено давач змінної напруги та два електричних ланцюги в складі акумулятора, двох вимикачів та</p>	<p>Спрощення конструкції системи електропостачання та зменшення витрат потужності у кабелях тягової мережі.</p>

енергоприймача; феромагнітна рідина, розміщена у вказаному повздовжньому пазу; визначені розміри струмів кабелів тягової мережі і обмотки енергоприймача.		двох напівпровідникових діодів.	
--	--	------------------------------------	--

## ВИСНОВКИ

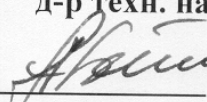
Патентні дослідження стосовно енергозберігаючих технологій електропостачання транспорту з індуктивним приводом енергії на рухомі об'єкти дають привід стверджувати:

1. результатом виконання даної науково-дослідницької роботи стали нові технічні рішення відносно конструкції маховиків для кінетичних накопичувачів енергії у транспортних установках (заявка на винахід № а201015156, № а201015150 від 16.12.2010 р. на конструкції), відносно систем електропостачання, в яких функції енергоприймачів на електровозах з індуктивним підводом енергії суміщено з функціями електродвигунів (патенти на винаходи UA № 93624 від 25.02.2011 р. та UA № 95534 від 10.08.2011 р.) та відносно конструкції енергії на електровоз (патент на винахід UA № 94740 від 10.06.2011 р.)
2. ОГД мають НОУ-ХАУ щодо вибору параметрів систем електропостачання транспорту з індуктивним підводом енергії, що забезпечить зменшення втрат потужності в елементах системи та економію провідникових і магнітних матеріалів.
3. ОГД включають нові технічні рішення, НОУ – ХАУ і по основних показниках не мають аналогів в Україні та у світі.
4. Результати НДР по основних показниках перевищують світовий рівень науки і техніки.



161

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Проректор з наукової роботи**  
**д-р техн. наук, проф.**

  
 \_\_\_\_\_ **О. С. Бешта**

"27" \_\_\_\_\_ 12 \_\_\_\_\_ 2011 р.

**Завдання**  
**на проведення патентних досліджень**

Тема ГП-420 „Енергозберігаючі технології електропостачання транспорту з  
 (найменування, шифр теми)  
індуктивним підводом енергії”

Етап „Аналіз якості електроенергії в системі електропостачання рухомого  
електроспоживача після використання нових технологій живлення”

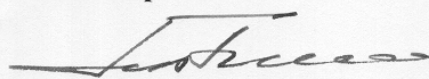
Мета патентних досліджень: Визначення патентної ситуації відносно ОГД

Таблиця А.1 Види робіт при проведенні патентних досліджень та виконавці:

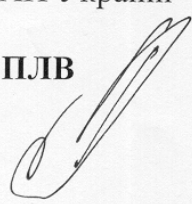
Види робіт	Підрозділи-виконавці	Відповідальні виконавці (П.І.П.)	Строки виконання робіт	Звітний документ
1	2	3	4	5
1. Визначення патентоспроможності результатів НДР	Кафедра СЕП	Панченко В.І., Кольцов І.Б.	4 квартал 2011 р.	Довідка про пошук Форма Г1.1
1.1. ТЕПО НДР	Кафедра СЕП	Панченко В.І., Кольцов І.Б.	4 квартал 2011 р.	Форма Г.1.4
1.2. Аналіз новизни, рівня винахідництва і промислової придатності	Кафедра СЕП	Панченко В.І., Кольцов І.Б.	4 квартал 2011 р.	Форма Г.1.5
2. Аналіз можливості застосування в ОГД відомих об'єктів промислової власності	Кафедра СЕП	Панченко В.І., Кольцов І.Б.	4 квартал 2011 р.	Форма Г.2.4 Звіт

**Керівник підрозділу-виконавця робіт**

д-р техн. наук,  
академік НАН України

  
 \_\_\_\_\_ **Г.Г. Півняк**

**Керівник ПЛВ**



**О.О. Філонова**

## РЕГЛАМЕНТ ПОШУКУ

Найменування теми "Енергозберігаючі технології електропостачання транспорту з індуктивним підводом енергії"

Шифр теми: ГП-420

Етап : "Аналіз якості електроенергії в системі електропостачання рухомого електроспоживача після використання нових технологій живлення"

Номер, дата завдання на проведення патентних досліджень № 1

Обґрунтування регламенту пошуку:

1. Визначення патентної ситуації.

