

УДК 621.315:622.625.28-83
N держреєстрації 0107U000379
Інв.N _____

Міністерство освіти і науки України
НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ
(НГУ)

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

ЗАТВЕРДЖЕНО:

Проректор з наукової роботи,
д-р техн. наук, професор

_____ О.С. Бешта

29 грудня 2008 р.

З В І Т
ПРО НАУКОВО – ДОСЛІДНУ РОБОТУ

ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ПЕРЕСУВНИХ СПОЖИВАЧІВ З ІНДУКТИВНОЮ
ПЕРЕДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ

(заключний)

ГП-397

Начальник НДЧ,
канд. техн. наук, доц.

О.Є. Хоменко

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

Г.Г. Півняк

2008

Рукопис закінчено 29.12.2008 р.
Результати цієї роботи розглянуто Вченою Радою НГУ
протокол № 8 від 16.12.2008 р.

СПИСОК АВТОРІВ

Науковий керівник напряму, науковий керівник теми, головний науковий співробітник, д-р техн. наук, проф., академік НАН України	Г.Г.Півняк (всі розділи)
Відповідальний виконавець теми, ведучий науковий співробітник, канд. техн. наук, професор	А.Я.Рибалко (всі розділи)
Старший науковий співробітник, канд. техн. наук, доцент	Ю.М.Зражевський (4.5 розділ)
Старший науковий співробітник, канд. техн. наук, доцент	М.Г.Поляков (1,4 розділи)
Науковий співробітник, доцент	В.І.Панченко (всі розділи)
Науковий співробітник, асистент	І.Б.Кольцов (всі розділи)
Науковий співробітник, доцент	Л.П.Ворохов (4,8 розділ)
Молодший науковий співробітник, аспірант	С.В.Дибрин (2,8 розділ)
Нормоконтролер	Л.О.Савостенко

В підготовці робіт по НДР і оформленні звіту брали участь:
ст.лаборант Дибрина А.В., студент: лаборант Зуенок В.В.

РЕФЕРАТ

Звіт про НДР: 155 с., 38 рис., 5 таблиць, 26 джерел, 6 додатків.

Об'єктом аналізу є передача енергії індуктивним способом на пересувний об'єкт і як наслідок вплив електромагнітного поля на об'єкти в перетині гірничій виробітки. Забезпечення безпечної експлуатації системи електропостачання безконтактного транспорту у відкатувальних штреках.

Мета досліджень – це вдосконалення з позиції енергозбереження елементів комплексу обладнання та побудови системи електропостачання індуктивною передачею енергії і їх електромагнітної сумісності в умовах гірничодобувних підприємств.

Отримані при виконанні НДР такі результати:

Розроблена методика розрахунку параметрів вузла «тягова мережа – енергоприймач», яка базується на отриманих графічних співвідношеннях, для забезпечення найбільшого значення коефіцієнта корисної дії при зменшенні втрат електричної енергії та витрати провідникових матеріалів. Отримана математична модель поглинання електромагнітної енергії від тягової мережі та енергоприймачів електровозів елементами навколишнього середовища та тілом людини. Визначена споживана потужність при роботі електровозів з позиції балансу потужності. Надана оцінка енергетичним показникам електроустаткування електровоза при застосуванні кінетичного акумулятора та ємнісних накопичувачів електричної енергії.

РУДНИКОВИЙ БЕЗКОНТАКТНИЙ ЕЛЕКТРОВОЗ, ТЯГОВА МЕРЕЖА,
ЕНЕРГОПРИЙМАЧ, ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА СИСТЕМА
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, НАКОПИЧУВАЧІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

З М І С Т

Вступ	6
1 Вибір і застосування раціональної розробленої конструкції тягової мережі з позиції енергозбереження	9
1.1 Загальні положення	9
1.2 Пристрій для передачі електромагнітної енергії електровозу з котушковою тяговою лінією	10
1.3 Розрахунок електричних характеристик пристрою	17
2 Вибір і застосування раціональної розробленої конструкції енергоприймача з позиції енергозбереження	23
2.1 Енергоприймач з імпульсним режимом роботи	23
2.2 Перехідні процеси при ввімкненні живлення тягової лінії	28
2.3 Розрахунок коренів характеристичного рівняння	33
2.4 Перехідні процеси при ввімкненні навантаження	35
2.5 Енергоприймачі з напівзамкненим магнітним колом	38
2.6 Розрахунок ефективності енергоприймача з напівзамкненим магнітним колом	42
3 Оцінка впливу електромагнітних полів в перетині штреку на сторонні контури від вибраної конструкції «тягова мережа - енергоприймач»	45
3.1 Загальні положення	45
3.2 ЕРС і струми в сторонніх контурах від дії поля тягової лінії	45
3.3 ЕРС і струми в сторонніх контурах від дії поля обмотки енергоприймача	47
4 Електромагнітне узгодження вузла «тягова мережа - енергоприймач»	49
5 Визначення електричного навантаження на тягову мережу і енергоприймач при промисловій експлуатації комплексу	71
5.1 Процеси при передачі енергії пересувним електроспоживачам у системі електропостачання вузла "тягова мережа - енергоприймач"	71
5.2 Енергія електромагнітного поля в системі електропостачання вузла "тягова мережа - енергоприймач"	72
5.3 Енергія електричного поля конденсатора в системі електропостачання вузла "тягова мережа - енергоприймач"	73
5.4 Складові енергії, пов'язані з наявністю індуктивного зв'язку в системі електропостачання вузла "тягова лінія - енергоприймач" ..	76
5.5 Методика виконання розрахунку параметрів вузла "тягова мережа - енергоприймач" при передачі енергії на електроспоживач"	80
6 Оцінка енергетичних параметрів комплексу і електровоза при застосуванні в системі електропостачання кінетичного акумулятора електричної енергії	89
6.1 Використання накопичувачів енергії в шахтному електровозному транспорті	89

6.2	Енергетичні можливості механічного (інерційного) накопичувача .	89
6.3	Загальні співвідношення для інерційних накопичувачів енергії . . .	91
6.4	Зарядка інерційного накопичувача енергії	94
6.5	Аналіз відомих конструкцій інерційних накопичувачів енергії у транспортних засобах	95
6.6	Пропоновані технічні рішення відносно механічних накопичувачів енергії	99
6.7	Енергетичні можливості електромеханічних накопичувачів енергії	100
6.8	Аналіз відомих конструкцій електромеханічних накопичувачів енергії	103
6.9	Пропозиції відносно електромеханічних накопичувачів енергії для шахтних транспортних засобів	105
7	Оцінка енергетичних параметрів електровоза при використанні ємкісних накопичувачів електричної енергії в системі електропостачання	109
7.1	Обґрунтування доцільності використання ємнісного накопичувача енергії для умов шахтного безконтактного транспорту	109
7.2	Енергетичні можливості ємнісного накопичувача	111
7.3	Використання ємнісних накопичувачів електричної енергії в шахтному електровозному транспорті	113
8	Опис системи електропостачання пересувних електроспоживачів з індуктивною передачею енергії з позиції балансу потужності	117
8.1	Баланс потужності в системі електропостачання з використанням ємнісного накопичувача енергії	117
8.2	Баланс потужності в системі електропостачання з використанням механічного (інерційного) накопичувача	122
	Висновок	126
	Перелік посилань	132
Додаток А	Витяг з протоколу засідання ради НГУ України по науковому напрямку «Проблеми гірничої і металургійної електроенергетики, енергозбереження»	134
Додаток Б	Витяг з протоколу кафедри систем електропостачання . . .	136
Додаток В	Звіт про патентне дослідження	138
Додаток Г	Внутрішня рецензія	152
Додаток Д	Зовнішня рецензія	153
Додаток Е	Акт про впровадження результатів науково-дослідної роботи НГУ	154

ВСТУП

Дослідна промислова експлуатація безконтактних електровозів у вугільних шахтах, що небезпечні по газу чи пилу, показала що нова система значно перевищують акумуляторні електровози по продуктивності, строку експлуатації, мають значний запас енергії при живленні від високочастотної тягової мережі. Безконтактні електровози, які дослідне експлуатувалися на вугільних шахтах України, не мають світових аналогів.

Виконані етапи промислового освоєння цього устаткування такі:

- експериментальний зразок комплексу обладнання з електровозами В10 і В10Б у виконанні РП успішно пройшов випробування та дослідну експлуатацію з 1973р. по 1977р. на шахті «Постніковська» ВО «Шахтарськантрацит»;
- дослідний зразок обладнання підземного транспорту з електровозами В14 у виконанні РП пройшов промислові випробування з 1980р. по 1987 р. знаходився в дослідній експлуатації на шахті ім.Леніна ВО «Ворошиловградвугілля»;
- дослідна партія електровозів В14 у виконанні обладнання РП введена на шахті ім. газети «Ізвестія» ДХК «Донбасантрацит».

Дана робота - це продовження досліджень направлених на створення нових і вдосконалення існуючих методик і технічних розв'язань транспорту з безконтактною передачею енергії на рухомий електроприймач. Науково дослідницька робота (НДР) складається з двох етапів 2007 р., і 2008 р. під загальним напрямом «ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПЕРЕСУВНИХ СПОЖИВАЧІВ З ІНДУКТИВНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ» «РОЗРОБКА СПОСОБІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ІНДУКТИВНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ».

У виконаній роботі ставилася задача дослідження:

- вибір і застосування раціональної розробленої конструкції тягової мережі з позиції енергозбереження;
- вибір і застосування раціональної розробленої конструкції енергоприймача з позиції енергозбереження;
- оцінка впливу електромагнітних полів в перетині штреку на сторонні контури від вибраної конструкції «тягова мережа - енергоприймач»;
- електромагнітне узгодження вузла «тягова мережа - енергоприймач»;
- визначення електричного навантаження на тягову мережу і енергоприймач при промисловій експлуатації комплексу;
- оцінка енергетичних параметрів комплексу і електровоза при застосуванні в системі електропостачання кінетичного акумулятора електричної енергії;
- оцінка енергетичних параметрів електровоза при використанні ємкісних накопичувачів електричної енергії в системі електропостачання;
- опис системи електропостачання пересувних електроспоживачів з індуктивною передачею енергії з позиції балансу потужності.

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 підготовки 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 27.10.06 р. № 732, наказ по НГУ від 20.12.06 р. № 337.

Етап 2007 р. ”Вибір і застосування раціональних конструктивних вузлів системи електропостачання пересувних електроспоживачів з індуктивною передачею енергії.”

Етап 2008 р. ”Баланс потужності системи електропостачання пересувних електроспоживачів з індуктивною передачею енергії при використуванні енергозберігаючого обладнання і енергоакумуляторів.”

Термін проведення роботи: початок – 02.01.2007 р. закінчення – 31.12.2008 р.

1 ВИБІР І ЗАСТОСУВАННЯ РАЦІОНАЛЬНОЇ РОЗРОБЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ З ПОЗИЦІЇ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

1.1 Загальні положення

Тягова лінія системи транспорту звичайно складається з двох спеціальних кабелів, що на початку лінії ввімкнено до джерела високочастотного струму, а в кінці з'єднано між собою, причому джерело живлення працює в режимі джерела струму. Втрати потужності мають місце в активному опорі кабелів лінії та навколишньому середовищі, коли магнітний потік від струму лінії наводить у гірських породах та елементах кріплень виробки електрорушійну силу і викликає відповідні вихрові струми. Розмір втрат потужності в лінії не залежить від навантаження електровоза, що значно знижує коефіцієнт корисної дії системи транспорту. Згідно з формулою $\Delta P_n = I_n^2 R_n$, де I_n – діюче значення струму лінії, R_n – її активний опір, зменшити втрати потужності можна двома шляхами: 1) зменшенням розміру струму I_n та 2) зменшенням R_n .

В останньому випадку треба збільшити поперечний переріз кабелів лінії, що приведе до збільшення витрат мідного дроту та ускладнить конструкцію кріплень кабелів.

Відомо, що активна потужність, що виникає в електричному колі енергоприймача, визначається за формулою:

$$P_e = \frac{(\omega M I_n)^2}{R_e + R_{нв}}$$

де R_e – активний опір обмотки енергоприймача; $R_{нв}$ – активний опір, еквівалентний навантаженню електровоза; ω – кутова частота струму лінії; M – взаємна індуктивність лінії та обмотки.

Із приведеної формули виходить, що зменшення струму лінії при $P'_e = const$ вимагає відповідного збільшення взаєміндуктивності. Останнього можна досягти шляхом зміни конструкцій лінії та енергоприймача (окремо або разом). Так, в [1] запропоновано використати в конструкції лінії магнітопровід (якір) з магнітної гуми, розмістивши його поверх кабелів лінії. Крім того, на поверхні магнітопроводу енергоприймача закріплено щітки з магнітної гуми, що контактують з магнітопроводом лінії при русі електровозу. Таким чином створюють практично замкнуте магнітне коло, що приводить до збільшення взаєміндуктивності M . Недоліком конструкції [1] є значні витрати магнітного матеріалу. Збільшення M при цьому незначне, тому що відносна магнітна проникність магнітної гуми не перевищує 10.

Необхідно зазначити, що крім малих втрат потужності тягова лінія при експлуатації транспорту у вибухонебезпечних середовищах не повинна створювати небезпечних ситуацій, наприклад, викликати значні індуковані струми у трубах, броні кабелів, елементах кріплень гірської виробки тощо. Очевидно, що зміна конструкції тягової мережі часто потребує відповідної зміни конструкції енергоприймача і навпаки.

1.2 Пристрій для передачі електромагнітної енергії електровозу з котушковою тяговою лінією

Розроблено три варіанти конструкції пристрою для передачі електромагнітної енергії на електровоз, тягова лінія якого забезпечує збільшення взаєміндуктивності з обмоткою енергоприймача, а головне – значно підвищує безпеку при експлуатації електровозу.

Пристрій за першим варіантом має у своєму складі тягову лінію (рис. 1.1) із прямокутних котушок 1, що сформовані відповідним чином із прямого 2 та зворотного 3 кабелів лінії. Довжина b_e усіх котушок однакова. Котушки мережі можуть бути одновитковими і багатовитковими. На рис. 1.1 показано одновиткові котушки.

Енергоприймач (рис. 1.1, низ; рис. 1.2) по довжині складається з двох пар 4 і 5 секцій, кожна з яких має магнітопровід 6, зроблений з фериту. У пазах 7 магнітопроводів секцій розміщені витки обмоток 8, причому витки обмоток сусідніх секцій з'єднані між собою послідовно-зустрічно (на рис. 1.1, 4, 6 показано по одному витку обмоток секцій). З'єднані між собою обмотки секцій складають обмотку енергоприймача.