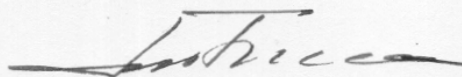
Початок пошуку 01.06.2009 р. Закінчення пошуку 29.12.2011 р.

Таблиця Б.1

Предмет пошуку (ОГД)	Ціль пошуку інформації	Держава пошуку	Класифікаційні індекси: МПК, НПК, МКПЗ, МКТП, УДК	Ретроспективний пошук	Джерела інформації
1	2	3	4	5	6
Енергозберігаючі технології електропостачання транспорту з індуктивним підводом енергії на рухомий об'єкт.	Визначення патентної ситуації щодо ОГД	СРСР, Україна, Росія	МПКВ60 L 5/00 – 11/00, 13/00, 15/00, 5/40, 11/16; НО2J 7/34; НО2М 10/00 – 10/54, Н01F1/44, Н02К41/02.	1970 - 2011	„Бюллетень изобретений”, „Изобретения в СССР и за рубежом”, „Промислова власність”.

Керівник підрозділу – виконавця робіт

д-р техн. наук,  
академік НАН України

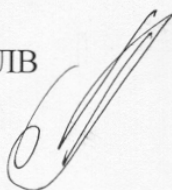


Г.Г. Півняк

27.12.2011

(дата)

Керівник ПЛВ



О.О. Філонова

(дата)

## ДОВІДКА ПРО ПОШУК

**Завдання на проведення патентних досліджень (пошуку): № 1**  
(номер)

**Етап : "Аналіз якості електроенергії в системі електропостачання рухомого електроспоживача після використання нових технологій живлення "**

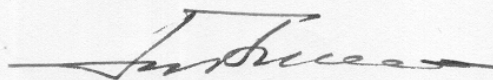
Початок пошуку 01.06.2009 р. Закінчення пошуку 29.12.2011 р.

Таблиця В.1 Джерела інформації, використані під час проведення пошуку

Предмет пошуку (ОГД)	Держава пошуку	Класифікаційні індекси	Інформаційна база, використана під час пошуку	Бібліографічні дані першого та останнього за хронологією джерела інформації	
				Патентна інформація	Інша наукова – технічна інформація
1	2	3	4	5	6
Енергозберігаючі технології електропостачання транспорту з індуктивним підводом енергії на рухомий об'єкт.	СРСР, Україна, Росія.	МПКВ60 L 5/00 – 11/00, 13/00, 15/00, 5/40, 11/16; НО2J 7/34; НО2М 10/00 – 10/54 Н01F1/44, Н02К41/02.	„Бюлетень изобретений”, „Изобретения в СССР и за рубежом”, „Промислова власність”.	„Бюллетень изобретений” 1977 №2; „Промислова власність” 2011, №4.	—

**В.2 Висновки про виконання регламенту пошуку – пошук по опублікованій патентній інформації виконаний повністю.**

Керівник підрозділу – виконавця робіт  
д-р техн. наук,  
академік НАН України

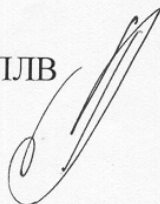


Г.Г. Півняк

27.12.2011

(дата)

Керівник ПЛВ



О.О. Філонова

(дата)



164

**ЗАТВЕРДЖУЮ**  
**Голова секції НТР за науковим**  
**напрямком,**  
 канд/техн. наук, проф.  
 О.Б.Іванов  
 «27» 12 2011 р

**Д О В І Д К А**  
 про оцінку науково - технічного рівня НДР  
**Тема ГП-420 „ Енергозберігаючі технології електропостачання транспорту**  
**з індуктивним підводом енергії ”**

**ТЕХНИКО - ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ**

Найменування і одиниця вимірювання	Значення техніко - економічних показників	
	Кращого аналога	Розробленого об'єкта
1. Питома енергоємність кінетичного (інерційного) накопичувача енергії, кДж/кг.	74	85
2. Маса кінетичного накопичувача енергії, кг.	2400	2250
3. Витрати провідникового матеріалу, кг/км.	1070	580

Перелік поданих заявок (патентів):

**Патенти:**

1. Система електропостачання з лінійним електродвигуном, UA №93624 від 25.02.2011 р. авт. Півняк Г.Г., Панченко В.І., Рибалко А.Я., Кольцов І.Б.
2. Система електропостачання з монорейкою, UA №95534 від 10.08.2011 р. авт. Півняк Г.Г., Панченко В.І., Рибалко А.Я., Кольцов І.Б., Дибрін С.В.
3. Спосіб збільшення індуктивного зв'язку кабелів тягової мережі з обмоткою енергоприймача безконтактного електровоза та пристрій для його реалізації, UA №94740 від 10.06.2011 р. авт. Півняк Г.Г., Панченко В.І., Рибалко А.Я., Кольцов І.Б., Дибрін С.В.

**Заявки на винаходи:**

1. Маховик зі змінним моментом інерції, № а201015156 від 16.12.2010 р. авт. Півняк Г.Г., Панченко В.І., Рибалко А.Я., Кольцов І.Б.
2. Пристрій зі змінним моментом енергії, № а201015150 від 16.12.2010 р. авт. Півняк Г.Г., Панченко В.І., Рибалко А.Я., Кольцов І.Б.

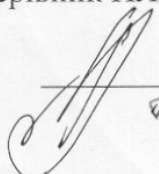
**Відомості НОУ - ХАУ:** Вибір параметрів системи електропостачання транспорту з індуктивним підводом енергії, що забезпечить зменшення втрат потужності в елементах системи та економію магнітних та провідникових матеріалів.

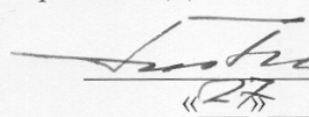
**ЗАГАЛЬНА ОЦІНКА НАУКОВО - ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ НДР**

Перевищує сучасний рівень науки та техніки

Керівник ПЛВ

Керівник НДР

  
 О.О. Філонова  
 «27» 12 2011 р.

  
 Г.Г. Півняк  
 «27» 12 2011 р.



Доботок В 165

**Державний вищий навчальний заклад  
«Національний гірничий університет»**

**ВИТЯГ З ПРОТОКОЛУ № 3**

засідання секції науково-технічної Ради за науковим напрямом "Проблеми  
гірничої та металургійної електроенергетики, енергозбереження"

**м. Дніпропетровськ**

**12 грудня 2011 р.**

ПРИСУТНІ: Голова секції – професор Іванов О.Б., вчений секретар – доцент Рухлов А.В., професори: Корсун В.І., Випанасенко С.І., Шкрабець Ф.П., Казачковський М.М., доцент Панченко В.І.

СЛУХАЛИ: інформацію виконавця теми ГП-420 доцента Панченко В.І. про виконання науково-дослідної роботи ГП-420 "ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТРАНСПОРТУ З ІНДУКТИВНИМ ПІДВОДОМ ЕНЕРГІЇ". Доповідач виклав отримані результати при виконанні етапу 2011 року: "Аналіз якості електроенергії в системі електропостачання рухомого електроспоживача після використання нових технологій живлення".

За результатами аналізу використання накопичувача електричної енергії для транспортних засобів вугільних шахт отримано наступні результати.

Розроблено КАЕЕ з використанням маховика із пружинного матеріалу, в якому накопичується і використовується як кінетична, так і потенційна енергія, що дозволить зменшити розміри та масу маховика. Крім того, забезпечення кожного з пакетів статора окремою обмоткою змінного струму дозволить використати кілька різних варіантів ввімкнення котушок обмоток з метою одержання різних за розміром вихідних напруг електричної машини як генератора та приєднання машини в режимі двигуна до різних за розміром напруг живлення, що дозволить збільшити розмір накопиченої енергії і поліпшити якість напруги для споживачів електричної енергії.

Проведено аналіз впливу графіка навантаження енергоприймача на розмір втрат енергії в колі його обмотки. Мінімальні втрати будуть при незмінній в часі потужності навантаження. При нерівномірному графіку навантаження втрати помітно зростають (максимум до 100 %).

Визначено умови, за яких використання ємнісного накопичувача енергії на електровозі забезпечує зменшення сумарних втрат енергії.

Запропоновано й обґрунтовано застосування переривчастого живлення тягової лінії і обмотки енергоприймача електровозу з метою зменшення в них втрат енергії. При цьому можна одержати зниження втрат до 30 %.

Для зменшення втрат потужності у тяговій лінії транспорту з індуктивною передачею енергії на електровоз встановлюють ємнісний накопичувач енергії.