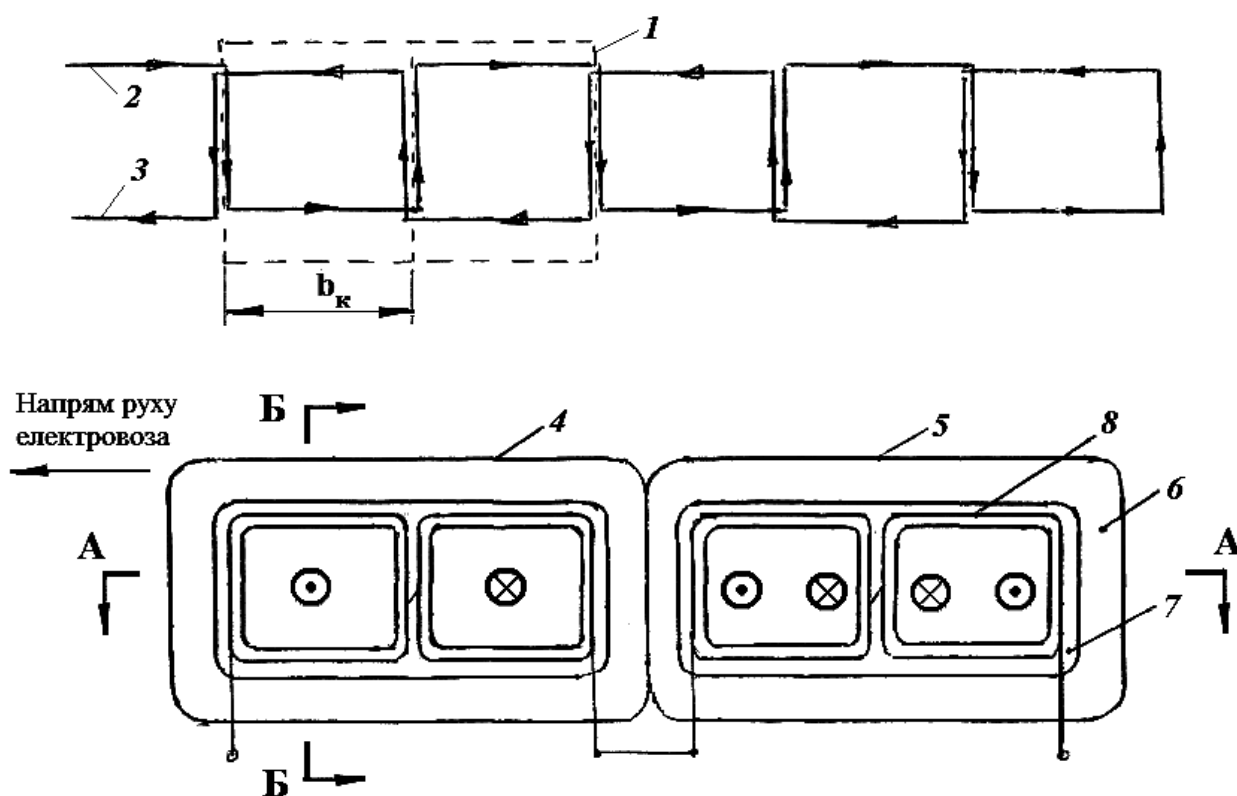


Рисунок 1.1 – Тягова лінія та енергоприймач пристрою за першим варіантом

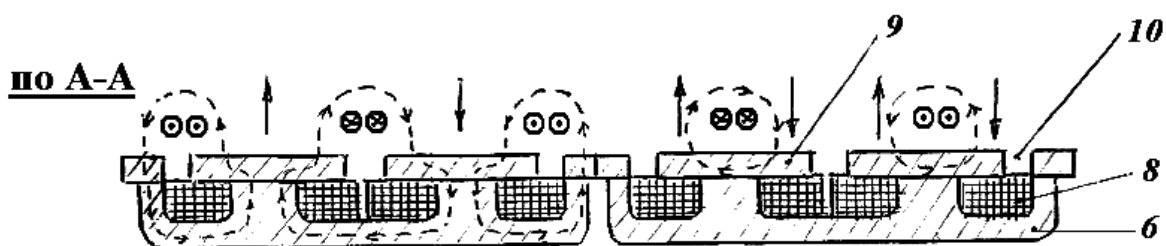


Рисунок 1.2 – Поздовжній переріз енергоприймача за першим варіантом

по Б-Б

Рисунок 1.3 – Поперечний переріз енергоприймача

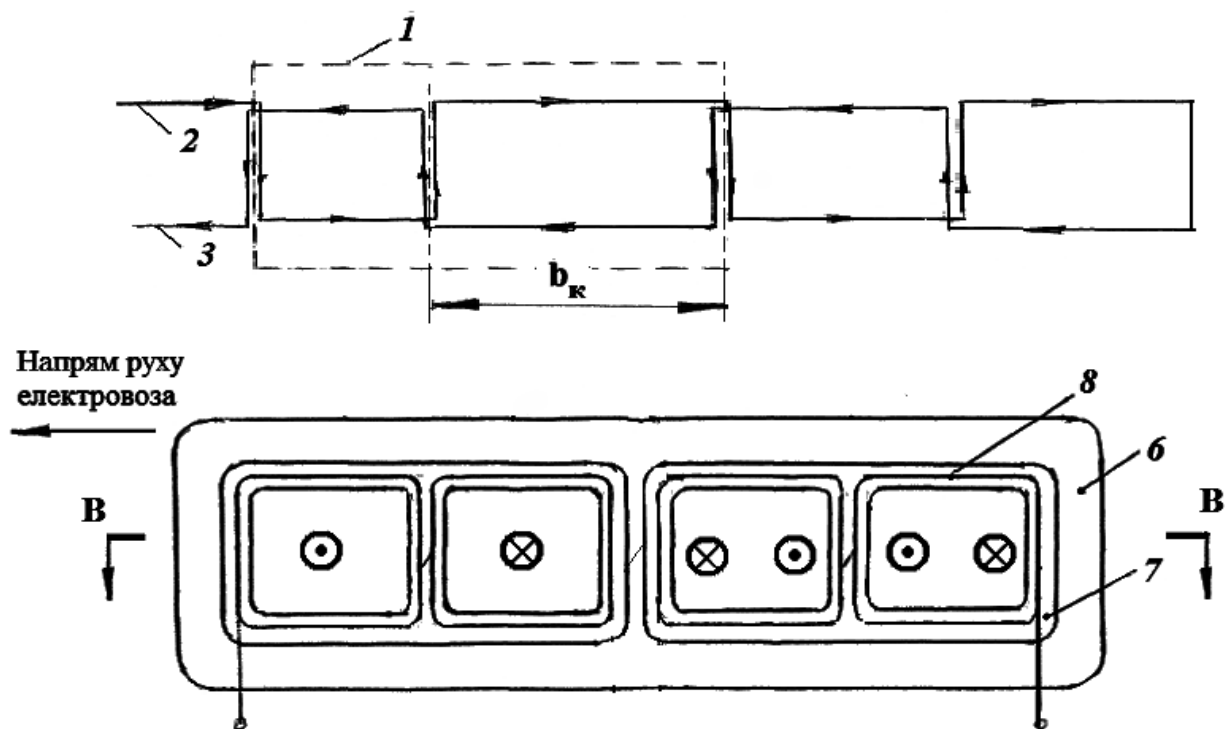


Рисунок 1.4 – Тягова лінія і енергоприймач пристрою за другим варіантом

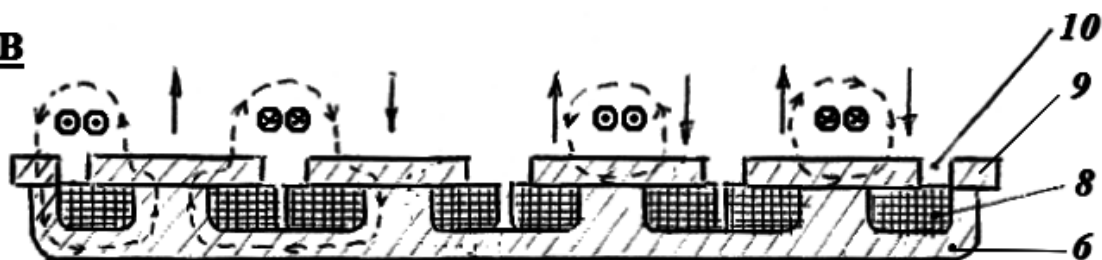
по В-В

Рисунок 1.5 – Поздовжній переріз енергоприймача за другим варіантом

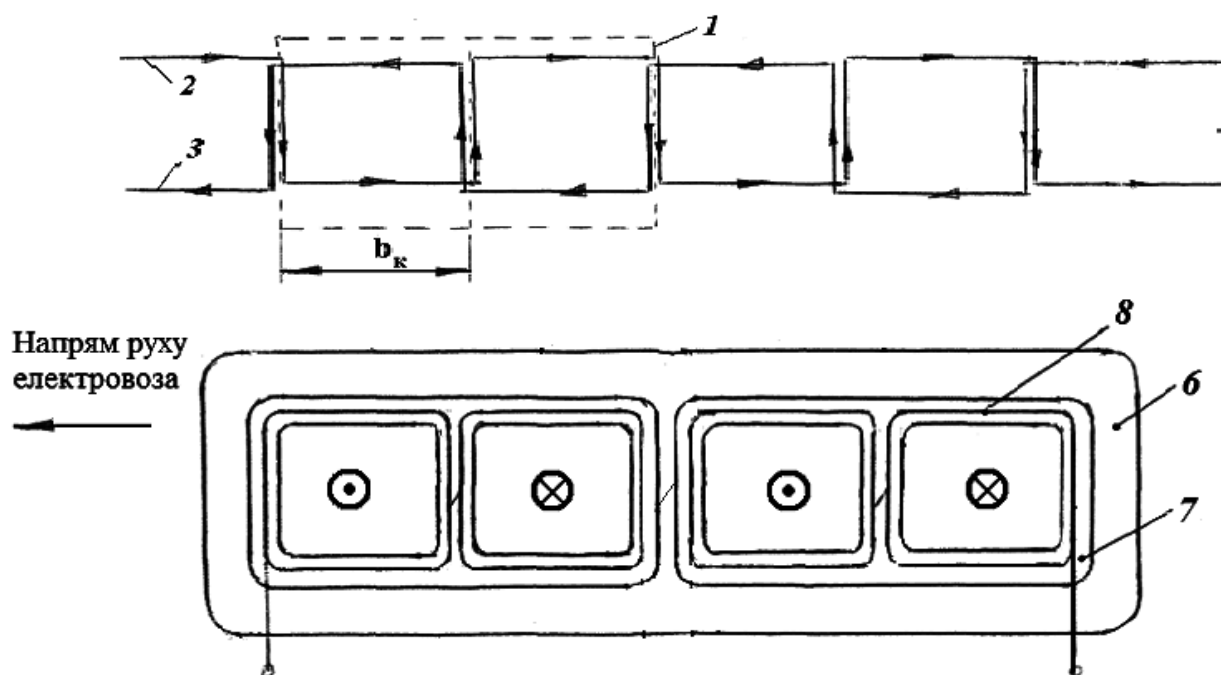


Рисунок 1.6 – Тягова лінія та енергоприймач пристрою за третім варіантом

Вісі котушок тягової лінії і вісі витків обмоток секцій енергоприймача орієнтовані взаємно паралельно і перпендикулярно напрямку руху електровоза.

Пари 4 і 5 секцій енергоприймача (рис. 1.1 і рис. 1.2) мають суміщені магнітопроводи 6, що взаємно зміщені за напрямом руху електровоза таким чином, щоб забезпечити зміщення витків обмоток пар секцій на половину довжини b_k котушки тягової мережі.

Магнітопроводи 6 пар 4 і 5 секцій енергоприймача обладнані полюсними наконечниками 9, що сприяють збільшенню магнітного потоку, охоплюючого витки обмоток секцій.

Поздовжні та поперечні розміри котушок тягової лінії зроблено такими, що співпадають із відстанями між серединою щілин 10 магнітопроводів 6.

Пристрій для передачі електромагнітної енергії за другим варіантом має у своєму складі тягову лінію (рис. 1.4) із прямокутних котушок 1, але довжину b_k зроблено змінною. На рис. 1.4 показано одновиткові котушки,

довжина b_k яких уздовж лінії різна, співвідношення довжин сусідніх котушок складає 1,5.

Енергоприймач (рис. 1.4 і рис. 1.5) у цьому випадку по довжині складається з чотирьох секцій, що мають суміщений магнітопровід 6. В пазах 7 магнітопроводу розміщені витки 8 обмоток секцій. Зміщення сусідніх пар секцій відсутнє. Поздовжні сторони котушок 1 лінії орієнтовані по серединах відповідних щілин 10 магнітопроводу 6. Вісі котушок тягової лінії і вісі витків обмоток секцій енергоприймача орієнтовані перпендикулярно напрямку руху електровоза.

Пристрій за третім варіантом має у своєму складі тягову лінію (рис. 1.6) з прямокутних котушок 1, довжини яких b_k , як і у першому варіанті, зроблені однаковими. Енергоприймач (рис. 1.6) складається по довжині з чотирьох секцій, що мають суміщений магнітопровід 6. Витки 8 обмоток секцій розміщені у пазах 7 магнітопроводу 6. Зміщення сусідніх пар секцій магніто проводу, як і у другому варіанті, відсутнє. Поздовжні та поперечні розміри котушок тягової мережі зроблено такими, що співпадають із відстанями між серединою щілин 10 магнітопроводу 6.

Витки обмоток секцій енергоприймача з'єднані між собою послідовно-зустрічно і утворюють обмотку енергоприймача, що з'єднана через випрямляч з ємнісним накопичувачем енергії. Енергія з останнього живить двигуни електровоза.

Після увімкнення тягової лінії до джерела змінного струму високої частоти в кожній з її котушок виникає змінний магнітний потік, причому у сусідніх котушках просторова орієнтація потоку у кожний момент часу взаємно протилежна. Магнітний потік кожної котушки лінії охоплює через полюсні наконечники 9 та решту магнітопроводу 6 витки 8 обмоток секцій енергоприймача і викликає в них електрорушійну силу (ЕРС). Напрямок дії ЕРС сусідніх секцій протилежний, що зумовлено орієнтацією магнітного потоку котушок мережі, тому для одержання арифметичної суми ЕРС секцій, їх обмотки з'єднують послідовно-зустрічно.

При взаємному положенні котушок тягової лінії і секцій енергоприймача, зображеному на рис. 1.1, 1.2, 1.3, витки обмоток 8 пари 4 секцій пронизує максимальний магнітний потік і в них виникає відповідна ЕРС. При цьому витки обмоток пари 5 секцій знаходяться в зоні дії протилежних за напрямком магнітних потоків, тому ЕРС, що в них виникає, близька до нуля.

При руху електровоза магнітний потік, що пронизує витки обмоток пари 4 секцій, зменшується. Одночасно збільшується магнітний потік, що пронизує витки обмоток пари 5 секцій. Завдяки послідовно-зустрічному з'єднанню витків обмоток усіх секцій ЕРС на виході енергоприймача залишається незмінною по амплітуді при будь-якому положенні енергоприймача відносно тягової лінії. У другому варіанті пристрою при взаємному положенні котушок тягової лінії і секцій енергоприймача, зображеному на рис. 1.4 і рис. 1.5, витки обмоток перших двох секцій пронизує максимально можливий магнітний потік і тому в них виникає відповідна ЕРС. В той же час витки обмоток останніх двох секцій пронизують два однакових магнітних потоки, протилежні за напрямком. Тому у витках цих секцій сумарна ЕРС близька до нуля.

При русі електровозу магнітний потік, що пронизує витки обмоток перших двох секцій зменшується. В той же час збільшується магнітний потік, що пронизує витки обмоток останніх двох секцій енергоприймача. При цьому сумарна ЕРС на виході енергоприймача дещо змінюється за рівнем, але ніколи не досягає нуля (при показаному на рис. 1.1 співвідношенні довжин сторін котушок мінімальне значення ЕРС складає 0,6 від максимального).

У третьому варіанті пристрою у початковий момент часу, коли вісі котушок 1 тягової лінії і вісі витків 8 обмоток секцій енергоприймача (рис. 1.6) співпадають, обмотки секцій пронизує максимально можливий магнітний потік. На виході обмотки енергоприймача, що складається з обмоток окремих секцій, виникає відповідна ЕРС, що зумовлює накопичення

електричної енергії в ємнісному накопичувачі, встановленому на електровозі. Після накопичення енергії, достатньої для роботи двигунів, електровоз починає рухатись. При зміщенні електровоза відносно початкового положення на половину ширини котушок лінії, витки обмоток кожної секції енергоприймача пронизують два однакових за рівнем і протилежних за напрямком магнітних потоки. ЕРС на виході обмотки енергоприймача у цьому випадку близька до нуля, але електровоз буде рухатися за рахунок енергії, накопиченої в конденсаторах накопичувача.

При подальшому русі електровозу змінюється положення витків обмотки секцій енергоприймача відносно котушок тягової лінії і на виході обмотки енергоприймача знову виникає ЕРС, що живить накопичувач. Таким чином забезпечується безперервний рух електровоза.

Завдяки орієнтації всіх котушок тягової лінії і витків обмоток секцій енергоприймача перпендикулярно напрямку руху електровоза зменшується довжина магнітних силових ліній потоку взаємоіндукції тягової лінії, що приводить до збільшення взаємної індуктивності останньої з обмотками секцій енергоприймача.

Створення котушок тягової лінії прямокутними, відповідним чином сформованих з прямого та зворотного кабелів мережі, приводить до того, що ЕРС у сторонніх електропровідних контурах від струму лінії не перевищує дуже малої ЕРС від дії однієї котушки лінії. Це практично робить експлуатацію пристрою безпечним при роботі транспорту у вибухонебезпечних середовищах.

Завдяки тому, що енергоприймач має у своєму складі не менше чотирьох секцій, збільшується його взаємоіндуктивність з тяговою лінією за рахунок дії більшої кількості поперечних сторін котушок лінії. Також при цьому зменшується ЕРС, яка виникає у сторонніх контурах від дії обмотки енергоприймача, що підвищує рівень безпеки при експлуатації електровоза. Крім того, зростає надійність роботи електровоза, тому що при пошкодженні

будь-якої секції працездатність електровоза забезпечить решта секцій енергоприймача.

1.3 Розрахунок електричних характеристик пристрою

Взаємо індуктивність однієї котушки (одновиткової) тягової лінії з обмоткою однієї секції магніто проводу будемо розглядати як взаємо індуктивність двох співвісних однакових прямокутних контурів.

Розрахункова формула із [8] має вигляд (у розрахунку на один виток секції):

$$M_{\kappa} = \frac{\mu_0}{\pi} \left[a \ln \left(\frac{a+d_1}{a+D} \cdot \frac{d_2}{x} \right) + b \ln \left(\frac{b+d_2}{b+D} \cdot \frac{d_1}{x} \right) + 2(D-d_1-d_2+x) \right], \quad (1.1)$$

де a і b – довжини сторін контуру; x – відстань між площиною котушок лінії і поверхнею полюсного наконечника; $d_1 = \sqrt{a^2 + x^2}$; $d_2 = \sqrt{b^2 + x^2}$; $D = \sqrt{a^2 + b^2 + x^2}$.

У випадку, коли $a = 0,4$ м, $b = 1,15$ м, $x = 0,05$ м взаємо індуктивність $= 0,882 \mu_0$ без урахування впливу магніто проводу енергоприймача. При розміщенні на електровозі чотирьох секцій (полюсів) енергоприймача загальна взаємо індуктивність $M_{\kappa}' = 4M_{\kappa} = 3,528 \mu_0$.

У випадку відомої тягової лінії з двох кабелів та енергоприймача на електровозі з протяжним магніто проводом і обмоткою, взаємо індуктивність можна визначити за формулою для двох однакових паралельних однофазних ліній [7]:

$$M_0 = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{x^2 + a^2}{x^2}. \quad (1.2)$$

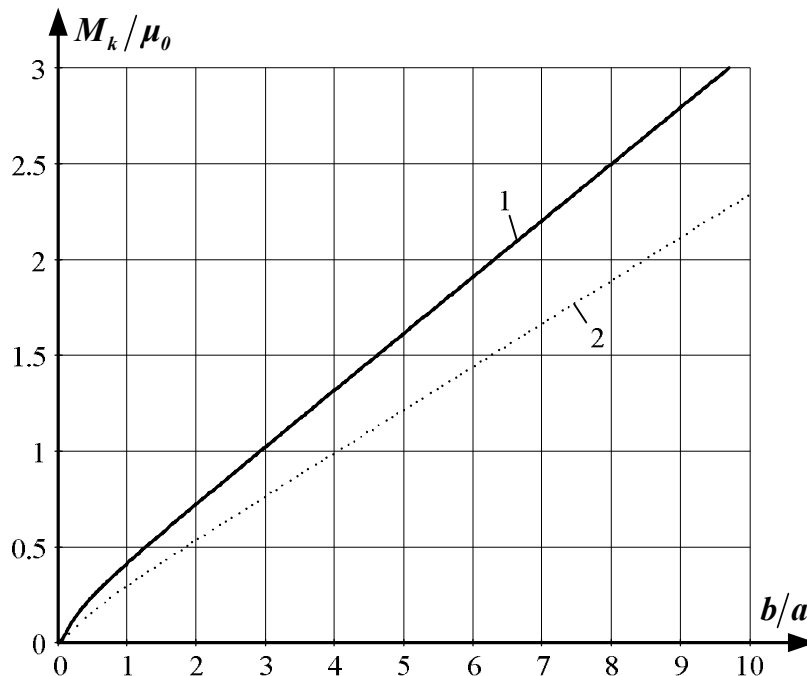
Для попередніх значень: $a = 0,4$ м і $x = 0,05$ м одержимо $= 0,665 \mu_0$ на одиницю довжини лінії. При довжині обмотки енергоприймача $= 4,6$ м, взаємо індуктивність з обмоткою буде $= M_0 l_e = 0,665 \cdot 4,6 = 3,058 \mu_0$. Порівняємо одержані значення M :

$$\frac{M'_k}{M_d} = \frac{3,528}{3,058} = 1,154$$

і маємо, що використання котушкової тягової лінії завдяки збільшенню взаємоіндуктивності забезпечить зменшення струму лінії в 1,154 рази і, відповідно, зменшення втрат потужності в опорі лінії у 1,33 рази порівняно з відомою лінією при збереженні попереднього значення опору кабелів.

При збереженні значення попереднього перерізу кабелю лінії опір лінії збільшиться пропорційно довжині кабелю, тобто у $\frac{b+a}{b} = \frac{1,15+0,4}{1,15} = 1,3478$ рази. При цьому втрати потужності в лінії можуть збільшитись, у даному випадку – в 1,012 рази, що знаходиться у межах похибки розрахунків.

За формулою (1.1) розраховано залежність відношення M'_k/μ_0 від відносної довжини котушки b/a лінії, що зображена на рис. 1.7. Зі зростанням відношення b/a майже прямопропорційно зростає і взаємоіндуктивність між котушкою лінії і обмоткою секції енергоприймача.



- 1 – при $x/a = 0,1$;
2 – при $x/a = 0,175$.

Рисунок 1.7 – Залежність взаємоіндуктивності котушки тягової лінії з обмоткою секції енергоприймача від відносної ширини котушки

Для відомої лінії з двох кабелів: втрати потужності в кабелях лінії $\Delta P_l = I_l R_l$, де R_l – опір лінії; ЕРС в обмотки енергоприймача $E_e = \omega M_l I_l$. У випадку котушкової лінії ЕРС $E_e = \omega M_{\kappa} I_{\kappa}$ залишається незмінною, а струм лінії повинен мати таке значення $I_{\kappa} = I_l \frac{M_l}{M_{\kappa}}$. Втрати потужності в котушковій лінії $\Delta P_{\kappa} = I_l^2 \left(\frac{M_l}{M_{\kappa}} \right)^2 R_l \frac{a+b}{b} = \Delta P_l \left(\frac{M_l}{M_{\kappa}} \right)^2 \frac{a+b}{b}$. Для лінії з двох кабелів на довжині котушки $M_l = M_0 b$. Тоді відношення втрат потужності:

$$\frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_l} = \frac{(M_0 a)^2}{M_{\kappa}^2} \frac{b}{a} \left(\frac{b}{a} + 1 \right). \quad (1.3)$$

Залежність, представлєну на рис. 1, можна наближено описати рівнянням прямої лінії $M_{\kappa} = S \frac{b}{a} \mu_0$, де S – коефіцієнт. Після підстановки виразу для μ_0 у співвідношення (1.3) одержимо:

$$\frac{\Delta P_{\kappa}}{\Delta P_l} = \frac{(M_0 a)^2}{(S \mu_0)^2} \left(1 + \frac{a}{b} \right). \quad (1.4)$$

Поставимо вимогу, щоб при використанні котушкової лінії $\Delta P_{\kappa} \leq \Delta P_l$, тобто:

$$\left(\frac{M_0 a}{S \mu_0} \right)^2 \left(1 + \frac{a}{b} \right) \leq 1$$

і остаточно

$$\frac{a}{b} \leq \left(\frac{S \mu_0}{M_0 a} \right)^2 - 1. \quad (1.5)$$

При $a = 0,4$, $x = 0,04$ маємо $M_0 = 0,735 \mu_0$. З рис. 1.7 одержимо $S = 0,325$. Тоді $\frac{a}{b} \leq 0,222$ або $\frac{b}{a} \geq 4,5$.

Порівняємо індуктивність котушкової лінії та відомої лінії з двох кабелів. Для котушкової лінії у розрахунку на одну котушку:

$$L_{\kappa} = L_{\kappa 0} + 2M_{\kappa},$$

де L_{κ_0} – індуктивність котушки; M_{κ} – взаємо індуктивність із сусідньою котушкою.

Для розрахунку L_{κ_0} використаємо вираз із [7]:

$$L_{\kappa_0} = \frac{\mu_0}{\pi} \left\{ a \left(\ln \frac{2a}{r_0} - 1 \right) + b \left(\ln \frac{2b}{r_0} - 1 \right) - a \operatorname{Arsh} \frac{a}{b} - b \operatorname{Arsh} \frac{b}{a} + (a+b) + 2\sqrt{a^2 + b^2} \right\} + \frac{\mu_0}{4\pi} (a+b), \quad (1.6)$$

де r_0 – радіус провідника кабелю.

Для приведених раніше розмірів котушки маємо $L_{\kappa_0} = 2,74 \mu_0$.