Для використання енергії гальмування транспорту (потягу) на період гальмування або на окрему його частину двигуни електровоза переводять в генераторний режим роботи. Енергія, що при цьому виробляється, заряджає ємнісний накопичувач.

Для ефективного електродинамічного гальмування обмотку збудження кожного з двигунів електровоза відокремлюють від обмотки якоря і приєднують до керованого

джерела живлення постійним струмом. Обмотки якорів на початку гальмування вмикають взаємно-паралельно, а через деякий час – взаємно-послідовно. Це, а також збільшення струму збудження двигунів дає змогу забезпечити достатньо високий рівень вихідної напруги обмоток якорів протягом значної частини періоду гальмування, що, у свою чергу, робить більш ефективною роботу ємнісного накопичувача.

Для подальшого збільшення ефективності використання енергії гальмування необхідно застосовувати відповідні зарядні пристрої з трансформаторами для підвищення вхідної напруги накопичувача.

Розглянутий зарядний пристрій має наступні важливі достоїнства:

- відносно малі масу та габарити;
- високі енергетичні характеристики та надійність роботи завдяки простоті схеми й алгоритму керування;
- принципова можливість використання індуктивності розсіювання трансформатора в якості елемента резонансного контуру, що спрощує конструкцію ЗП;
- можливість ефективного використання при зменшенні напруги живлення.

Проведено аналіз підключення мостової схеми зарядного пристрою ємнісного накопичувача енергії на електровозі та визначено закони керування накопичувальним блоком по напрузі та по струму.

Визначена залежність питомого періоду керування схемою від питомого струму накопичувального блоку.

Пропонована система електропостачання безконтактного електровоза зі стаціонарними накопичувачами енергії та допоміжної тягової лінії, приєднаної через реверсивний інвертор до накопичувача енергії, який забезпечить накопичення енергії гальмування транспортного засобу та її ефективне використання в подальшому та гарантування мінімального необхідного запасу енергії на випадок аварії.

За матеріалами теми отримано 7 патент.

План роботи поточного року виконано повністю.

**ВИСТУПИЛИ:** Професор Корсун В.І., який дав позитивну оцінку результатам виконаної роботи та відзначив, що отримані результати відповідають етапам календарного плану і технічному завданню на НДР. У роботі досягнуто поставлену мету.

Професор Корсун В.І. рекомендував звіт по НДР затвердити.

**УХВАЛИЛИ:**

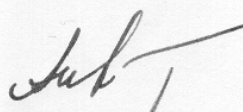

1. Виконаний етап теми за 2011 р. відповідає календарному плану, програмі і технічному завданню у повному обсязі.

2. Науково-технічний рівень розробки відповідає сучасному рівню науки і техніки, робота має теоретичне і практичне значення.

3. Матеріали, викладені у звіті, не містять відомостей, що можуть скласти предмет винаходу або відкриття, а також відомостей, які складають державну таємницю.

4. Заключний звіт схвалити і рекомендувати до затвердження.

Голова секції,  
професор  
Вчений секретар секції,  
доцент

О.Б. Іванов

А.В. Рухлов

**ВИТЯГ З ПРОТОКОЛУ № 12**

засідання кафедри систем електропостачання  
Державного ВНЗ «Національний гірничий університет»

м. Дніпропетровськ

09 грудня 2011 р.

**ПРИСУТНІ:** Заст. зав. кафедрою професор Випанасенко С.І., професори : Білий М.М., Заїка В.Т.; доценти: Волотковська Н.С., Корольов А.М., Хованська О.І., Рухлов А.В., Хацкевич Ю.В., Ольшевський Г.С, ст. викладач Ковольов О.Р., асистенти: Кольцов І.Б, Овсяников В.В., Папаїка О.Г., Бобров О.В., Рухлова Н.Ю., Румянцев А.С., Дибрін С.В, аспіранти: Прокуда В.М., Луценко І.М., Винокуров В.В., Кошовий Д.О.

**СЛУХАЛИ:** Інформацію виконавця теми ГП-420 ст. викладача Кольцова І.Б. про виконання науково-дослідної роботи ГП-420 "ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ТРАНСПОРТУ З ІНДУКТИВНИМ ПІДВОДОМ ЕНЕРГІЇ". Доповідач виклав отримані результати при виконанні етапу : *"Аналіз якості електроенергії в системі електропостачання рухомого електроспоживача після використання нових технологій живлення"* 2011 року:

Розроблено КАЕЕ з використанням маховика із пружинного матеріалу, в якому накопичується і використовується як кінетична, так і потенційна енергія, що дозволить зменшити розміри та масу маховика. Крім того, забезпечення кожного з пакетів статора окремою обмоткою змінного струму дозволить використати кілька різних варіантів ввімкнення котушок обмоток з метою одержання різних за розміром вихідних напруг електричної машини як генератора та приєднання машини в режимі двигуна до різних за розміром напруг живлення, що дозволить збільшити розмір накопиченої енергії і поліпшити якість напруги для споживачів електричної енергії.