Для розрахунку взаємоіндуктивності котушок використаємо формули з

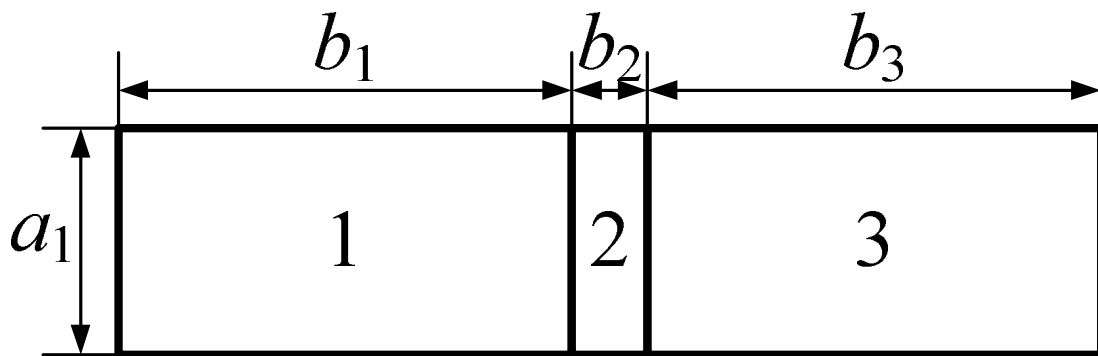
$$[8]: \quad M_{\kappa} = M_{13} = \frac{1}{2} [M(1,2,3) + M(2) - M(1,2) - M(2,3)], \quad (1.7)$$

де величини M , що у квадратних дужках:

$$M_{\kappa} = \frac{\mu_0 l_{\kappa}}{2\pi} \left(\ln \frac{2S_{\kappa}}{l_{\kappa}} - \varphi_{\kappa} \right);$$

$$\varphi_{\kappa} = \frac{2a_{\kappa}}{l_{\kappa}} \ln \frac{a_{\kappa} + d_{\kappa}}{l_{\kappa}} + \frac{2b_{\kappa}}{l_{\kappa}} \ln \frac{b_{\kappa} + d_{\kappa}}{l_{\kappa}} - \frac{4d_{\kappa}}{l_{\kappa}} + 2;$$

a_{κ} і b_{κ} – сторони відповідних прямокутників (рис. 1.8); d_{κ} – їх діагоналі;
 $l_{\kappa} = 2(a_{\kappa} + b_{\kappa})$ – периметр; $S_{\kappa} = a_{\kappa} b_{\kappa}$ – площа прямокутників.



1, 3 – контури котушок лінії;
 2 – контур стику сусідніх котушок.

Рисунок 1.8 – Розрахункова схема

Вважаємо, що $a_1 = 0,4$ м, $b_1 = 1,15$ м, $b_2 = 0,03$ м, $b_3 = b_1$. Тоді:

$$l_{123} = 2(a_1 + 2b_1 + b_2) = 5,46 \text{ м};$$

$$S_{123} = a_1(2b_1 + b_2) = 0,932 \text{ м}^2;$$

$$\varphi_{123} = 0,039;$$

$$l_2 = 2(a_1 + b_2) = 2(0,4 + 0,03) = 0,86 \text{ м};$$

$$S_2 = a_1 b_2 = 0,012 \text{ м}^2;$$

$$\varphi_2 = 0,0206;$$

$$l_{23} = l_{12} = 2(a_1 + b_1 + b_2) = 3,16 \text{ м};$$

$$S_{12} = S_{23} = a_1(2b_1 + b_2) = 0,472 \text{ м}^2;$$

$$\varphi_{23} = \varphi_{12} = 0,0598;$$

$$M = \frac{\mu_0 \cdot 5,46}{2\pi} \left(\ln \frac{2 \cdot 0,932}{5,46} - 0,039 \right) = -0,968 \mu_0;$$

$$M(2) = -0,493 \mu_0;$$

$$M(1,2) = M(2,3) = -0,638 \mu_0;$$

$$M_\kappa = 0,185 \mu_0;$$

$$L_\kappa = (2,74 + 2 \cdot 0,185) \mu_0 = 3,11 \mu_0.$$

Індуктивність лінії, що складається з послідовно з'єднаних котушок:

$$L_n = nL_\kappa = 3,11n\mu_0.$$

При довжині однієї котушки 1,15 м на 1000 м лінії можна розмістити 840 котушок, що забезпечить $L_n = 3,28 \cdot 10^{-3}$ Гн.

Індуктивність 1 м звичайної лінії з двох прямолінійних кабелів:

$$L_{n0} = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\ln \frac{a}{r_0} + \frac{1}{4} \right).$$

При $r_0 = 0,0125$, $a = 0,4$ м маємо $L_{n0} = 1,183$.

Для лінії довжиною 1000 м $L_n = 1,48 \cdot 10^{-3}$ Гн. Тобто індуктивність котушкової лінії більша, ніж звичайної, що з одного боку приведене до зменшення ємності послідовно вмикаємих конденсаторів, а з іншого – до збільшення реактивної потужності цих конденсаторів.

Конденсатори, що забезпечують у тяговій лінії стан резонансу напруг, вмикаються окремо у кожний кабель лінії. Для визначення ємності

конденсаторів треба знайти індуктивності одиниці довжини кабелю. У котушковій лінії кабель складається з відрізків: першого довжиною та другого довжиною , розміщеного під кутом до першого. Індуктивність першого відрізка можна розглядати як половину від індуктивності двопроводової лінії обмеженої довжини і визначитися формулою [7]:

$$L_1 = \frac{\mu_0 b}{2\pi} \left[\operatorname{Arsh} \frac{b}{r_0} - \operatorname{Arsh} \frac{b}{a} + \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} - \frac{a}{b} - \sqrt{1 + \left(\frac{r_0}{b}\right)^2} + \frac{r_0}{b} \right]. \quad (1.8)$$

Індуктивність другого відрізка кабелю можна розглядати як суму власне індуктивності відрізка та його взаєміндуктивності з таким же поряд розташованим відрізком і визначити за формулою [7]:

$$L_2 = \frac{\mu_0 a}{\pi} \left(\ln \frac{2a}{r_0} - 1 \right).$$

Результуюча індуктивність

$$L_{\text{кк}} = L_1 + L_2 .$$

2 ВИБІР ТА РОЗРАХУНКИ РАЦІОНАЛЬНИХ КОНСТРУКЦІЙ ЕНЕРГОПРИЙМАЧА З ПОЗИЦІЇ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

Енергоприймач електровоза з безконтактним (індуктивним) електроживленням складається з двох суттєвих частин – магніто проводу та обмотки. Крім того, до складу енергоприймача потрібно віднести конденсатори, що забезпечують в електричному колі стан резонансу на груп. Відповідно, втрати потужності мають місце в активному опорі обмотки, у діелектрику конденсаторів та у магніто проводі. У випадку, коли магніто провід виконано з фериту та із значними повітряними проміжками у ньому, магнітними втратами потужності можна знехтувати. Для зменшення втрат потужності в конденсаторах треба забезпечити їх роботу при мінімальній напрузі.

Конструкція енергоприймача пов'язана з конструкцією тягової лінії та режимом її живлення, причому лінія може бути ввімкнена на вході до джерела високочастотного струму або напруги, струм в лінії може бути безперервним, імпульсним або модульованим.

2.1 Енергоприймач з імпульсним режимом роботи

З метою зменшення втрат потужності в [1] запропоновано конструкцію енергоприймача та режим живлення тягової лінії. Магніто провід енергоприймача розімкнений у магнітному відношенні з двома обмотками на ньому. Одна з обмоток живить двигуни електровоза, а другу увімкнено до конденсатора, утворюючи з ним ізольований коливальний контур. Тягову лінію, що індуктивно пов'язана з обмоткою енергоприймача, зроблено з двох кабелів. На вході лінії ввімкнено формувач імпульсів напруги, тривалість яких не більше півперіоду власних коливань коливального контуру, а крутість відповідає крутості протиелектрорушійної сили, яку наводить в контурі тягової лінії струм коливального контуру.

Недоліками зазначеного пристрою є наступне. По-перше, тягова лінія живиться імпульсами напруги. У цьому випадку при зростанні навантаження

електровоза буде збільшуватися внесений у тягову лінію опір, що приведе до зменшення струму в мережі і, відповідно, енергії, що поступає в енергоприймач електровозу. По-друге, так як тягова лінія живиться імпульсами сталої тривалості, то зі збільшенням навантаження електровоза повинна зростати амплітуда імпульсів струму живлення, а це неможливо по зазначеній вище причині. По-третє, накопиченої у коливальному контурі пристрою енергії недостатньо для живлення електровоза, тому що його обмотка розміщена у розімкненому магнітному колі і тому, що в контур у період дії імпульсу живлення вноситься значний опір при роботі електровоза (при цьому зменшується струм в контурі). І насамкінець, енергія передається від коливального контуру обмотці, яка живить електропривод, тільки на одній визначеній частоті. Інші частотні складові спектру імпульсів живлення спричиняють збільшення втрат потужності у тяговій мережі та обмотці енергоприймача.

Живлення тягової лінії імпульсами струму дає змогу зменшити втрати потужності в системі транспорту. З метою ліквідації недоліків пристрою [1] розроблено іншу конструкцію пристрою для безконтактного живлення електровозу [2].

Вхід тягової лінії пристрою увімкнено до джерела живлення 1 (рис. 2.1) з формувачем імпульсів струму та регулятором 2 періоду слідування імпульсів струму. Тягову мережу 3 зроблено з двох проводів: прямого та зворотного. На вході тягової мережі 3 ввімкнено автоматичний перемикач 4 на два положення. У верхньому положенні перемикача 4 (рис. 2.1) тягова мережа 3 приєднується до джерела живлення 1; у нижньому положенні перемикача 4 тягова мережа 3 з'єднується з паралельно ввімкненими розрядним резистором і датчиком напруги 6. Вихід датчика 6 підключено до входу регулятора 2 періоду слідування імпульсів.

Енергоприймач, який встановлено на транспортному засобі і який взаємодіє з тяговою мережею, складається із магніто проводу 7 з поперечною перемичкою 8 та з двох обмоток. Перша з них 9 розміщена в нижній частині магнітопроводу і з'єднана з випрямлячем та ємнісним накопичувачем енергії 10

за допомогою автоматично регульованого вимикача 11, друга 12 – розміщена на перемичці 8 магнітопроводу і підключена до конденсатора 13, утворюючи з ним ізольований коливальний контур. В електричне коло другої обмотки 12 введено вимикач 14. Двигуни 15 транспортного засобу увімкнені посередництвом блоку керування 16 до виходу ємнісного накопичувача енергії.

Імпульси живлення тягової мережі сформовані як амплітудно-модульовані імпульси синусоїдного струму. Обвідна імпульсів, наприклад, має форму трикутника (рис. 2.2,а).

Власну частоту коливань коливального контуру зроблено такою, що збігається з частотою несучої струму живлення. Стала часу коливального контуру в режимі накопичування в ньому енергії зроблена максимально можливою. Стала часу кола обмотки 9 в режимі максимального навантаження транспортного засобу зроблена на порядок меншою сталої часу коливального контуру в режимі накопичення енергії, наприклад, завдяки вибору відповідного співвідношення числа витків обмоток 9 і 12.

В електричних колах тягової мережі 3 та обмотки 9 при роботі пристрою забезпечено стан резонансу напруг на частоті несучої струму живлення.

Пристрій безконтактного електроживлення працює таким чином. За допомогою перемикача 4 (верхнє положення на рис. 2.1) тягова мережа 3 приєднується до джерела живлення 1. Звідти в тягову мережу поступають імпульси струму. На протязі часу дії імпульсу T_{i1} (рис. 2.2), вимикач 11 розімкнений. Для введення в дію транспортного засобу вмикають вимикач 14. В обмотці 12 завдяки індуктивному зв'язку з тяговою мережею 3 збуджується е.р.с. і виникає струм на частоті власних коливань коливального контуру. Обвідна струму коливального контуру показана на рис. 2.2,б. Тривалість T_{i1} імпульсу струму приймають приблизно рівною сталої часу коливального контуру в режимі накопичення енергії. В момент закінчення дії імпульсу струму автоматично вмикається вимикач 11. При цьому в обмотці 9 під дією е.р.с., яка наводиться в ній магнітним потоком коливального контуру (між обмотками 9 і 11 має місце велика взаємо індуктивність) виникає змінний

струм, що живить ємнісний накопичувач 10 протягом відрізка часу T_{i2} . Обвідна струму в контурі обмотки 9 показана на рис. 2.2,в.

В кінці дії імпульсу струму тягової мережі 3 перемикач 4 автоматично переводиться у нижнє положення (рис. 2.2). При цьому тягова мережа 3 з'єднується з датчиком напруги 6 та розрядним резистором 5, що забезпечує швидке згасання власних коливань струму в тяговій мережі (за час, менший тривалості T_{i2}).

В тяговій мережі 3 індукується е.р.с. в основному магнітним потоком коливального контуру. Коли, завдяки внесеному в коливальний контур активному опору з боку обмотки 9, струм у ньому зменшується практично до нуля, при цьому вимикач 11 розмикається, а також зникає е.р.с., індукована в тяговій мережі. Від датчика напруги 6 на вхід регулятора 2 поступає сигнал, який дає команду на початок наступного імпульсу струму.

Тривалість розрядного імпульсу T_{i2} коливального контуру залежить від навантаження транспортного засобу. Із зростанням навантаження збільшується активний опір, що вноситься у коливальний контур з боку обмотки 9, яка живить ємнісний накопичувач 10. Це зменшує сталу часу коливального контуру і струм в ньому зникає швидше. Сума $T_{i1} + T_{i2}$ є період T слідування імпульсів струму. У пристрої завдяки зворотному зв'язку посередництвом е.р.с. тягової мережі забезпечено регулювання періоду слідування імпульсів струму живлення відповідно навантаженню транспортного засобу. Це дає змогу зменшити втрати потужності у тяговій мережі при малих навантаженнях.

Вибором параметрів коливального контуру забезпечують в ньому коливальність процесу розрядки при максимальному навантаженні транспортного засобу, а також виконання умови $T_{i2} \geq 10T_0$, де T_0 - період несучої струму тягової мережі.

Амплітуду I_m струму в коливальному контурі в кінці дії зарядного імпульсу визначають, виходячи з виразу:

$$\frac{LI_m^2}{2} = P(T_{i1} + T_{i2}) = PT, \quad (2.1)$$

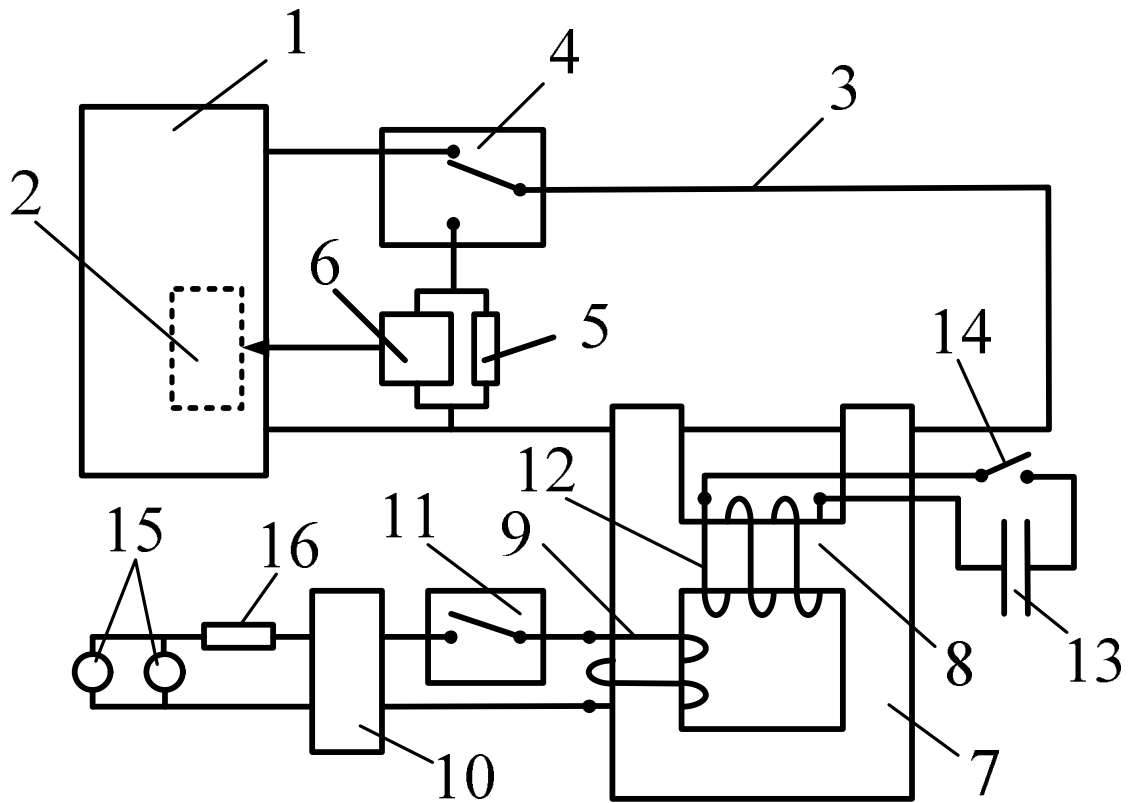


Рисунок 2.1 – Пристрій безконтактного електроживлення транспортного засобу

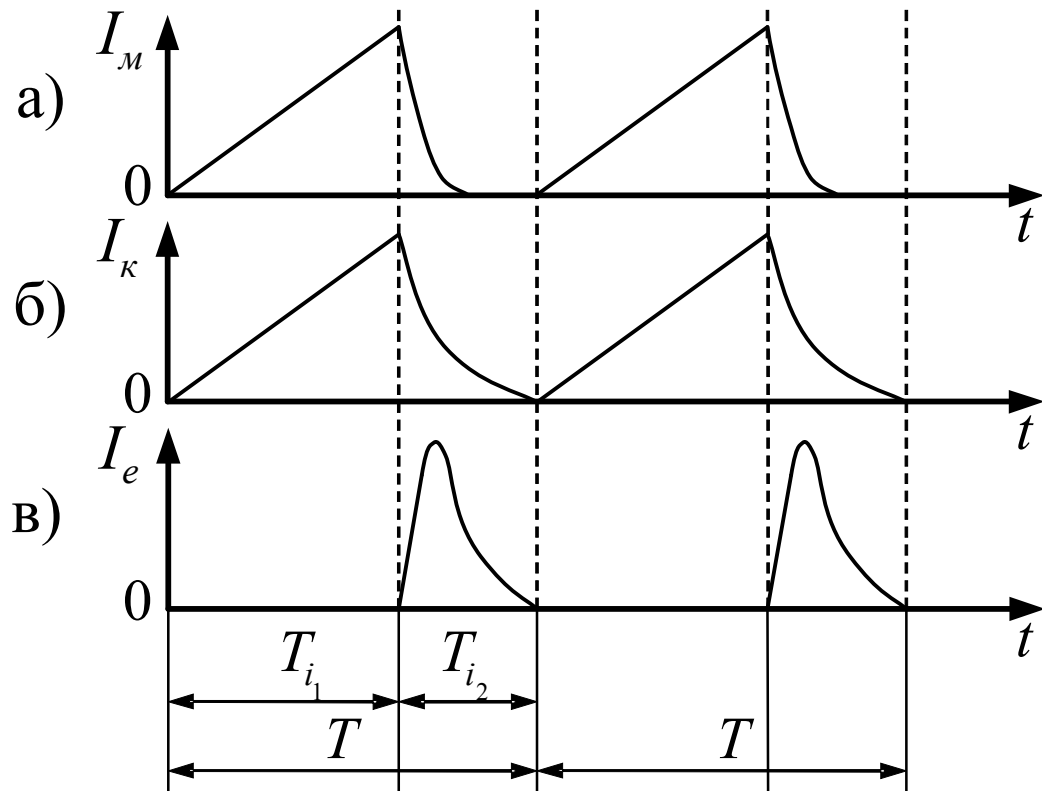


Рисунок 2.2 – Імпульси живлення тягової мережі

де L - індуктивність обмотки 12 енергоприймача; P - потужність навантаження транспортного засобу.

Амплітуда модуляції струму тягової мережі прийнята сталою, тому амплітуда струму I_m коливального контуру не може перевищувати визначеного значення. Це значення розраховують згідно виразу (1) для найбільш вірогідного навантаження транспортного засобу. При зміні навантаження відносно вказаного рівня буде відповідно змінюватись тривалість T_{12} процесу розрядки коливального контуру і період T слідування імпульсів струму мережі.

Введення у магнітопровод енергоприймача пристрою поперечної перемички створює для обмоток 9 та 12 замкнене магнітне коло, завдяки чому, по-перше, збільшується індуктивність обмотки 12 і відповідно розмір накопичуваної в коливальному контурі енергії. По-друге, забезпечується значна взаємодуктивність між обмотками 9 та 12, що дає змогу передати електроприводу 10 більше енергії.

Розділ у часі в процесі накопичування енергії в коливальному контурі та її передачі електроприводу 10 робить ці процеси ефективними та регульованими.

Застосування для живлення тягової мережі імпульсів у вигляді амплітудно-модульного синусоїдального струму дає змогу збільшити ефективність передачі енергії транспортному засобу завдяки тому, що на частоті несучої струму електричні опори коливального контуру, контурів тягової мережі 3 та обмотки 9, яка живить електропривод 10, мінімальні. Енергія у пристрої передається від тягової мережі коливальному контуру і далі електроприводу транспортного засобу на частоті несучої струму мережі, що дозволяє зменшити втрати потужності в елементах пристрою.

2.2 Перехідні процеси при ввімкненні живлення тягової лінії

Кабелі тягової лінії 3 утворюють з першою обмоткою 12 енергоприймача трансформатор з розімкненим магнітним колом. Електрична схема цієї ділянки має вигляд:

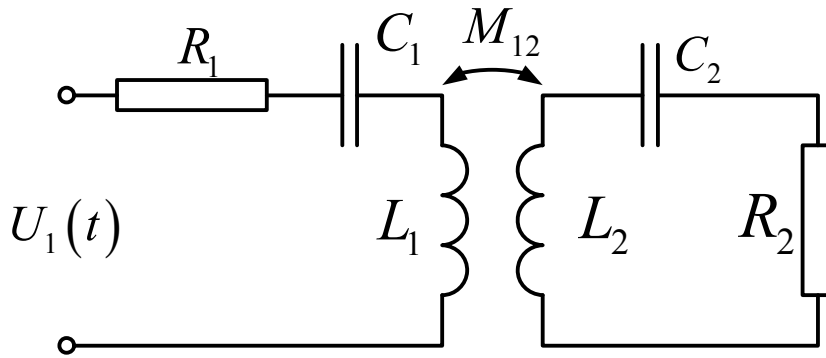


Рисунок 2.3 – Електрична схема тягової лінії та енергоприймача
(трансформатор з розімкненим магнітним колом)

На рис. 2.3 зображено: R_1 , R_2 – активні опори тягової лінії та першої обмотки відповідно; L_1 , L_2 – індуктивності тягової лінії та обмотки; C_1 , C_2 – ємності конденсаторів, що увімкнено у відповідні кола для забезпечення в них стану резонансу напруг; M_{12} – взаємо індуктивність між обмотками.

Диференційні рівняння, що характеризують роботу схеми (рис. 2.3):

$$R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + \frac{1}{C_1} \int_0^t i_1 dt + M_{12} \frac{di_2}{dt} = u(t),$$

$$R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + \frac{1}{C_2} \int_0^t i_2 dt + M_{12} \frac{di_1}{dt} = 0.$$

Характеристичні рівняння, що визначають частоту власних коливань та їх згасання, коли один контур практично не впливає на інші:

$$p^2 + \frac{R_1}{L_1} p + \frac{1}{L_1 C_1} = 0,$$

$$p^2 + \frac{R_2}{L_2} p + \frac{1}{L_2 C_2} = 0.$$

Значення коренів рівнянь:

$$p_{11} = -b_1 + j\omega; \quad p_{12} = -b_1 - j\omega; \quad (2.2)$$

$$p_{21} = -b_2 + j\omega; \quad p_{22} = -b_2 - j\omega, \quad (2.3)$$

де $b_1 = \frac{R_1}{2L_1}$; $b_2 = \frac{R_2}{2L_2}$ – згасання; $\omega = \sqrt{\frac{1}{L_1 C_1} - \frac{R_1^2}{4L_1^2}} = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2} - \frac{R_2^2}{4L_2^2}}$ – частота власних

коливань.

Якщо q_1 та q_2 заряди на першому та другому конденсаторах, то рівняння напруг для обох контурів буде таким:

$$\frac{q_1}{C_1} + R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M_{12} \frac{di_2}{dt} = u(t),$$

$$\frac{q_2}{C_2} + R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M_{12} \frac{di_1}{dt} = 0.$$

Якщо взяти до уваги, що

$$i_1 = \frac{dq_1}{dt} = p\bar{q}_1 \quad \text{і} \quad i_2 = \frac{dq_2}{dt} = p\bar{q}_2,$$

де p – оператор Лапласа, то останні два рівняння у символічному вигляді будуть такими:

$$\left(\frac{1}{C_1} + R_1 p + L_1 p^2 \right) \bar{q}_1 + M_{12} p^2 \bar{q}_2 = u(p), \quad (2.4)$$

$$\left(\frac{1}{C_2} + R_2 p + L_2 p^2 \right) \bar{q}_2 + M_{12} p^2 \bar{q}_1 = 0. \quad (2.5)$$

де $u(p)$ – перетворена за Лапласом напруга живлення, а \bar{q}_1 та \bar{q}_2 є функціями від p .

З рівняння (2.5) маємо:

$$\bar{q}_1 = -\frac{L_2 (p^2 + 2b_2 + \omega_2^2)}{M_{12} p^2} \bar{q}_2, \quad (2.6)$$

$$\text{де } \omega_2^2 = \frac{1}{L_2 C_2}.$$

Після підстановки (2.6) у рівняння (2.4), одержимо таке співвідношення:

$$u_{C_2}(p) = \frac{\bar{q}_2}{C_2} = \frac{u(p) M_{12} p^2}{C_2 \left[L_1 L_2 (p^2 + 2b_1 p + \omega_1^2) (p^2 + 2b_2 p + \omega_2^2) - M_{12}^2 p^4 \right]}, \quad (2.7)$$

$$\text{де } \omega_1^2 = \frac{1}{L_1 C_1}.$$

Розглянемо випадок, коли на вхід першого контуру ввімкнено джерело постійного струму з електрорушійною силою E . Тоді $u(p) = E/p$, де p – оператор Лапласа.

Підставимо $u(p)$ у вираз (2.7) та виконаємо операцію множення в знаменнику. Одержимо:

$$u_{C_2}(p) = \frac{1}{C_2 L_1 L_2} \times \frac{E \cdot M_{12} p}{\left[p^4 (1 - k_{12}^2) + 2(b_1 + b_2) p^3 + (\omega_1^2 + \omega_2^2 + 4b_1 b_2) p^2 + 2(b_1 \omega_2^2 + b_2 \omega_1^2) p + \omega_1^2 \omega_2^2 \right]}, \quad (2.8)$$

де $k_{12}^2 = \frac{M_{12}^2}{L_1 L_2}$ – коефіцієнт зв'язку обох контурів.

Продамо частину знаменника виразу (2.8), що у квадратних дужках, у вигляді:

$$(1 - k_{12}^2)(p - p_1)(p - p_2)(p - p_3)(p - p_4), \quad (2.9)$$

де p_1, p_2, p_3 і p_4 – корні рівняння, що є знаменником (2.8).

Розглянемо випадок мало згасаючих коливань у контурах, тобто вважаємо, що $b_1 \ll \omega_1$ і $b_2 \ll \omega_2$. Тоді можна припустити, що корені p_1, p_2, p_3 і p_4 будуть комплексними, причому дійсна частина цих коренів буде невеликою по відношенню до уявної. У відповідності з цим напишемо:

$$p_1 = -\sigma_1 + j\Omega_1; \quad p_3 = -\sigma_2 + j\Omega_2;$$

$$p_2 = -\sigma_1 - j\Omega_1; \quad p_4 = -\sigma_2 - j\Omega_2,$$

причому $\sigma_1 \ll \Omega_1, \sigma_2 \ll \Omega_2$.

Представимо напругу на конденсаторі C_2 як функцію часу згідно із співвідношенням:

$$u_{C_2}(t) = \frac{E \cdot M_{12}}{C_2 L_1 L_2 (1 - k^2)} \sum_{i=1}^n \frac{M(p_i)}{N'(p_i)} \cdot e^{p_i t}, \quad (2.10)$$

де $M(p_i) = p$ при $p = p_i$; $N'(p_i)$ – похідна від виразу (2.9) при $p = p_i$.

Після виконання відповідних операцій над знаменником виразу (2.10) одержимо:

$$u_{C_2}(t) = \frac{E \cdot k_{12}^2}{C_2 M (1 - k^2)} \left\{ \frac{p_1 \cdot e^{p_1 t}}{(p_1 - p_2)(p_1 - p_3)(p_1 - p_4)} + \frac{p_2 \cdot e^{p_2 t}}{(p_2 - p_1)(p_2 - p_3)(p_2 - p_4)} + \frac{p_3 \cdot e^{p_3 t}}{(p_3 - p_1)(p_3 - p_2)(p_3 - p_4)} + \frac{p_4 \cdot e^{p_4 t}}{(p_4 - p_1)(p_4 - p_2)(p_4 - p_3)} \right\}. \quad (2.11)$$

Розглянемо складові знаменника:

$$p_1 - p_2 = 2j\Omega_1;$$

$$p_1 - p_3 = -(\sigma_1 - \sigma_2) + j(\Omega_1 - \Omega_2) \cong j(\Omega_1 - \Omega_2);$$

$$p_1 - p_4 = -(\sigma_1 - \sigma_2) + j(\Omega_1 + \Omega_2) \cong j(\Omega_1 + \Omega_2);$$

$$p_2 - p_3 = -(\sigma_1 - \sigma_2) - j(\Omega_1 + \Omega_2) \cong -j(\Omega_1 - \Omega_2);$$

$$p_2 - p_4 = -(\sigma_1 - \sigma_2) - j(\Omega_1 - \Omega_2) \cong -j(\Omega_1 - \Omega_2);$$

$$p_3 - p_4 = 2j\Omega_2.$$

Після підстановки різних коренів у (2.11) та відповідних перетворень одержимо:

$$\begin{aligned} u_{C_2}(t) &= \frac{E \cdot k_{12}^2}{2C_2 M_{12} (1 - k_{12}^2) (\Omega_2^2 - \Omega_1^2)} \left\{ e^{-\sigma_1 t} (e^{j\Omega_1 t} + e^{-j\Omega_1 t}) - e^{-\sigma_2 t} (e^{j\Omega_2 t} + e^{-j\Omega_2 t}) \right\} = \\ &= U_{m_{C_2}} (e^{-\sigma_1 t} \cos \Omega_1 t - e^{-\sigma_2 t} \cos \Omega_2 t), \end{aligned} \quad (2.12)$$

де $U_{m_{C_2}} = \frac{E \cdot k_{12}^2}{C_2 M_{12} (1 - k_{12}^2) (\Omega_2^2 - \Omega_1^2)}$ – амплітуда напруги.

Струм $i_2(t)$ у другому контурі

$$\begin{aligned} i_2(t) &= C_2 \frac{du_{C_2}(t)}{dt} = \frac{E \cdot k_{12}^2}{M_{12} (1 - k_{12}^2) (\Omega_2^2 - \Omega_1^2)} \times \\ &\times \left\{ e^{-\sigma_2 t} (\Omega_2 \cos \Omega_2 t + \Omega_2 \sin \Omega_2 t) - (\Omega_1 \cos \Omega_1 t + \Omega_1 \sin \Omega_1 t) \right\}. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Розглянемо випадок, коли тягова лінія живиться амплітудно модульованими імпульсами високого струму. При цьому напруга на вході лінії $u(t) = U_m (1 - e^{-\alpha t}) \sin \omega_0 t$, причому $t \leq T_i$, де T_i тривалість імпульсу.

Для визначення напруги на конденсаторі C_2 використаємо формулу Дюамеля у такому запису:

$$u_{C_2}(t) = u(0) A(t) + \int_0^t u'(t - \tau) A(\tau) d\tau, \quad (2.14)$$

де $A(t)$ – напруга на конденсаторі, викликана дією одиничної постійної ЕРС, тобто $E = 1$ В.

Запишемо вхідну напругу у вигляді: $u(t) = U_m e^{\mu t}$, де μ – комплексне число.

Тоді $u(0) = U_m$; $u'(t) = \mu U_m e^{\mu t}$; $u'(t - \tau) = \mu U_m e^{\mu(t - \tau)}$.

Представимо $A(t)$ у вигляді:

$$A(t) = A_0 \left[e^{(-\sigma_1 + j\Omega_1)t} + e^{(-\sigma_1 - j\Omega_1)t} - e^{(-\sigma_2 + j\Omega_2)t} - e^{(-\sigma_2 - j\Omega_2)t} \right], \quad (2.15)$$

$$\text{де } A_0 = \frac{k^2}{2C_2 M_{12} (1 - k^2) (\Omega_2^2 - \Omega_1^2)}.$$

Після відповідних підстановок у рівняння (2.14) та інтегрування одержимо:

$$u_{C_2}(t) = 2U_m A_0 \left\{ \left(e^{-\sigma_1 t} \cos \Omega_1 t - e^{-\sigma_2 t} \cos \Omega_2 t \right) + \frac{\mu}{2} \left[\frac{e^{(-\sigma_1 + j\Omega_1)t} - e^{\mu t}}{-(\mu + \sigma_1) + j\Omega_1} + \frac{e^{(-\sigma_1 - j\Omega_1)t} - e^{\mu t}}{-(\mu + \sigma_1) - j\Omega_1} - \frac{e^{(-\sigma_2 + j\Omega_2)t} - e^{\mu t}}{-(\mu + \sigma_2) + j\Omega_2} - \frac{e^{(-\sigma_2 - j\Omega_2)t} - e^{\mu t}}{-(\mu + \sigma_2) - j\Omega_2} \right] \right\}. \quad (2.16)$$

Вираз для напруги на вході тягової лінії запишемо у такому вигляді:

$$\begin{aligned} u(t) &= U_m (1 - e^{-\alpha t}) \sin \omega_0 t = \text{Im} U_m (1 - e^{-\alpha t}) \cdot e^{j\omega t} = \\ &= \text{Im} (U_m e^{j\omega_0 t}) - \text{Im} (U_m e^{(-\alpha + j\omega_0)t}), \end{aligned} \quad (2.17)$$

тобто як уявні частини відповідних комплексів. Вважаючи почергово $\mu_1 = j\omega t$ і $\mu_1 = -\alpha + j\omega_0 t$, визначимо напругу на конденсаторі C_2 і струм у другому контурі також як уявні частини відповідних комплексів.

2.3 Розрахунок коренів характеристичного рівняння

Підставимо у рівняння

$$(p - p_1)(p - p_2)(p - p_3)(p - p_4) = 0 \quad (2.18)$$

значення коренів p_1, p_2, p_3 і p_4 та виконаємо множення. Отримаємо:

$$p^4 + 2(\sigma_1 + \sigma_2)p^3 + (\gamma_1^2 + 4\sigma_1\sigma_2 + \gamma_2^2)p^2 + 2(\sigma_1\gamma_2^2 + \sigma_2\gamma_1^2)p + \gamma_1^2\gamma_2^2 = 0, \quad (2.19)$$

де $\gamma_1^2 = \sigma_1^2 + \Omega_1^2$; $\gamma_2^2 = \sigma_2^2 + \Omega_2^2$.

Запишемо частину знаменника виразу (2.8), що у квадратних дужках, у такому вигляді:

$$p^4 + \frac{2(b_1 + b_2)}{1 - k_{12}^2} p^3 + \frac{\omega_1^2 + 4b_1b_2 + \omega_2^2}{1 - k_{12}^2} p^2 + \frac{2(b_1\omega_2^2 + b_2\omega_1^2)}{1 - k_{12}^2} p + \frac{\omega_1^2\omega_2^2}{1 - k_{12}^2} = 0. \quad (2.20)$$

У рівняннях (2.19) і (2.20) відповідні коефіцієнти біля p , а також вільні члени повинні бути однаковими, тобто:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{b_1 + b_2}{1 - k_{12}^2}; \quad (2.21)$$

$$\gamma_1^2 + 4\sigma_1\sigma_2 + \gamma_2^2 = \frac{\omega_1^2 + 4b_1b_2 + \omega_2^2}{1 - k_{12}^2}; \quad (2.22)$$

$$\sigma_1\gamma_2^2 + \sigma_2\gamma_1^2 = \frac{b_1\omega_2^2 + b_2\omega_1^2}{1 - k_{12}^2}; \quad (2.23)$$

$$\gamma_1^2\gamma_2^2 = \frac{\omega_1^2\omega_2^2}{1 - k_{12}^2}. \quad (2.24)$$

З одержаних таким чином рівнянь шляхом послідовних наближень знайдемо значення чотирьох невідомих σ_1 , σ_2 , Ω_1 і Ω_2 . Для цього спочатку знехтуємо значеннями $4b_1b_2$ та $\frac{4b_1b_2}{1 - k_{12}^2}$ у рівнянні (2.22), потім з цього ж скороченого рівняння та рівняння (2.24) визначимо:

$$\gamma_2^2 = \frac{A_1}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{A_1}{2}\right)^2 - B_1}; \quad \gamma_1^2 = \frac{B_1}{\gamma_2^2}, \quad (2.25)$$

де $A_1 = \frac{\omega_1^2 + \omega_2^2}{1 - k_{12}^2}$; $B_1 = \frac{\omega_1^2 \cdot \omega_2^2}{1 - k_{12}^2}$.

Підставимо одержані значення γ_1^2 та γ_2^2 у рівняння (2.23) та із спільного розв'язку його з рівнянням (2.21) знаходимо:

$$\sigma_1 = \frac{D_1 - C_1\gamma_1^2}{\gamma_2^2 - \gamma_1^2}; \quad \sigma_2 = C_1 - \sigma_1, \quad (2.26)$$

де $C_1 = \frac{b_1 + b_2}{1 - k_{12}^2}$; $D_1 = \frac{b_1\omega_2^2 + b_2\omega_1^2}{1 - k_{12}^2}$.

Після цього підставимо знайдені значення σ_1 і σ_2 у рівняння (2.22) та із спільного розв'язку його з рівнянням (2.24) отримаємо нові, більш точні значення γ_1^2 та γ_2^2 із формул (2.20) при $A_1 = \frac{\omega_1^2 + 4b_1b_2 + \omega_2^2}{1 - k_{12}^2} - 4\sigma_1\sigma_2$ і колишньому значенні B_1 . Далі формулами (2.26) підрахуємо більш точні значення σ_1 та σ_2 і т.д., поки не отримаємо шукані величини з бажаною точністю.

2.4 Перехідні процеси при ввімкненні навантаження

Розглянемо процеси у другому та третьому контурах енергоприймача після закінчення дії імпульсу струму тягової мережі.

У тягову мережу вмикається значний активний опір і струм в ній згасає за час, на порядок менший терміну згасання струму у третьому контурі. В електричне коло третього контуру вмикається навантаження. Еквівалентну схему другого та третього контурів показано на рис. 2.4.

На рис. 2.4 активний опір $R_{\text{вн}}$ умовно характеризує навантаження. Його значення пропорційне відношенню U_0/I_0 , де U_0 – напруга живлення, I_0 – струм двигунів електровоза, M_{23} – взаємна індуктивність між контурами. Вважаємо, що магнітопровід, на якому розміщено обмотки контурів, ненасичений.

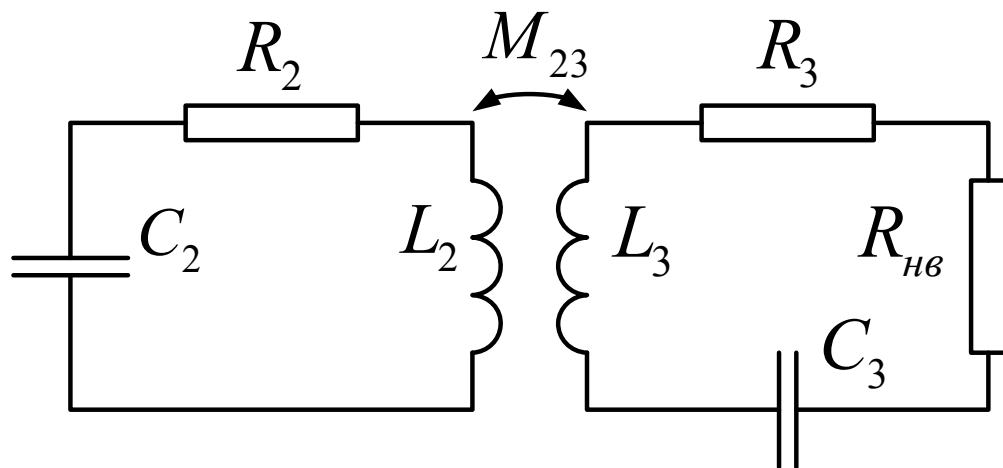


Рисунок 2.4 – Еквівалентна схема другого та третього контурів енергоприймача

Операторні рівняння, що описують процеси в контурах мають вигляд:

$$\begin{aligned} \left(pL_2 + R_2 + \frac{1}{pC_2} \right) \bar{i}_2 + pM_{23}\bar{i}_3 &= L_2 i_2(0) - \frac{u_{C_2}(0)}{p}; \\ \left(pL_3 + R'_3 + \frac{1}{pC_3} \right) \bar{i}_3 + pM_{23}\bar{i}_2 &= 0, \end{aligned} \quad (2.27)$$

де $i_2(0)$; $u_{C_2}(0)$ – струм у другому контурі та напруга на конденсаторі C_2 в момент закінчення дії імпульсу струму тягової лінії; $R'_3 = R_3 + R_{\text{вн}}$.

Розв'язуючи ці рівняння відносно струмів одержимо:

$$\bar{i}_2 = \frac{Z_3 \left[L_2 i_2(0) - \frac{u_{C_2}(0)}{p} \right]}{Z_2 \cdot Z_3 - p^2 M_{23}^2}; \quad (2.28)$$

$$\bar{i}_3 = \frac{-p M_{23} \left[L_2 i_2(0) - \frac{u_{C_2}(0)}{p} \right]}{Z_2 \cdot Z_3 - p^2 M_{23}^2}, \quad (2.29)$$

де $Z_2 = pL_2 + R_2 + \frac{1}{pC_2}$; $Z_3 = pL_3 + R_3 + \frac{1}{pC_3}$.