Проведено аналіз впливу графіка навантаження енергоприймача на розмір втрат енергії в колі його обмотки. Мінімальні втрати будуть при незмінній в часі потужності навантаження. При нерівномірному графіку навантаження втрати помітно зростають (максимум до 100 %).

Визначено умови, за яких використання емнісного накопичувача енергії на електровозі забезпечує зменшення сумарних втрат енергії.

Запропоновано й обґрунтовано застосування переривчастого живлення тягової лінії і обмотки енергоприймача електровозу з метою зменшення в них втрат енергії. При цьому можна одержати зниження втрат до 30 %.

Для зменшення втрат потужності у тяговій лінії транспорту з індуктивною передачею енергії на електровоз встановлюють емнісний накопичувач енергії.

Для використання енергії гальмування транспорту (потягу) на період гальмування або на окрему його частину двигуни електровоза переводять в генераторний режим роботи. Енергія, що при цьому виробляється, заряджає емнісний накопичувач.

Для ефективного електродинамічного гальмування обмотку збудження кожного з двигунів електровоза відокремлюють від обмотки якоря і приєднують до керованого джерела живлення постійним струмом. Обмотки якорів на початку гальмування вмикають взаємно-паралельно, а через деякий час – взаємно-послідовно. Це, а також збільшення струму збудження двигунів дає змогу забезпечити достатньо високий рівень вихідної напруги обмоток якорів протягом значної частини періоду гальмування, що, у свою чергу, робить більш ефективною роботу емнісного накопичувача.



Для подальшого збільшення ефективності використання енергії гальмування необхідно застосовувати відповідні зарядні пристрої з трансформаторами для підвищення вхідної напруги накопичувача.

Розглянутий зарядний пристрій має наступні важливі достоїнства:

- відносно малі масу та габарити;
- високі енергетичні характеристики та надійність роботи завдяки простоті схеми й алгоритму керування;
- принципова можливість використання індуктивності розсіювання трансформатора в якості елемента резонансного контуру, що спрощує конструкцію ЗП;
- можливість ефективного використання при зменшенні напруги живлення.

Проведено аналіз підключення мостової схеми зарядного пристрою ємнісного накопичувача енергії на електровозі та визначено закони керування накопичувальним блоком по напрузі та по струму.

Визначена залежність питомого періоду керування схемою від питомого струму накопичувального блоку.

Пропонована система електропостачання безконтактного електровоза зі стаціонарними накопичувачами енергії та допоміжної тягової лінії, приєднаної через реверсивний інвертор до накопичувача енергії, якій забезпечить накопичення енергії гальмування транспортного засобу та її ефективне використання в подальшому та гарантування мінімального необхідного запасу енергії на випадок аварії.

За матеріалами теми отримано 7 патент.

План роботи поточного року виконаний повністю.

ВИСТУПИЛИ: Проф. Заїка В.Т. та проф. Білий М.М. які дали позитивну оцінку результатам виконаної роботи. Відзначили, що отримані результати відповідають етапам календарного плану і технічному завданню на НДР. В роботі досягнута поставлена ціль.

Професор Заїка В.Т. рекомендував звіт по НДР затвердити, а також рекомендувати до продовження фінансування роботи в 2012 р.

УХВАЛИЛИ:

1. Виконані етапи теми за 2011 р. відповідають календарному плану, програмі та технічному завданню в повному об'ємі.

2. Науково-технічний рівень розробки відповідає сучасному рівню науки і техніки, робота має теоретичне і практичне значення.

3. Матеріали, викладені в звіті, не містять відомостей, які можуть скласти предмет винаходу або відкриття, а також відомостей, які складають державну таємницю.

4. Заключний звіт схвалити і рекомендувати до затвердження.

Заст. зав. кафедри систем електропостачання,  
д.т.н., професор

С.І.Випанасенко

Вчений секретар кафедри систем електропостачання,  
доцент

Ю.В. Хацкевич

Додаток Д 169

## РЕЦЕНЗІЯ

на звіт 2009 - 2011 рр. по НДР ГП-420

*«Енергозберігаючі технології електропостачання транспорту з індуктивним підводом енергії».*

Представлена для рецензії робота спрямована на вдосконалювання рудничного транспорту на виробництвах небезпечних за газом та пилом і на цей час не втратила своєї актуальності. В роботі представлено нові шляхи безпечного і енергозберігаючого електропостачання, поліпшення якого забезпечується за рахунок використання акумулятора кінетичної енергії та ємнісних накопичувачів електричної енергії.

Напрямок дослідницької роботи - включення в систему електропостачання комплексу транспорту нових елементів з позиції зменшення витрат електричної енергії та витрат провідникових матеріалів.

Отримані наукові результати відображують поставлені цим науково-дослідницької роботи. Отримано важливі результати з використанням акумуляторів енергії на транспорті: оптимальні тривалості заряду і розряду накопичувачів енергії; раціональні варіанти схем заряду й розряду накопичувачів; співвідношення витрат енергії в некерованому й керованому процесі розгону кінетичного накопичувача та заряду ємнісного накопичувача електричної енергії і т.д. Отримані технічні результати захищені патентами.

Матеріал, викладений у звіті, дає можливість використовувати його при виборі параметрів елементів електрообладнання для енергозберігаючої системи електропостачання транспорту з індуктивною передачею енергії електровозам. Представлено рекомендації по використанню результатів у відповідній нормативній і проектній документації.

Результати, викладені у звіті, мають наукове й практичне значення й рекомендуються до використання у проектах транспортних систем для шахт. Рекомендується схвалити звіт рекомендувати продовжити дослідження у даному напрямку.

Завідувач кафедри  
метрології та інформаційно -  
вимірювальних технологій  
ДВНЗ «НГУ» України,  
д.т.н., професор



В.І. Корсун

Підпис	<i>Корсун В.І.</i>	посвідчую:
		Зав. канцелярією НГУ
• 30 •	12	2011 р.

**РЕЦЕНЗІЯ**

на звіт 2009 - 2011 рр. по НДР ГП-420

**«Енергозберігаючі технології електропостачання транспорту з індуктивним підводом енергії».**

Представлена на рецензію робота - це теоретична розробка по вдосконалюванню системи електропостачання транспорту з безконтактною передачею енергії на пересувний об'єкт через індуктивний зв'язок. Проведені дослідження є актуальними з позиції енергозберігаючих технологій. Напрямок розробок - удосконалювання елементів електроустаткування системи електропостачання з індуктивною передачею з позиції зменшення втрат електричної енергії й витрат провідникових матеріалів.

Викладені в роботі результати є продуктивними з інженерної і наукової точок зору. Треба відзначити наступні результати роботи: алгоритм зарядних процесів кінетичного накопичувача енергії з мінімальним споживанням енергії за період заряду; аналіз електромеханічного накопичувача енергії, в якому застосовано зарядний двигун постійного струму з незалежним збудженням; математична модель споживаної від джерела живлення енергії і сумарних втрат потужності за час заряду накопичувача енергії; залежність зміни кутової швидкості розгінного двигуна при розкручуванні електромеханічного накопичувача енергії що забезпечить максимальне значення коефіцієнту корисної дії процесу заряду накопичувача; співвідношення оптимального часу зарядного процесу, якому відповідає мінімум енергії втрат, та значення струму джерела живлення.

Одержані технічні результати захищені патентами.

Матеріал, викладений у звіті, дозволить вдосконалити комплекс обладнання підземного безконтактного електровозного транспорту з позиції енергозберігаючих технологій у системі електропостачання. Рекомендується використовувати результати у розробці відповідної проектної й нормативної документації.

Результати, викладені у звіті, мають наукове і практичне значення та можуть бути використані - для вдосконалювання комплексу електрообладнання безконтактного транспорту. Рекомендується схвалити звіт і продовжити дослідження в даному напрямку.

Директор "Дніпровського гірничого наукового центра" Академії гірничих наук України,  
д-р тех. наук, професор



Ю.Т.Разумний



Додаток № 171

УТВЕРЖДАЮ  
 Главный инженер  
 ГОАО институт «Днепрогипрошахт»  
 Недолужко В.Н.  
 «19» \_\_\_\_\_ 2011 г.