Кожен із струмів можна розглядати як викликані окремо двома операторними ЕРС: першою $E_1 = L_2 i_2(0)$ та другою $E_2 = \frac{-u_{C_2}(0)}{p}$.

Спочатку одержимо формули для розрахунку складової струму i_3 , викликаню ЕРС E_2 . Запишемо:

$$\bar{i}_3 = \frac{u_{C_2}(0) M_{23}}{L_2 L_3} \times \frac{p^2}{p^4(1-k_{12}^2) + 2(b_2 + b_3)p^3 + (\omega_2^2 + \omega_3^2 + 4b_2 b_3)p^2 + 2(b_2 \omega_3^2 + b_3 \omega_2^2)p + \omega_2^2 \omega_3^2}, \quad (2.30)$$

де $k_{12}^2 = \frac{M_{23}}{L_2 L_3}$; $b_2 = \frac{R_2}{2L_2}$; $b_3 = \frac{R_3}{2L_3}$; $\omega_2^2 = \frac{1}{L_2 C_2}$; $\omega_3^2 = \frac{1}{L_3 C_3}$.

В іншому вигляді формула:

$$\bar{i}_3 = \frac{u_{C_2}(0) M_{23}}{L_2 L_3 (1-k_{12}^2)} \cdot \frac{p^2}{(p-p_1)(p-p_2)(p-p_3)(p-p_4)}, \quad (2.31)$$

де p_1, p_2, p_3 і p_4 – корені рівняння

$$(1-k_{12}^2)p^4 + 2(b_2 + b_3)p^3 + (\omega_2^2 + \omega_3^2 + 4b_2 b_3)p^2 + 2(b_2 \omega_3^2 + b_3 \omega_2^2)p + \omega_2^2 \omega_3^2. \quad (2.32)$$

Параметри контурів вибрано такими, що в них виникають повільно згасаючі коливання, тобто візьмемо до уваги, що $b_2 \ll \omega_2$ і $b_3 \ll \omega_3$. У цьому випадку корені рівняння (232) будуть комплексними, а саме:

$$\begin{aligned} p_1 &= -\sigma_3 + j\Omega_3; & p_3 &= -\sigma_4 + j\Omega_4; \\ p_2 &= -\sigma_3 - j\Omega_3; & p_4 &= -\sigma_4 - j\Omega_4, \end{aligned} \quad (2.33)$$

причому $\sigma_1 \ll \Omega_1$, $\sigma_2 \ll \Omega_2$.

Далі запишемо:

$$p_1^2 = (-\sigma_3 + j\Omega_3)^2 = -\Omega_3(j2\sigma_3 + \Omega_1 + \sigma_3^2) \cong -\Omega_3^2,$$

зневажаючи малими, порівняно з Ω_1 , величинами. Аналогічно: $p_2^2 \cong -\Omega_3^2$, $p_3^2 \cong -\Omega_4^2$ і $p_4^2 \cong -\Omega_4^2$.

Використовуючи співвідношення (2.11), після відповідних підстановок одержимо:

$$\vec{i}_3'(t) = \frac{u_{C_2}(0) \cdot k_{23}^2}{M_{12}(1-k_{23}^2)(\Omega_4^2 - \Omega_3^2)} = (e^{-\sigma_4 t} \Omega_4 \sin \Omega_4 t - e^{-\sigma_3 t} \Omega_3 \sin \Omega_3 t). \quad (2.34)$$

Складову струму i_3'' у третьому контурі, що викликана дією умовної ЕРС E_1 , визначимо за формулою Дюамеля (2.14), де $A(t)$ – значення струму $i_3'(t)$ при $u_{C_2}(0) = 1$, $u(0) = L_2 i_2(0)$, а $u'(t - \tau) = 0$. Тоді

$$i_3(t) = i_3'(t) + i_3''(t) = \frac{(u_{C_2}(0) - L_2 i_2(0)) \cdot k_{23}^2}{M_{12}(1-k_{23}^2)(\Omega_4^2 - \Omega_3^2)} = (e^{-\sigma_4 t} \Omega_4 \sin \Omega_4 t - e^{-\sigma_3 t} \Omega_3 \sin \Omega_3 t). \quad (2.35)$$

Зображення рівняння для першої складової струму у другому контурі викликано дією операторного ЕРС $E_2 = -\frac{u_{C_2}(0)}{p}$ відомо [3]:

$$i_2'(t) = \frac{-u_{C_2}(0)}{L_2(1-k_{23}^2)} \left[\frac{\omega_3^2 - \Omega_3^2}{2j\Omega_3(\Omega_4^2 - \Omega_3^2)} \cdot e^{-\sigma_3 t} \cdot (e^{j\Omega_3 t} - e^{-j\Omega_3 t}) - \frac{\omega_3^2 - \Omega_4^2}{2j\Omega_4(\Omega_4^2 - \Omega_3^2)} \cdot e^{-\sigma_4 t} \cdot (e^{j\Omega_4 t} - e^{-j\Omega_4 t}) \right] \quad (2.36)$$

або

$$i_2'(t) = \frac{-u_{C_2}(0)}{L_2(1-k_{23}^2)(\Omega_4^2 - \Omega_3^2)} \left[\frac{\omega_3^2 - \Omega_3^2}{\Omega_3} \cdot e^{-\sigma_3 t} \cdot \sin \Omega_3 t - \frac{\omega_3^2 - \Omega_4^2}{\Omega_4} \cdot e^{-\sigma_4 t} \cdot \sin \Omega_4 t \right]. \quad (2.37)$$

Другу складову струму i_2'' від дії ЕРС E_1 можна визначити за формулою Дюамеля. Результуючий струм:

$$i_2(t) = i_2'(t) + i_2''(t) = \frac{-(u_{C_2}(0) - L_2 i_2(0))}{L_2(1-k_{23}^2)(\Omega_4^2 - \Omega_3^2)} M(t), \quad (2.38)$$

де $M(t)$ – складова виразу (2.37), що у квадратних дужках.

2.5 Енергоприймачі з напівзамкненим магнітним колом

Запишемо вираз для розрахунку взаємодуктивності тягової лінії з обмоткою енергоприймача:

$$M = \frac{w_1 w_2}{R_M} = M_0 w_2, \quad (2.39)$$

де w_1 , w_2 – число витків тягової лінії та обмотки відповідно; R_M – магнітний опір потоку, створеного струмом тягової лінії і охоплюючого обмотку енергоприймача; $M_0 = w_1/R_M$ – питома взаємодуктивність.

Як було показано раніше, збільшення M робить більш ефективною передачу енергії на електровоз посередництвом магнітної індукції. Із виразу (2.39) виходить, що збільшити M можливо конструктивним шляхом, зменшуючи значення R_M , або вибором більшого числа витків w_2 . Останнє – нерационально, тому що приводить до збільшення витрат провідникового матеріалу або втрат потужності в обмотці. В [4] описано порівняно простий пристрій для безконтактного електропостачання транспортного засобу (електровоза), в якому кабелі тягової лінії прикріплені до опори феромагнітними стрічковими елементами. Обмотка енергоприймача розташована на магнітопроводі, який у верхній частині зроблено з проміжком і який охоплює один з кабелів тягової мережі. У проміжку розміщено резервуар з феромагнітною рідиною, всередину якого входить кабель тягової лінії разом з кріпленнями, причому кабель розміщено так, що магнітний потік його струму охоплює магніто провід і обмотку енергоприймача. У місцях входу та виходу з резервуара кабелю лінії та її кріплення встановлено магнітні ущільнювачі для унеможливлення виходу феромагнітної рідини зовні. Застосування феромагнітної рідини зменшує магнітний опір на шляху потоку тягової лінії та збільшує величину M .

Недоліком описаного пристрою є складність конструкції та низька ефективність, причина якої відносно мала магнітна проникність феромагнітної рідини та значний за розміром проміжок у магнітопроводі.

Відоме інше конструктивне рішення [5], що також дає змогу зменшити магнітний опір потоку тягової лінії. У цьому випадку магнітопровід енергоприймача у вигляді порожнистого циліндра зроблено з подовжнім пазом у його верхній частині (з боку тягової лінії). Коаксіальне з магніто проводом встановлено якір з пазами, які виконано під кутом до подовжнього паза магніто проводу. Якір під натиском кріплення тягової лінії, яке входить у паз магнітопровода, може обертатись відносно останнього при русі електровоза. При цьому паз магнітопровода частково шунтується якорем, що відповідно зменшує магнітний опір. Обмотка енергоприймача охоплює якір і магнітопровід. Кабель тягової лінії входить всередину магнітопровода.

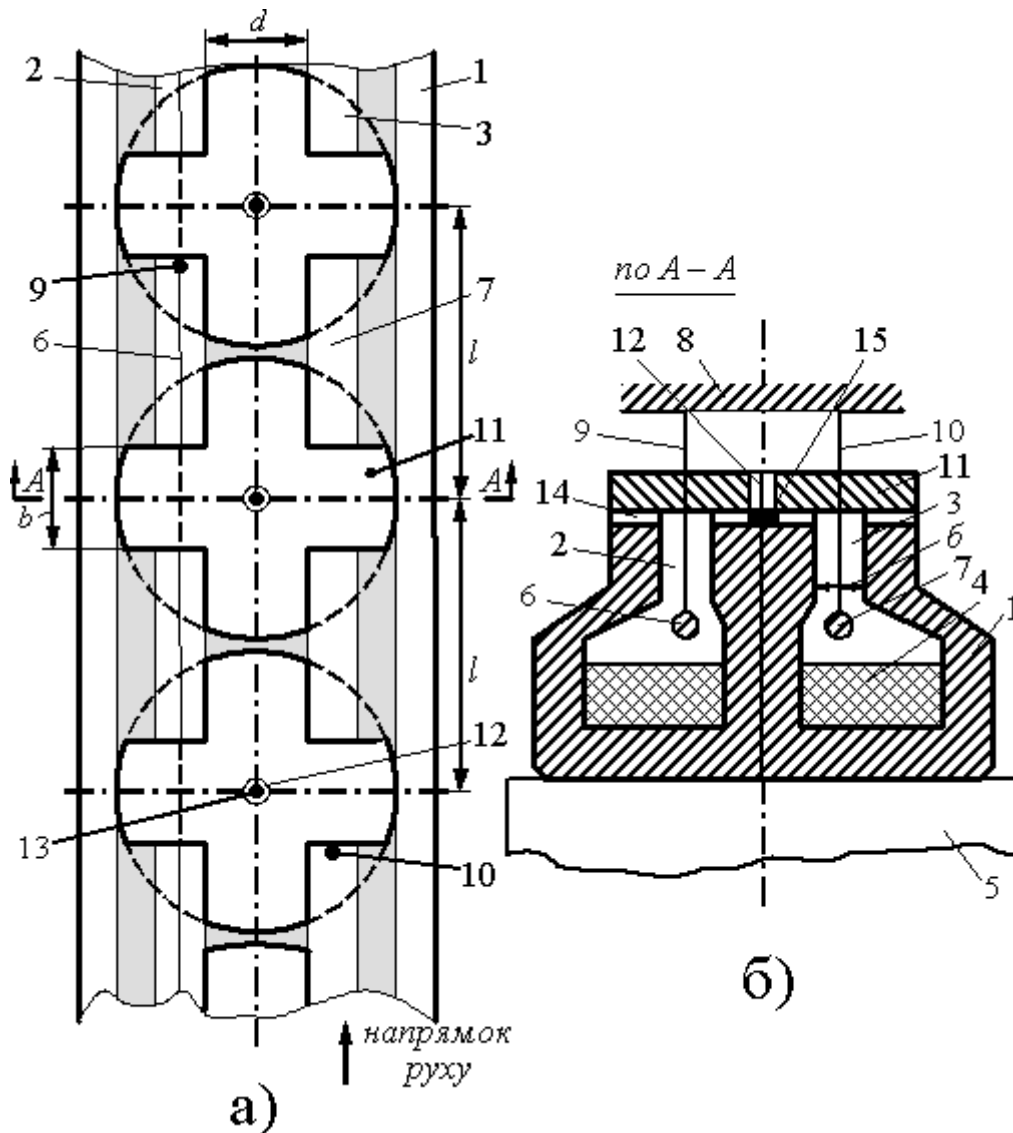
Недоліком зазначеного пристрою є складна конструкція, значні (майже подвійні) витрати феромагнітного матеріалу та значна інерційність рухомого феромагнітного якоря, що змушує зменшувати швидкість руху транспортного засобу.

З метою усунення недоліків відомих пристроїв зі зменшеним магнітним опором на шляху потоку тягової лінії розроблено нову конструкцію магніто проводу пристрою для безконтактного енергопостачання транспортного засобу [6]. Магнітопровід 1 (рис. 2.5 а,б) пристрою зроблено з двох однакових частин з двома однаковими подовжніми пазами 2 і 3 та обмоткою 4.

Магнітопровід розміщено на транспортному засобі 5 поздовж кабелів 6 і 7 тягової лінії, які закріплені на нерухомій опорі 8 за допомогою стрижнів 9 і 10 та заходять всередину магнітопровода. Уздовж магнітопровода 1 та поверх нього з проміжком 14 розміщені феромагнітні якорі 11 хрестоподібної форми. Якорі 11 зроблено з кільцевими отворами 12 в центрі їх симетрії і насаджені на штифти 13, нижня частина яких закріплена в тілі магнітопровода по його подовжній осі. Контури бокових поверхонь якорів у плані зроблені як дуги кола з радіусом, що відповідає відстані від подовжньої осі магнітопровода до краю його верхньої частини.

Якорі розташовані поздовж магнітопровода звичайно, рівномірно; між осями сусідніх якорів визначена відстань l . Між верхньою поверхнею магнітопровода та нижньою поверхнею якорів зазори 14 заповнені

феромагнітною рідиною. Розмір зазору забезпечується товщиною розширення 15 нижньої частини штифтів 13. Ширину виступів якорів зроблено не більшою ширини d середньої частини магнітопроводу.



а) вигляд зверху;

б) вид перетину магнітопроводу по А-А.

Рисунок 2.5 – Конструкція магнітопровідного пристрою для безконтактного енергопостачання на транспортній засіб

Місця розташування стрижнів 9 і 10 взаємно зміщені за напрямком струмопроводів 6 і 7 на відстань, не меншу за $2l$.

Кількість якорів вибирають, виходячи із умови одержання визначеної взаєміндуктивності кабелів 6 і 7 тягової лінії та обмотки 4, що розміщена на транспортному засобі.

Пристрій для безконтактного енергопостачання транспортного засобу працює таким чином. Після ввімкнення живлення кабелів 6 і 7 тягової лінії обидві частини магнітопроводу 1 пронизує змінний магнітний потік, який проходить безпосередньо по колу: самому магнітопроводу, через два проміжки 14, що заповнені феромагнітною рідиною, та по якорям 11. Електромагнітні сили, які виникають при цьому і діють на якорі 11, змушують останні зайняти положення, при якому одні бокові сторони якорів перпендикулярні пазам 2 і 3, а інші - паралельні цим пазам. В такому разі магнітний опір на шляху магнітного потоку буде найменшим. В обмотці 4 магнітний потік збуджує електрорушійну силу, завдяки чому забезпечується живлення тягового приводу електровоза він має можливість рухатись.

При русі електровоза від дії зусиль з боку стрижнів 9 і 10 якорі 11 почергово змінюють своє положення відносно попереднього на кут 90° , тим самим забезпечуючи прохід стрижнів в пазах 2 і 3 магнітопроводу з одночасним частковим практично незмінним перекриттям пазів. Останнє забезпечує достатньо велику взаємоіндуктивність кабелів 6 і 7 тягової лінії і обмотки 4, а також дозволяє зменшити магнітний потік розсіювання у верхній частині магнітопроводу.

Поворот рухомих феромагнітних якорів на кут 90° після їх контакту зі стрижнями 9, 10 та фіксація їх бокових частин за напрямком осей магнітопроводу (поздовжньої та поперечної) здійснюються при руху транспортного засобу у значній мірі силами магнітного поля від струму в обмотці енергоприймача.

При взаємному зміщенні місць розташування стрижнів 9 і 10 (рис.2.5 а) контакт стрижня 10 з відповідним якорем 11 (паз 2) і поворот останнього на кут 90° відбуваються з деяким запізненням відносно контакту стрижня 9 з відповідним якорем 11 (паз 3). Завдяки цьому якорі 11 встигають зайняти положення стійкої рівноваги перед їх майбутнім контактом із стрижнями. Таким чином, забезпечується корисна дія одних і тих же якорів на обидва пази 2 і 3.

Феромагнітна рідина, що заповнює проміжки між магнітопроводом 1 та якорями 11 зменшує магнітний опір магнітному потоку і виключає іскріння при влученні твердих частинок у зазначені проміжки.

У пропонованій конструкції магнітопроводу пристрою замість одного масивного рухомого феромагнітного якоря у відомому пристрої застосовано декілька значно менших за масою рухомих якорів, що спрощує конструкцію, зменшує інерційність якорів витрати феромагнітного матеріалу. Крім того, спрощується монтаж та демонтаж рухомих якорів, що дає змогу легко змінювати в потрібному напрямку рівень взаємоіндуктивності проводів тягової лінії і обмотки енергоприймача транспортного засобу.

Крім того, рухомі феромагнітні якорі одночасно перекидають два пази магнітопроводу, що дозволяє використати обидва кабелі лінії і завдяки цьому збільшити ефективність енергопостачання електровозу.

2.6 Розрахунок ефективності енергоприймача з напівзамкненим магнітним колом

Порівняємо розмір взаємоіндуктивності тягової лінії з обмоткою енергоприймача з розімкненим та напіврозімкненим магнітними колами. Магнітний опір двох основних повітряних проміжків шириною δ :

$$R_M = \frac{\delta}{2\mu_0 S_\delta},$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму; $S_\delta = h \cdot l$ – площа; h – висота l – довжина проміжку магнітопроводу.

Магнітні опори двох проміжків між рухомими якорями та верхніми торцевими поверхнями магнітопроводу:

$$R_\delta = R_{\delta_1} + R_{\delta_2} = \frac{\delta_1}{2\mu_0 Z S_{\delta_1}} \left(1 + \frac{1}{3\mu_p} \right),$$

де $\delta_1 = 1$ мм – ширина проміжку; S_{δ_1} – площа перекриття; Z – кількість якорів на довжині магніто проводу; $\mu_p = 3 - 4$ – відносна магнітна проникність феромагнітної рідини.

Сумарний магнітний опір:

$$R_{Mc} = \frac{k_1 R_\delta \cdot R_M}{k_1 R_\delta + R_M},$$

де $k_1 = 1,05 - 1,1$ – коефіцієнт, що враховує вплив феромагнітних частин магнітного кола.

Відносне значення магнітного опору:

$$k'_M = \frac{R_{Mc}}{R_M} = \frac{1}{1 + \frac{R_M}{k_1 R_\delta}}.$$

Для наступних розмірів: $\delta = 3,2$ см; $l = 5$ м; $h = 8$ см; $Z = 16$; $S_{\delta_1} = a \cdot b = 5 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 10^{-1} = 5 \cdot 10^{-3}$ м²; $\mu_p = 3$; $k_1 = 1,05$ маємо $k'_M = 0,16$, тобто магнітний опір завдяки рухомих якорям зменшується у $k_M = 1/k'_M = 1/0,16 = 6,25$ разів.

ЕРС, що наводить в обмотці енергоприймача магнітним потоком тягової лінії:

$$E_e = \omega M_0 w_2 I_l k_M,$$

де M_0 – питома взаємо індуктивність без використання рухових якорів.

Активний опір, що вноситься в електричне коло тягової лінії:

$$R_{en} = \frac{(\omega M)^2}{R_e + R_{не}} = \frac{\omega M_0 w_2 k_M}{R_e + R_{не}},$$

де R_e , $R_{не}$ – активні опори обмотки енергоприймача та еквівалентного навантаженню електровозу відповідно.

При збереженні числа витків w_2 незмінним, необхідне значення ЕРС E_e може бути отримано при меншому струмі I_l тягової лінії, що зменшить витрати потужності у ній, або при меншій частоті струму ω , що зменшить безпеку при експлуатації системи транспорту. Але при зменшенні струму I_l , наприклад, у k_M разів зменшиться потужність $S_l = U_l I_l$, що поступає у тягову лінію. Для збереження розміру потужності необхідно буде збільшити в k_M разів напругу U_l на виході мережі, якщо це дозволять вимоги безпеки або технічні умови. При зменшенні струму лінії в k_M разів, потужність, що передається до енергоприймача, не зменшиться завдяки збільшенню $R_{не}$.

У випадку зменшення частоти струму лінії, наприклад, у k_M разів, активний опір, що вноситься, не зміниться, а індуктивні опори тягової лінії $X_d = \omega L_d$ та обмотки енергоприймача $X_e = \omega L_e$ відповідно зменшаться. Позначено: L_d , L_e індуктивності лінії та обмотки. Це дозволить зменшити у k_M^2 разів ємність конденсаторів, що забезпечують у відповідних електричних колах стан резонансу напруг. При цьому у k_M^2 разів зменшаться втрати потужності в конденсаторах.

У випадку, коли у тяговій лінії небажано змінювати значення струму та його частоти, використання магнітопроводу з рухомими якорями дозволить зменшити у k_M разів число витків w_2 обмотки енергоприймача. Це приведе до відповідної економії мідного дроту та до зменшення втрат потужності в обмотці. Крім того, у k_M разів зменшиться індуктивність обмотки і відповідно у стільки ж разів – реактивна потужність конденсаторів у колі обмотки.

3 ОЦІНКА ВПЛИВУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПОЛІВ В ПЕРЕТИНІ ШТРЕКУ НА СТОРОННІ КОНТУРИ ВІД ВИБРАНОЇ КОНСТРУКЦІЇ „ТЯГОВА МЕРЕЖА – ЕНЕРГОПРИЙМАЧ”

3.1 Загальні положення

Від дії змінного високочастотного електромагнітного поля у будь-якому замкненому провідному контурі, що знаходиться у зоні впливу проводів тягової лінії та обмоток енергоприймача, виникає електричний струм. Можна очікувати, що електрична дуга, яка виникає при розімкненні контуру, може запалити вибухонебезпечну атмосферу, наприклад, у шахті. Теж саме може відбутися і при випадковому замкненні провідного контуру.

Для оцінки можливості використання високочастотного безконтактного транспорту в шахтах, небезпечних по газу і пилу, необхідно визначити розмір наведених електрорушійних сил (ЕРС) та струмів у провідних контурах. Такими контурами можуть бути: 1) провідна оболонка силового кабелю, прокладеного уздовж шахтної виробки паралельно проводам тягової лінії, та провідна оболонка кабелю зв'язку; 2) оболонки вказаних вище кабелів окремо та трубопровід, прокладений уздовж шахтної виробки; 3) оболонки вказаних вище кабелів окремо та ґрунт; 4) оболонки вказаних вище кабелів та один із рель сів колії; 5) обидві рейки колії та скати вагонеток або електровозу.

Контури по пп. 1-4 можуть бути: 1) у розімкненому стані; 2) замкнені на одному з кінців; 3) замкнені з обох кінців. Інші варіанти, коли контури замкнені на певний опір, являються більш безпечними і не аналізуються.

3.2 ЕРС і струми в сторонніх контурах від дії поля тягової лінії

Наведено у сторонньому контурі ЕРС визначимо за формулою:

$$E_{\kappa} = \omega I_{\text{л}} M_{\text{л}\kappa}, \quad (3.1)$$

де ω – кутова частота струму; I_l – діюче значення струму; $M_{лк}$ – взаємоіндуктивність між контуром лінії та стороннім контуром.

У випадку лінії з двох кабелів взаємо індуктивність можна розглядати як таку між двома двопровідними лініями і розрахувати за формулою:

$$M_{лк} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \frac{a_{12} a_{21}}{a_{11} a_{22}}. \quad (3.2)$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму; l – довжина відрізка лінії; a_{12} , a_{21} , a_{11} , a_{22} , – відстані між проводами лінії та сторонами контуру.

У випадку котушкової тягової лінії дією поперечних сторін котушок на сторонні контури можна знехтувати через їхню взаємо перпендикулярну орієнтацію. Взаємо індуктивність поздовжніх сторін котушок лінії з паралельними їм відрізками стороннього контуру можна визначити за формулою:

$$M_{лк} = M_{11} + M_{22} - (M_{12} + M_{21}); \quad (3.3)$$

$$\text{де } M_{ij} = \frac{\mu_0 b}{2\pi} \left(\operatorname{Arsh} \frac{b}{a_{ij}} + \frac{a_{ij}}{b} - \sqrt{\left(\frac{a_{ij}}{b}\right)^2 + 1} \right)$$

$i = 1; 2$ – номери проводів лінії;

j = сторони контуру.

Струм контуру:

$$I_k = \frac{E_k}{Z_k \cdot l_k},$$

де Z_k – опір одиниці довжини контуру, наприклад, 1 м; l_k – довжина контуру.

У приведеній нижче таблиці представлено розрахункові значення опору Z_k різних провідних контурів.

Таблиця 3.1 - Електричний опір 1 м контуру

№ пп	Вид контуру	Z_k , Ом/м
1	Оболонки силового кабелю та кабелю зв'язку	0,11
2	Рейка – оболонка силового кабелю	0,057
3	Рейка – оболонка кабелю зв'язку	0,089
4	Рейка – рейка	0,034
5	Трубопровід – оболонка силового кабелю	0,051

Опори контурів, в електричне коло яких входить ґрунт шахтної виробки, розраховуються з обліком опору заземлення на обох кінцях контуру.

Згідно з розрахунками за формулою (3.53) найбільше значення M_{e_k} має місце для контуру рейка – оболонка силового кабелю і складає $0,0472 \cdot 10^{-6}$ Гн/м. При довжині котушки лінії $b = 2$ м, струму лінії $I_n = 150$ А і частоті струму $f = 5000$ Гц максимальна ЕРС у вказаному контурі $E_k = 0,45$ В.

При довжині контуру $l_k = 10$ м розмір струму в ньому $I_k = 0,78$ А. Згідно з нормами одержане значення струму не може викликати загоряння шахтної атмосфери і є безпечним.

3.3 ЕРС і струми в сторонніх контурах від дії поля обмотки енергоприймача

У випадку котушкової тягової лінії обмотку енергоприймача розміщено у пазах магнітопроводу. Пази зверху відкриті, тому магнітний потік обмотки розповсюджується у навколишньому середовищі тільки поверх магнітопроводу. Якщо у цьому середовищі є сторонні провідні контури, то максимальна ЕРС, що в них може виникнути, це ЕРС від дії магнітного поля обмотки однієї секції. Розмір цієї ЕРС з урахуванням впливу феромагнітного осердя визначається за формулою:

$$E_{\kappa_e} = 2\omega I_e M_{e_\kappa}$$

де I_e – струм секції енергоприймача; M_{e_κ} – взаємо індуктивність прямокутної або круглої обмотки секції прямокутного по поперечному перерізу зі стороннім контуром.

У випадку енергоприймача з напівзамкненим магнітним колом магнітний потік, що може збуджувати ЕРС у сторонніх контурах, це потік розсіювання двох крайніх заокруглених частин обмотки. Тоді взаємо індуктивність обмотки енергоприймача зі стороннім контуром можна розрахувати як взаємо індуктивність кільцевої котушки з двопроводовою лінією по [9], причому для контуру рейка – рейка вісі котушки і лінії співпадають, для контурів пп. 1 і 5 таблиці вісі – взаємо перпендикулярні, для контурів пп. 2 і 3 – нахилені під відповідним кутом.

У випадку енергоприймача лінії з живленням імпульсами струму треба враховувати наявність потоків розсіювання двох обмоток, розміщених на магніто проводі взаємо перпендикулярно. Від дії первинної обмотки магнітний потік розповсюджується у навколишнє середовище, що вище магнітопроводу енергоприймача.

Від заокруглених бокових частин обмоток, що виступають за межі магнітопроводу, потік розповсюджується в усі сторони і може викликати ЕРС у сторонніх провідних контурах. Взаємо індуктивність двох бокових частин кожної з обмоток зі стороннім контуром можна розрахувати як таку між кільцевою котушкою та двопроводовою лінією.

4 ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ УЗГОДЖЕННЯ ВУЗЛА „ТЯГОВА МЕРЕЖА – ЕНЕРГОПРИЙМАЧ”

Тягова лінія системи транспорту, за допомогою якої енергія електромагнітного поля постачається електровозу являє собою коло з розподільними параметрами. Однак для діапазону частот струму, що використовується, і реальних граничних довжин лінії остання з достатньою точністю характеризується зосередженими параметрами: активним R_d та індуктивним X_d опорами відповідно. Енергоприймач, встановлений на електровозі, являє собою вторинну обмотку трансформатора із замкненим або розімкненим магніто проводом. Первинною обмоткою є частина тягової мережі на проміжку, відповідному довжині енергоприймача. Вихід на напругу енергоприймача посередництвом відповідних перетворювачів енергії живить тягові двигуни електровоза.

Рівняння, що описують систему електропостачання, для трансформатора подібні таким:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 Z_{11} + j\omega M \dot{I}_2 \\ -\dot{U}_2 &= j\omega M \dot{I}_1 + \dot{I}_2 Z_{22}, \\ \dot{U}_2 &= \dot{I}_2 Z_{не} \end{aligned} \quad (4.1)$$

де \dot{U}_1 , \dot{I}_1 – напруга на початку лінії і струм в ній відповідно; \dot{U}_2 , \dot{I}_2 – вихідна напруга і струм енергоприймача; Z_{11} , Z_{22} і $Z_{не}$ – повні опори електричних ланцюгів тягової лінії, електроприймача та його навантаження; ω – колова частота струму; M – взаємодуктивність лінії та обмотки енергоприймача на ділянці їх зближення.

Після підстановки третього рівняння системи (4.1) у друге отримаємо:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 Z_{11} + j\omega M \dot{I}_2 \\ 0 &= j\omega M \dot{I}_1 + Z_{22} \dot{I}_2 \end{aligned} \quad (4.2)$$

де Z_{22} – повний опір кола енергоприймача.

Розглянемо, у першу чергу, варіант, коли тягова лінія живиться від джерела напруги. Розв’язок системи рівнянь (4.2), вважаючи U_1 відомим, дає:

$$\dot{i}_1 = \frac{\dot{U}_1}{\underline{Z}_{11} + \frac{(\omega M)^2}{\underline{Z}_{22}}}; \quad \dot{i}_2 = \frac{-j\omega M \dot{U}_1}{\underline{Z}_{22} \left[\underline{Z}_{11} + \frac{(\omega M)^2}{\underline{Z}_{22}} \right]}. \quad (4.3)$$

Для більш ефективної роботи системи електропостачання в електричні кола тягової лінії та енергоприймача вмикають конденсатори. Тоді:

$$\underline{Z}_{11} = R_l + j(X_l - X_{C_l}),$$

де R_l , X_l – активний та індуктивний опори лінії; X_{C_l} – ємнісний опір конденсаторів лінії.

$$\underline{Z}_{22} = (R_e + R_{нв}) + j(X_e - X_{C_e}), \quad (4.4)$$

де R_e , X_e – активний та індуктивний опори обмотки енергоприймача; $R_{нв}$ – опір, спричинений навантаженням двигунів електровоза, що практично є чисто активним; X_{C_e} – ємнісний опір конденсаторів, звичайно увімкнених у коло обмотки.

Зробимо наступні перетворення виразів для \underline{Z}_{11} і \underline{Z}_{22} :

$$\underline{Z}_{11} = R_l(1 + jb_1); \quad b_1 = \frac{X_l}{R_l} \left(1 - \frac{X_{C_l}}{X_l} \right) = Q_l \varepsilon_l, \quad (4.5)$$

де $Q_l = \frac{X_l}{R_l} = \frac{\omega L_l}{R_l}$ – добротність лінії;

$$\varepsilon_l = \left(1 - \frac{X_{C_l}}{X_l} \right) = 1 - \frac{\omega_l^2}{\omega^2},$$

де $\omega_l = \sqrt{\frac{1}{L_l C_l}}$ – колова частота власних коливань контуру лінії. При $\varepsilon_l = 0$ у лінії має місце резонанс напруг.

$$\underline{Z}_{22} = R_{22}(1 + jb_2); \quad b_2 = \frac{X_e}{R_{22}} \left(1 - \frac{X_{C_e}}{X_e} \right) = Q_e \varepsilon_e; \quad (4.6)$$

$$R_{22} = R_e + R_{нв}; \quad Q_e = \frac{X_e}{R_e \left(1 + \frac{R_{нв}}{R_e} \right)} = \frac{Q_{e_0}}{\left(1 + \frac{R_{нв}}{R_e} \right)},$$

де $Q_{e_0} = \frac{X_e}{R_e} = \frac{\omega L_e}{R_e}$ – добротність обмотки у режимі короткого замикання; L_e – індуктивність обмотки; $\varepsilon_e = \left(1 - \frac{X_{C_e}}{X_e}\right) = 1 - \frac{\omega_e^2}{\omega^2}$; $\omega_e = \sqrt{\frac{1}{L_e C_e}}$ – колова частота власних коливань контуру обмотки; C_e – ємність контуру. При $\varepsilon_e = 0$ в електричному колі обмотки має місце резонанс напруг.

Після підстановки (4.5) і (4.6) у формулі (4.3) у відповідних перетворень маємо:

$$\dot{I}_1 = I_{1_k} \sqrt{\frac{1 + \varepsilon_e^2 Q_e^2}{\left[1 - Q_e Q_n (\varepsilon_n \varepsilon_e - k^2)\right]^2 + (\varepsilon_n Q_n + \varepsilon_e Q_e)^2}} \cdot e^{-j(\varphi_2 - \varphi_1)}. \quad (4.7)$$

де $I_{1_k} = \frac{U_1}{R_n}$; $k = \frac{M}{\sqrt{L_e L_n}}$ – коефіцієнт електромагнітного зв'язку тягової лінії та обмотки енергоприймача у розрахунку на всю довжину лінії;

$$\varphi_2 = \arctg \frac{\varepsilon_n Q_n + \varepsilon_e Q_e}{1 - Q_e Q_n (\varepsilon_n \varepsilon_e - k^2)}; \quad \varphi_1 = \arctg (\varepsilon_e Q_e).$$

$$\dot{I}_2 = \frac{U_1}{\sqrt{R_n (R_e + R_{нв})}} \cdot \frac{k \sqrt{Q_n Q_e} \cdot e^{-j(\varphi_2 + \pi/2)}}{\sqrt{\left[1 - Q_e Q_n (\varepsilon_n \varepsilon_e - k^2)\right]^2 + (\varepsilon_n Q_n + \varepsilon_e Q_e)^2}}. \quad (4.8)$$

Запишемо вираз для індуктивності L_n у вигляді: $L_n = L_0 \cdot l_n$, де L_0 – індуктивність одиниці довжини лінії; l_n – довжина лінії. Індуктивність ділянки лінії, протяжність якої дорівнює довжині l_e обмотки енергоприймача $L'_n = L_0 \cdot l_e$. Тоді $L_n = L'_n \cdot n$, де $n = l_n / l_e$ і вираз для k у формулах (4.7) і (4.8) матиме вигляд:

$$k = \frac{M}{\sqrt{n} \sqrt{L'_n L_e}} = \frac{k_0}{\sqrt{n}},$$

де $k_0 = \frac{M}{\sqrt{L'_n L_e}} = \frac{k_0}{\sqrt{n}}$ – коефіцієнт електромагнітного зв'язку тягової мережі та обмотки енергоприймача на ділянці їх взаємного зближення.

Аналогічно $R_n = R_0 \cdot l_n$, де R_0 – активний опір одиниці довжини лінії, і далі: $R_n = R_0 \cdot l_e \cdot n = R'_n \cdot n$, де $R'_n = R_0 \cdot l_e$ – активний опір відрізка лінії довжиною l_e .

При відсутності навантаження електровоза $R_{нв} = \infty$, $Q_e = 0$. Тоді струм неробочого ходу тягової лінії:

$$I_{l_0} = \frac{I_{l_k}}{\sqrt{1 + (\varepsilon_n Q_n)^2}}, \quad (4.9)$$

а відносно значення струму:

$$\frac{I_1}{I_{l_0}} = \frac{\sqrt{[1 + (\varepsilon_e Q_e)^2] \cdot [1 + (\varepsilon_n Q_n)^2]}}{\sqrt{\left[1 - Q_e Q_n \left(\varepsilon_n \varepsilon_e - \frac{k_0^2}{n}\right)\right]^2 + (\varepsilon_n Q_n + \varepsilon_e Q_e)^2}}. \quad (4.10)$$

Використавши третє рівняння системи (4.1) та формулу (4.8), отримаємо вираз:

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 R_{нв} = \frac{U_1}{(k_{нв} + 1) \sqrt{\frac{R'_n}{R_e}}} \cdot \frac{\frac{k_0}{n} \sqrt{Q_n Q_{e_0}} \cdot e^{-j(\varphi_2 + \pi/2)}}{\sqrt{\left[1 - Q_e Q_n \left(\varepsilon_n \varepsilon_e - \frac{k_0^2}{n}\right)\right]^2 + (\varepsilon_n Q_n + \varepsilon_e Q_e)^2}}. \quad (4.11)$$

де $k_{нв} = R_e / R_{нв}$ – коефіцієнт, що характеризує рівень навантаження енергоприймача.

При неробочому ході $R_{нв} = \infty$, а $k_{нв} = 0$. Модуль напруги на виході енергоприймача у цьому разі:

$$U_{2_0} = \frac{U_1 k_0 \sqrt{Q_n Q_{e_0}}}{\sqrt{\frac{R'_n}{R_e} (1 + \varepsilon_n^2 Q_n^2) \cdot n}}. \quad (4.12)$$

Модуль вихідної напруги енергоприймача у долях напруги неробочого ходу:

$$\frac{U_2}{U_{2_0}} = \frac{\sqrt{1 + \varepsilon_n^2 Q_n^2}}{(k_{нв} + 1) \sqrt{\left[1 - Q_e Q_n \left(\varepsilon_n \varepsilon_e - \frac{k_0^2}{n}\right)\right]^2 + (\varepsilon_n Q_n + \varepsilon_e Q_e)^2}}. \quad (4.13)$$

На рис. 4.1 приведено залежності U_2/U_{2_0} від $k_{нв}$ (зовнішні характеристики), розраховані для значень параметрів елементів існуючої системи, а саме: $Q_l = 53,1$; $Q_{e_0} = 152$; $n = 600$ і двох значеннях $k_0 = 0,6$ (рис. 4.1,а) і $k_0 = 1,0$ (рис. 4.1,б). З аналізу кривих рис. 4.1 випливає, що найбільш прийнятною є робота, коли в електричних колах лінії та енергоприймача забезпечено стан резонансу напруг.

Крутість зовнішньої характеристики при $\varepsilon_l = \varepsilon_e = 0$ визначається за формулою:

$$k_1 = \frac{d(U_2/U_{2_0})}{dk_{нв}} = \frac{-\left(1 + Q_e Q_l \frac{k_0^2}{n}\right)}{\left[(k_{нв} + 1)^2 + k_{нв} Q_l Q_{e_0} \frac{k_0^2}{n}\right]^2}. \quad (4.13)$$

На рис. 4.2 показано залежність $|k_1|$ від $k_{нв}$, розрахована за формулою (14) при вказаних раніше параметрах.

За формулами (4.12, 4.13) розраховано залежність відношення U_2/U_1 від відносної довжини лінії, що показана на рис. 4.3. Видно, що зі зростанням (конструктивним шляхом) довжини лінії зменшується напруга U_2 енергоприймача, причому меншою мірою при більшому значенні k_0 .