## Акт

о внедрении результатов научно-исследовательской работы НГУ, № ГП-420  
**«Энергосберегающие технологии электроснабжения транспорта с индуктивным подводом энергии»** (№ г.р. 0109U002805, научный руководитель академик НАН Украины, д-р техн. наук, профессор Пивняк Г.Г., отв. исп. канд. техн. наук, профессор Рыбалко А.Я.)

Научно-исследовательская работа ГП-420 – это продолжение совершенствования системы электроснабжения с бесконтактной передачей энергии на подвижной электропотребитель через индуктивную связь (например для рудничного транспорта с использованием электрооборудования переменного тока повышенной частоты диапазона 4...10 кГц). Работа направлена на согласование элементов системы электроснабжения с новыми техническими решениями с позиции уменьшения потерь электроэнергии и затрат проводниковых материалов.

В состав документов «Типового проекта по устройству и монтажу тяговых сетей и преобразовательных подстанций для комплекса откатки электровозами В14-900 (I-я редакция), Днепрогипрошахт, арх. № 157824» из выполненной работы включены следующие разработки.

Разработан кинетический аккумулятор электрической энергии с использованием маховика из пружинного материала, в котором накапливается и используется как кинетическая, так и потенциальная энергия, которая дает возможность уменьшить размеры и массу маховика.

Разработана конструкция кинетического накопителя электрической энергии с генератором сменного тока, в котором ротор размещен извне статора, а в пазах ротора закреплены постоянные магниты с радиальной намагниченностью для раскручивания маховика накопителя с целью использования его на бесконтактном электровозе.

Предлагается система электроснабжения бесконтактного электровоза со стационарными накопителями энергии и вспомогательной тяговой линией, присоединенной через реверсивный инвертор к накопителю энергии, которой обеспечит накопление энергии торможения транспортного средства и ее эффективное использование в дальнейшем и гарантирует минимальный необходимый запас энергии на случай аварии.

Выполнен вариант с использованием энергии торможения транспорта (поезда), где на период торможения или на отдельную его часть двигателя

электровоза переводят в генераторный режим работы. Энергия, которая при этом производится, заряжает емкостный накопитель.

Для эффективного электродинамического торможения обмотку возбуждения каждого из двигателей электровоза отделяют от обмотки якоря и присоединяют к управляемому источнику питания постоянным током. Обмотки якорей в начале торможения включают взаимно - параллельно, а спустя некоторое время - последовательно. Это, а также увеличение тока возбуждения двигателей дает возможность обеспечить достаточно высокий уровень исходного напряжения обмоток якорей на протяжении значительной части периода торможения, которое, в свою очередь, делает более эффективной работу емкостного накопителя.

Для дальнейшего увеличения эффективности использования энергии торможения необходимо применять соответствующие зарядные устройства с трансформаторами для повышения входного напряжения накопителя.

Рассмотренное зарядное устройство имеет следующие важные достоинства:

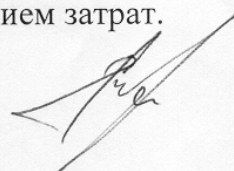
- относительно малые массу и габариты;
- высокие энергетические характеристики и надежность работы благодаря простоте схемы и алгоритма управления;
- принципиальная возможность использования индуктивности рассеяния трансформатора в качестве элемента резонансного контура, который упрощает конструкцию ЗП;
- возможность эффективного использования при уменьшении напряжения питания.

Разработана новая конструкция маховика с вертикальной осью вращения и полый овальной камерой в поперечном сечении и постоянным магнитом в виде полого цилиндра, намагниченного по образующей и с кольцевыми полюсными наконечниками, который дает возможность увеличить объем эффективно действующей ферромагнитной жидкости и, как следствие, размер накопительного маховика механической энергии.

Результаты изложены в данной научно-исследовательской работе могут служить основой для проектной проработки вопросов связанных с энергосберегающими элементами электрооборудования в системе электроснабжения с бесконтактной передачей энергии на подвижные электропотребители.

Документы «Типового проекта по устройству и монтажу тяговых сетей и преобразовательных подстанций для комплекса откатки электровозами В14-900 (I-я редакция), Днепрогипрошахт, арх. № 157824» могут быть переданы заказчикам на договорной основе с возмещением затрат.

Начальник электротехнического отдела



К. В. Гичев

Главный энергетик



В.И. Загний