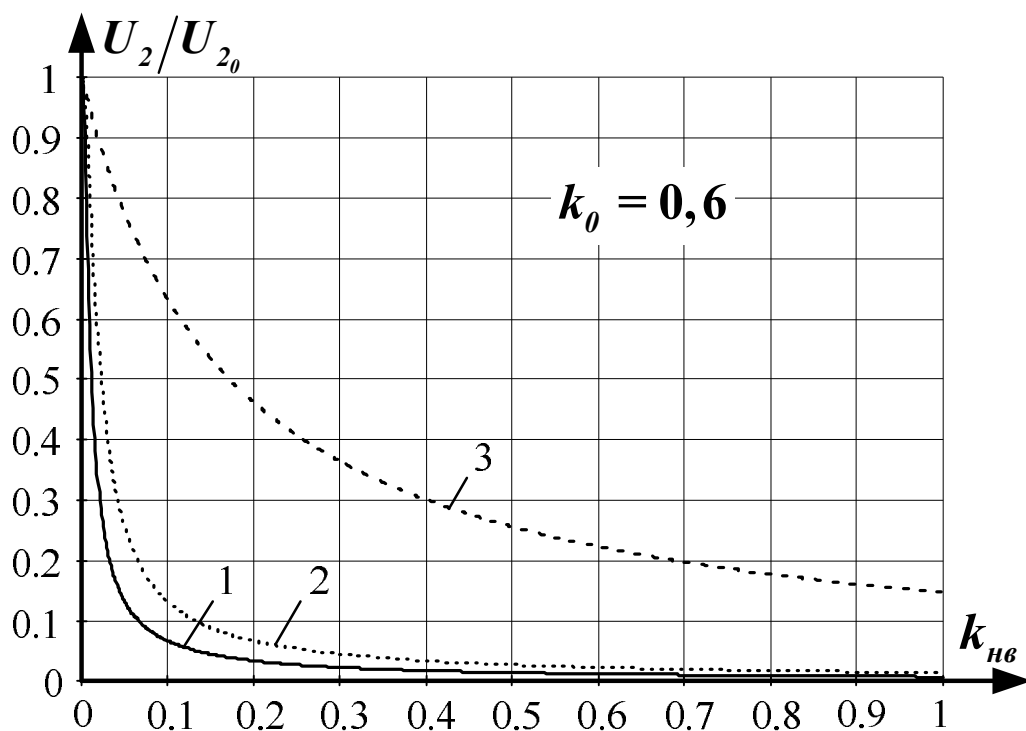
Активна потужність, що поставляється до тягової лінії:

$$P_1 = U_1 I_1 \cos(\varphi_2 - \varphi_1) = P_{1_k} \sqrt{\frac{(1 + \varepsilon_e Q_e)^2}{\left[1 - Q_e Q_l \left(\varepsilon_l \varepsilon_e - \frac{k_0^2}{n}\right)\right]^2 + (\varepsilon_l Q_l + \varepsilon_e Q_e)^2}} \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (4.15)$$

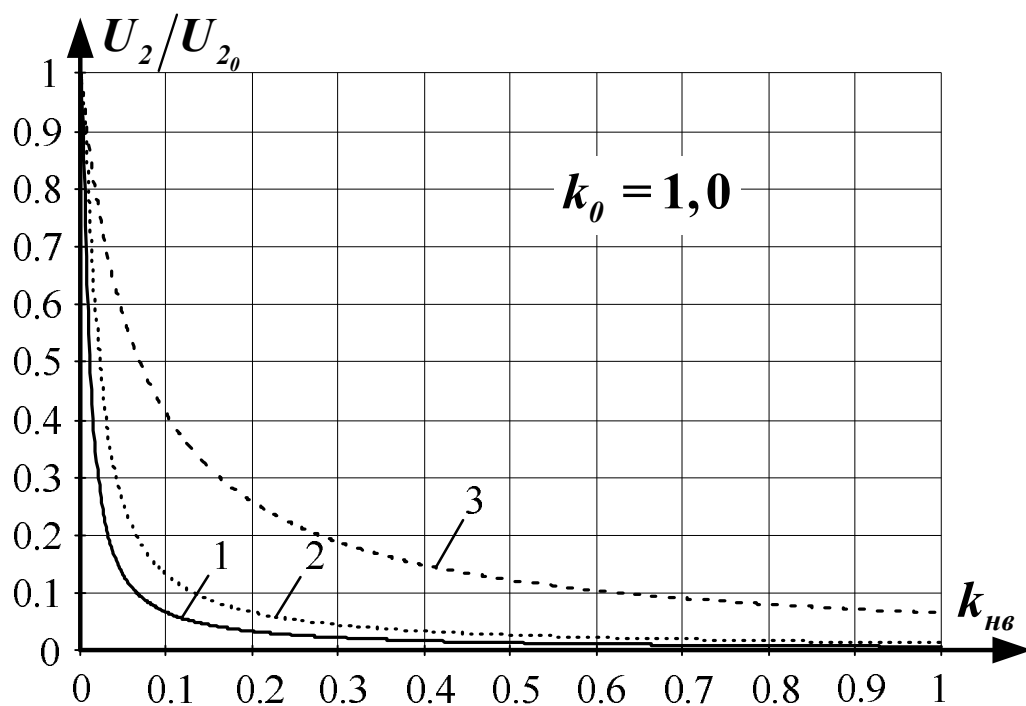
де $P_{1_k} = U_1^2 / R_l = U_1^2 / (R'_l \cdot n) = P'_k / n$, де $P'_k = U_1^2 / R'_l$.

Активна потужність на виході енергоприймача:

$$P_2 = I_2^2 R_{нв} = \frac{P_{1_k}}{(k_{нв} + 1)} \cdot \frac{Q_l Q_e \frac{k_0^2}{n}}{\sqrt{\left[1 - Q_e Q_l \left(\varepsilon_l \varepsilon_e - \frac{k_0^2}{n}\right)\right]^2 + (\varepsilon_l Q_l + \varepsilon_e Q_e)^2}}. \quad (4.16)$$



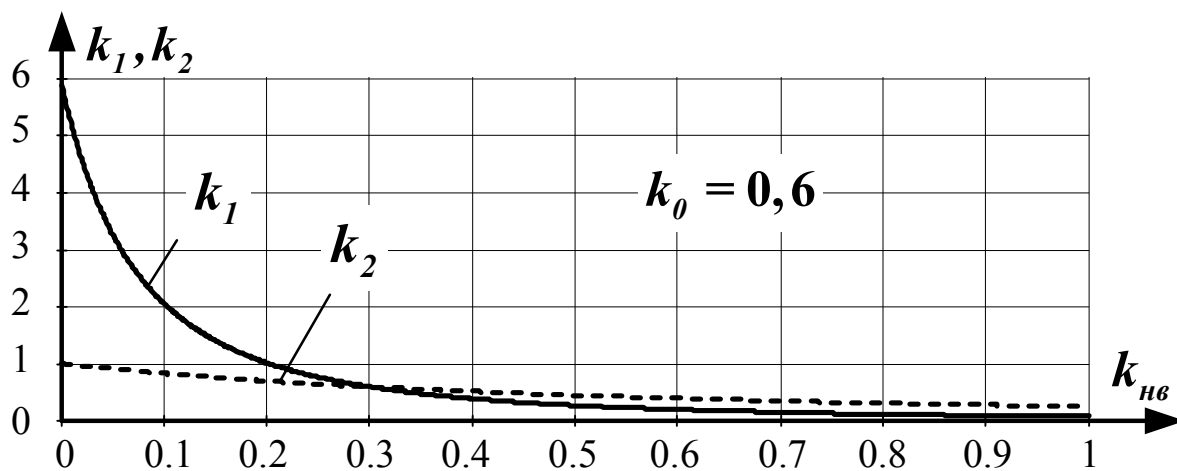
а)



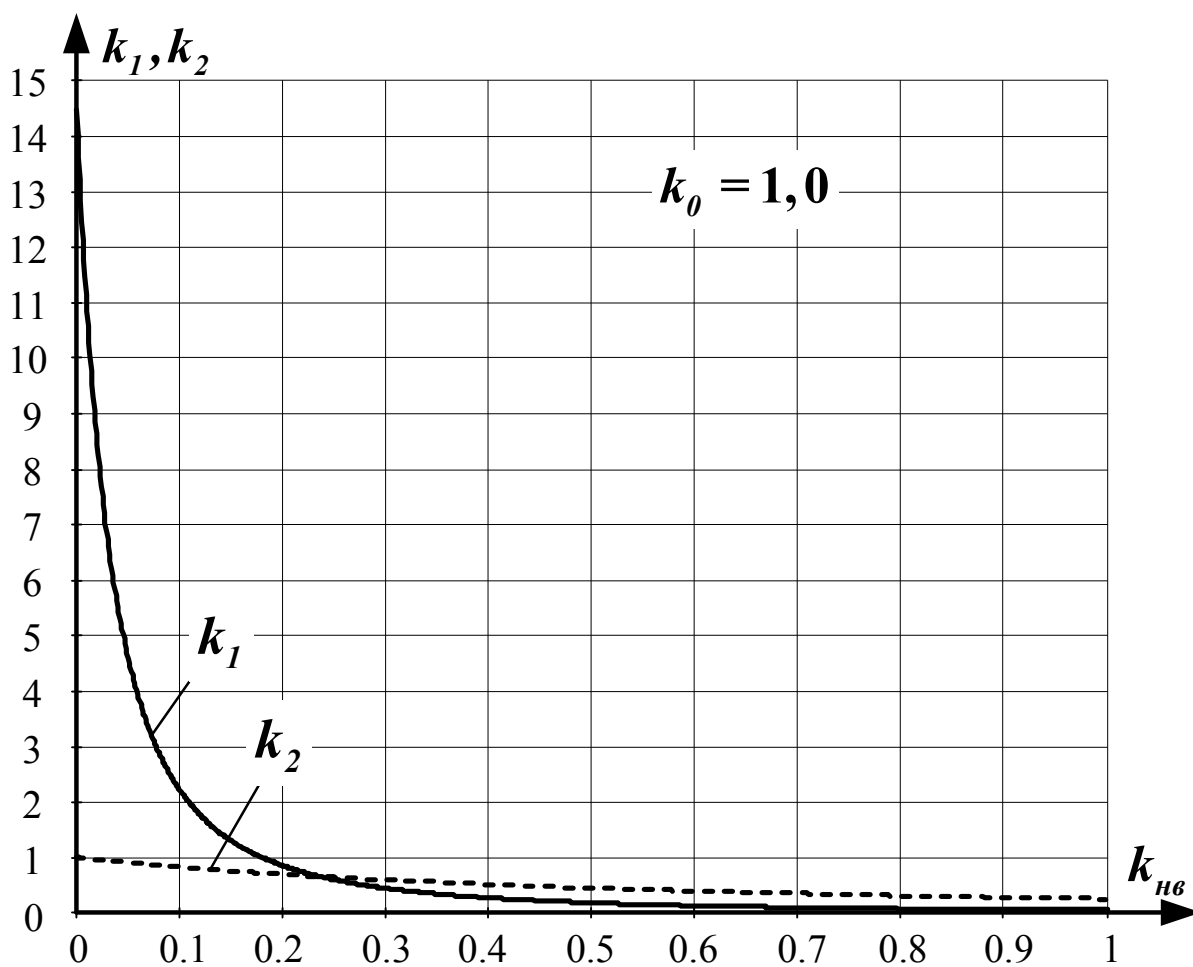
б)

а) при $k_0 = 0,6$;б) при $k_0 = 1,0$.

Рисунок 4.1 – Зовнішня характеристика енергоприймача (1 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 1,0$;
2 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0,5$; 3 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0$)



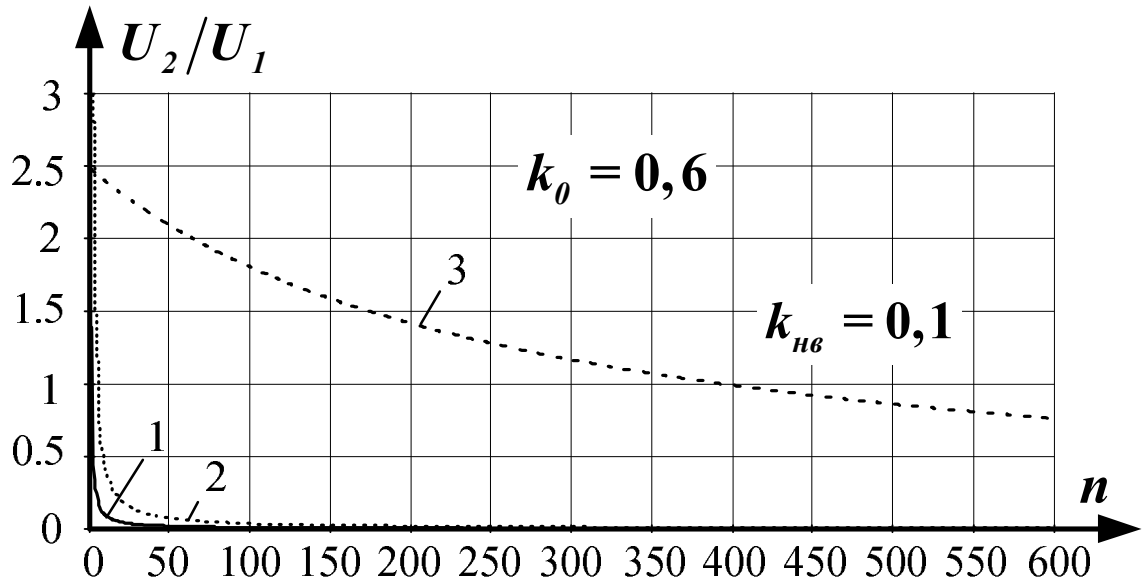
а)



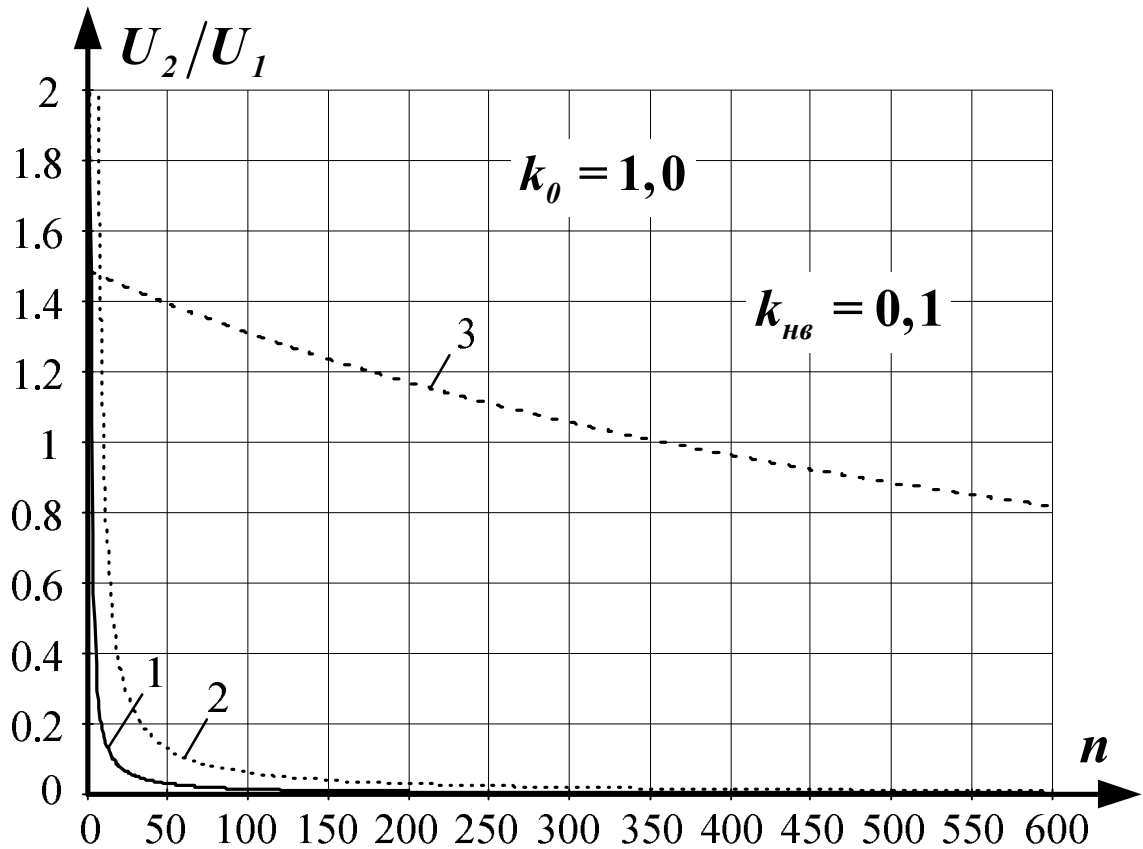
б)

а) при $k_0 = 0,6$;б) при $k_0 = 1,0$.

Рисунок 4.2 – Залежність крутостей k_1 і k_2 зовнішніх характеристик енергоприймача від коефіцієнту навантаження



а)



б)

а) при $k_0 = 0,6$; $k_{i\bar{a}} = 0,1$;б) при $k_0 = 1,0$; $k_{i\bar{a}} = 0,1$.

Рисунок 4.3 – Залежність відносної напруги на виході обмотки енергоприймача від відносної довжини лінії (1 – при $\varepsilon_e = \varepsilon_{\bar{a}} = 1,0$; 2 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0,5$; 3 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0$)

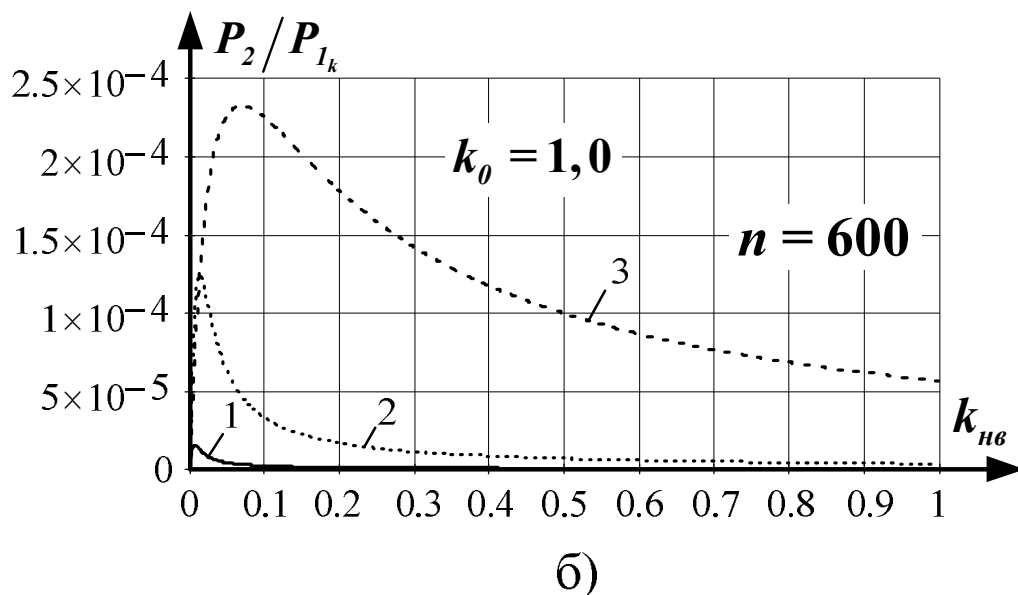
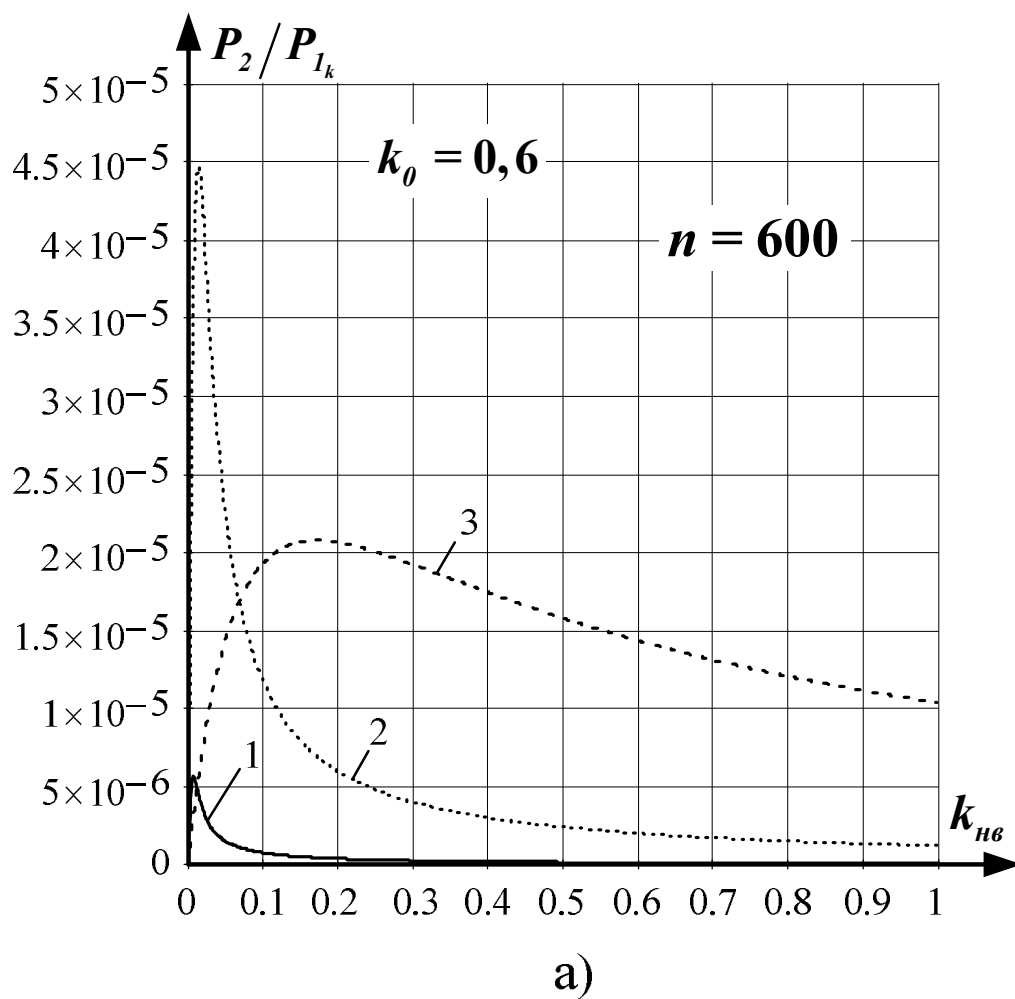
За формулою (4.16) розраховано залежності відношення $P_2/P_{1к}$ від $k_{не}$ при різних значеннях k_0 та $\varepsilon_l, \varepsilon_e$ що показано на рис. 4.4. При значенні напруги на виході лінії $U_1 = 1650$ В і опорі $R_l = 2,52$ Ом лінії довжиною 3000 м потужність $P_{1к} = 1080$ кВт. З аналізу кривих рис. 4.4 випливає, що достатньо велику потужність можна тримати лише при $\varepsilon_l = \varepsilon_e = 0$; при більшому значенні коефіцієнта k_0 збільшується потужність енергоприймача; межа стійкої роботи системи незначна і зменшується зі збільшенням k_0 . При $k_{не} = 0,15$, $P_2/P_{1к}$ потужність $P_2 = 216$ кВт; струм у лінії при цьому $I_1 = 401$ А. З'ясуємо, при якому значенні $k_{не}$ двигунам електровоза передається максимальна потужність, для чого дослідимо співвідношення (4.16) на максимум відносно $k_{не}$. Одержимо:

$$k_{неp} = \frac{\sqrt{1 + \varepsilon_l^2 Q_l^2}}{\sqrt{\left[1 - Q_e Q_l \left(\varepsilon_l \varepsilon_e - \frac{k_0^2}{n}\right)\right]^2 + (\varepsilon_l Q_l + \varepsilon_e Q_{e_0})^2}}. \quad (4.17)$$

На рис. 4.5 приведено залежності $k_{неp}$ від відносної довжини (n) лінії при двох значеннях k_0 , розрахованих по (4.17). Зі збільшенням довжини лінії також збільшується $k_{неp}$, при чому меншою мірою при збільшенні k_0 .

За допомогою виразу (4.16) розраховано залежність (рис. 4.6) відносної потужності, яку отримує енергоприймач: $P_2/P_{2б}$, де $P_{2б}$ – потужність P_2 при $k_{не} = 0,1$ і $n = 100$ від відносної довжини лінії. При $k_0 = 0,6$ та $\varepsilon_l = \varepsilon_e = 0$, $P_{2б} = 195,8$ кВт, а при $k_0 = 1,0$ і тих же умовах $P_{2б} = 102,6$ кВт. Потужність у колі енергоприймача зменшується при $\varepsilon_l = \varepsilon_e \geq 0,5$, як це витікає з рис. 4.6 (у випадку подовження тягової лінії). Система електропостачання буде працездатною за умови компенсації індуктивних опорів лінії і обмотки енергоприймача, тобто при $\varepsilon_l = \varepsilon_e = 0$.

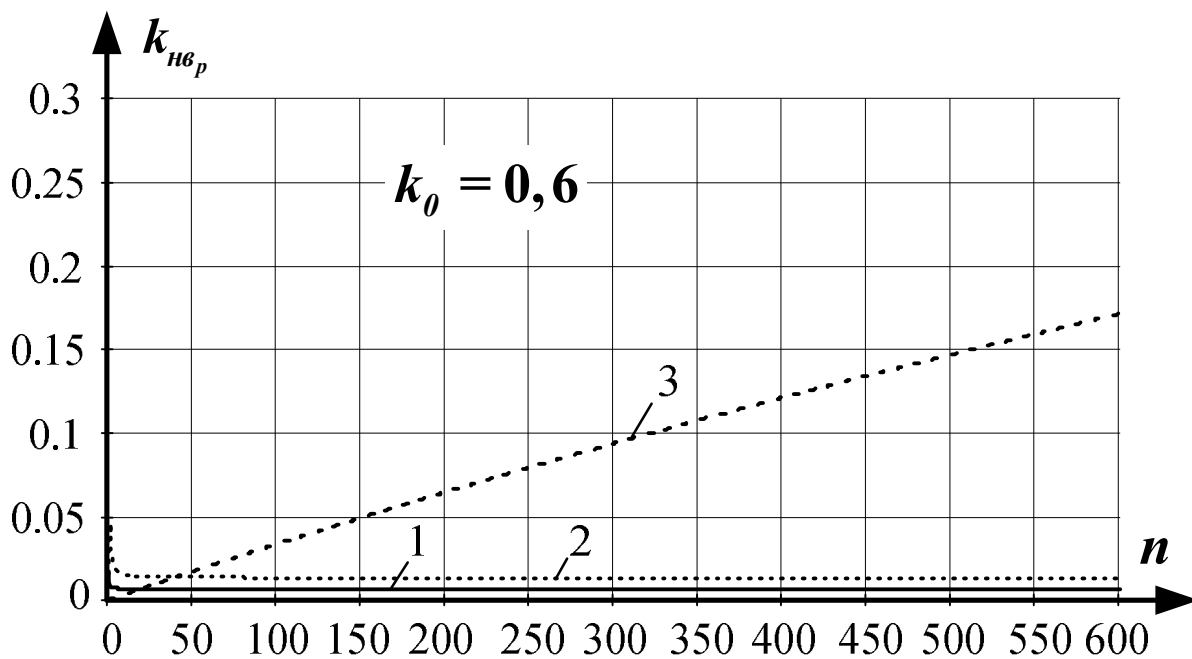
Використавши співвідношення (4.15) і (4.16), запишемо вираз для коефіцієнта корисної дії (ККД) системи електропостачання:



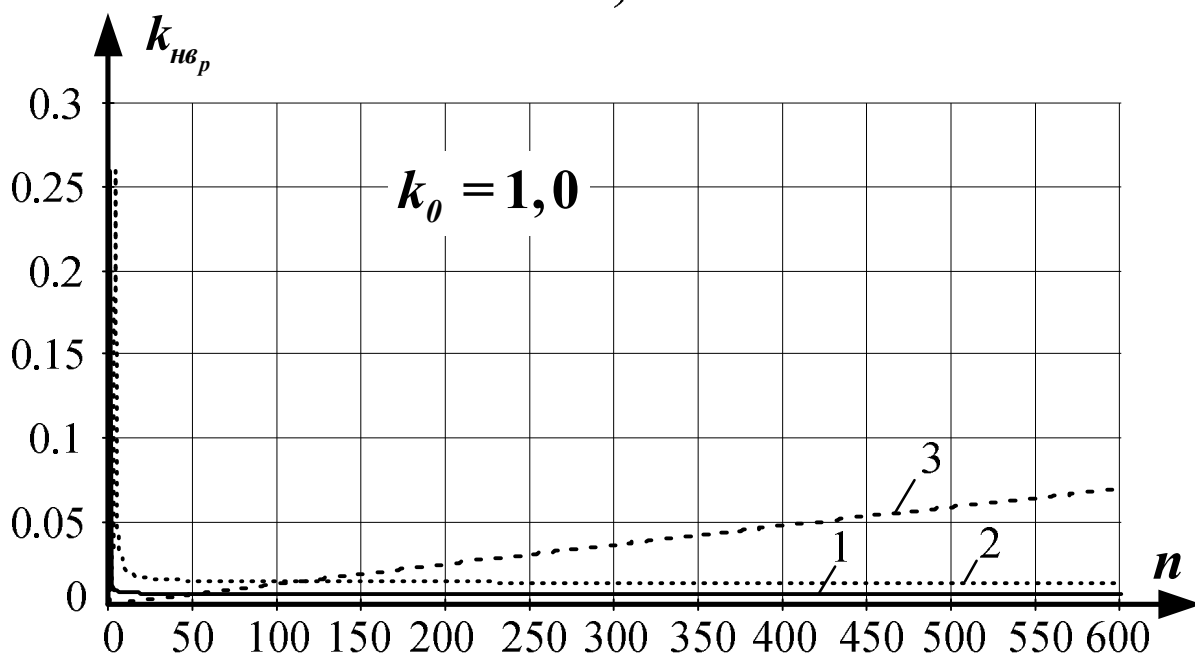
а) при $k_0 = 0,6$; $n = 600$;

б) при $k_0 = 1,0$; $n = 600$.

Рисунок 4.4 – Залежності відносної потужності енергоприймача від коефіцієнта навантаження (1 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 1,0$; 2 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0,5$; 3 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0$)



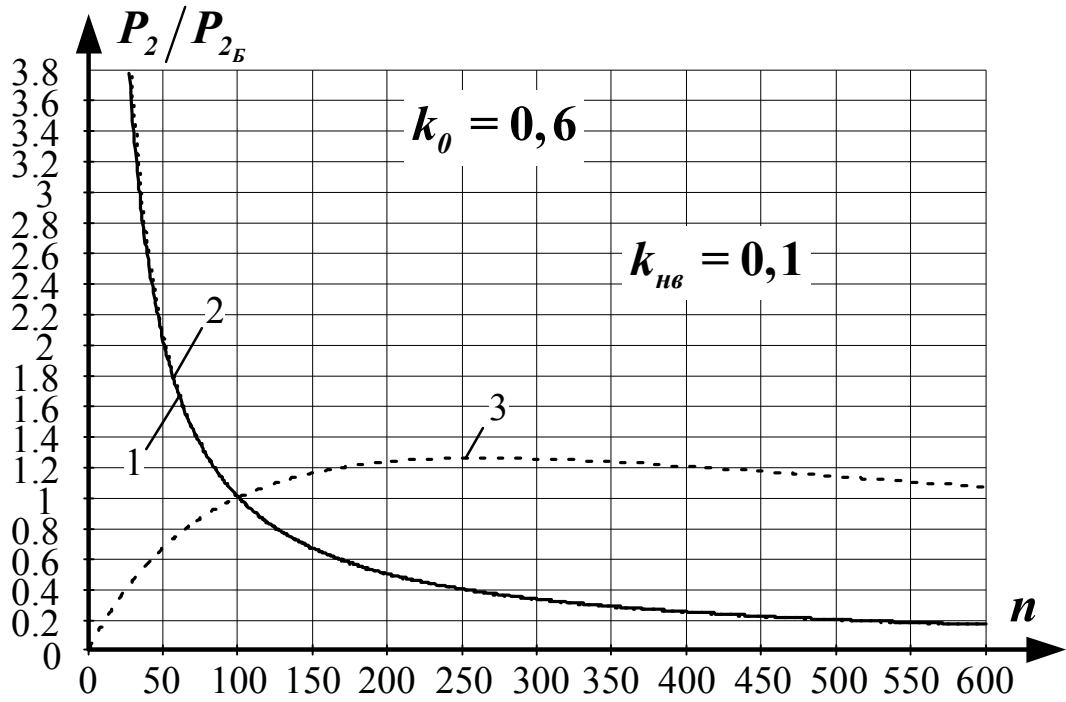
а)



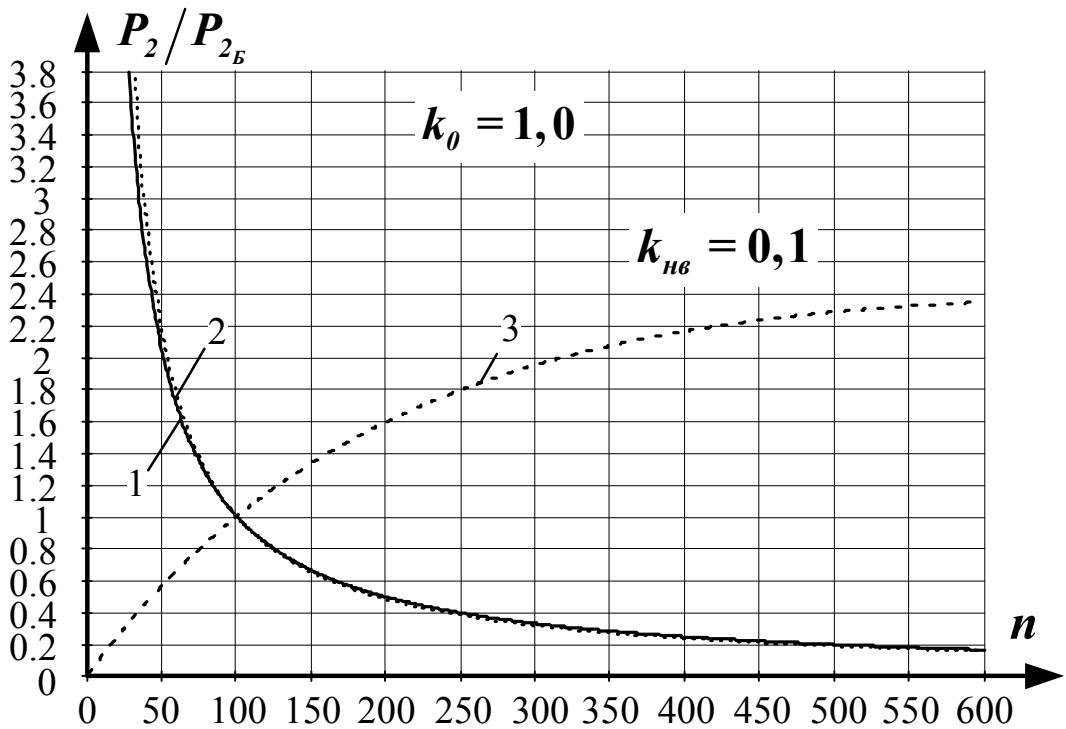
б)

а) при $k_0 = 0,6$;б) при $k_0 = 1,0$.

Рисунок 4.5 – Залежність $k_{нв,р}$ від відносної довжини лінії (1 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 1,0$; 2 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0,5$; 3 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0$)



а)



б)

а) при $k_0 = 0,6$; $k_{i\dot{a}} = 0,1$;б) при $k_0 = 1,0$; $k_{i\dot{a}} = 0,1$.

Рисунок 4.6 – Залежність відносної потужності енергоприймача від відносної довжини лінії (1 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 1,0$; 2 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0,5$; 3 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0$)

$$\eta = \frac{k_0^2 Q_l Q_e}{n \cdot (k_{нв} + 1) \sqrt{(1 + \varepsilon_e^2 Q_e^2) \left[1 - Q_e Q_l \left(\varepsilon_l \varepsilon_e - \frac{k_0^2}{n} \right) \right]^2 + (\varepsilon_l Q_l + \varepsilon_e Q_e)^2 \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}}. \quad (4.18)$$

За останньою формулою розраховано та представлено на рис. 4.7 залежність розміру ККД від коефіцієнту навантаження при вказаних раніше параметрах системи. З аналізу кривих рис. 7 витікає, що тільки при компенсації індуктивних опорів лінії та обмотки енергоприймача ККД системи електропостачання сягає прийнятних значень, причому зі збільшенням k_0 зростає розмір ККД. Також за формулою (4.18) розраховано залежність ККД від відносної конструктивної довжини тягової лінії при $k_{нв} = 0,1$, що показана на рис. 4.8. З аналізу кривих рис. 4.8 витікає, що зі збільшенням конструктивної довжини лінії розмір ККД системи електропостачання зменшується.

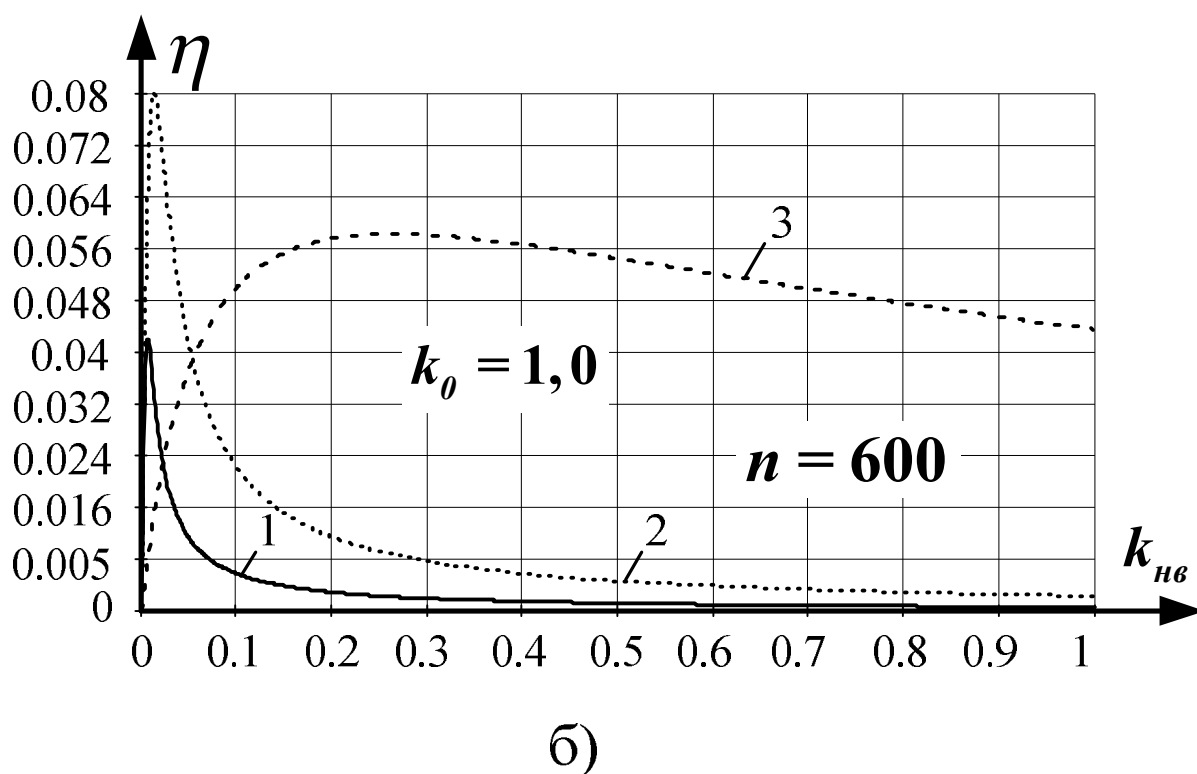
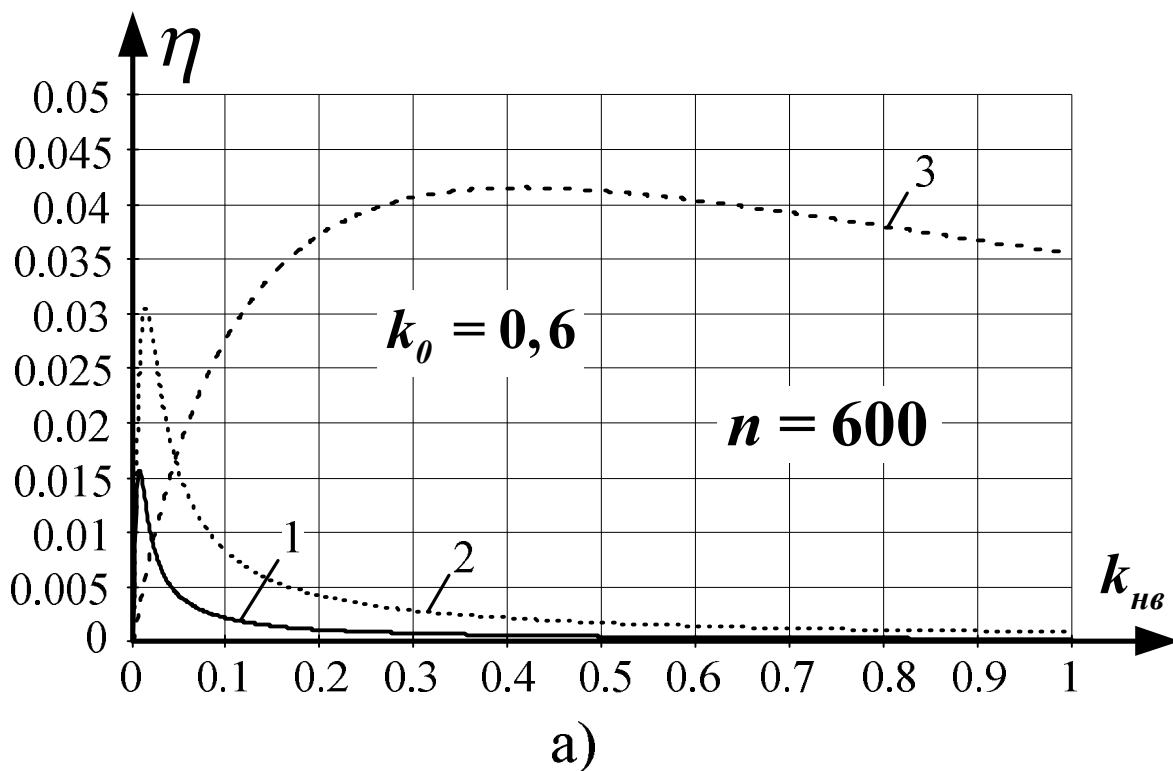
При $\varepsilon_l = \varepsilon_e = 0$ вираз ККД прийме вигляд:

$$\eta = \frac{1}{\frac{(k_{нв} + 1)^2 n}{k_0^2 Q_{e_0} Q_l k_{нв}} + (k_{нв} + 1)}. \quad (4.19)$$

Дослідивши вираз (4.19) на максимум відносно $k_{нв}$, одержимо:

$$k_{нвк} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{k_0^2 Q_{e_0} Q_l}{n}}}. \quad (4.20)$$

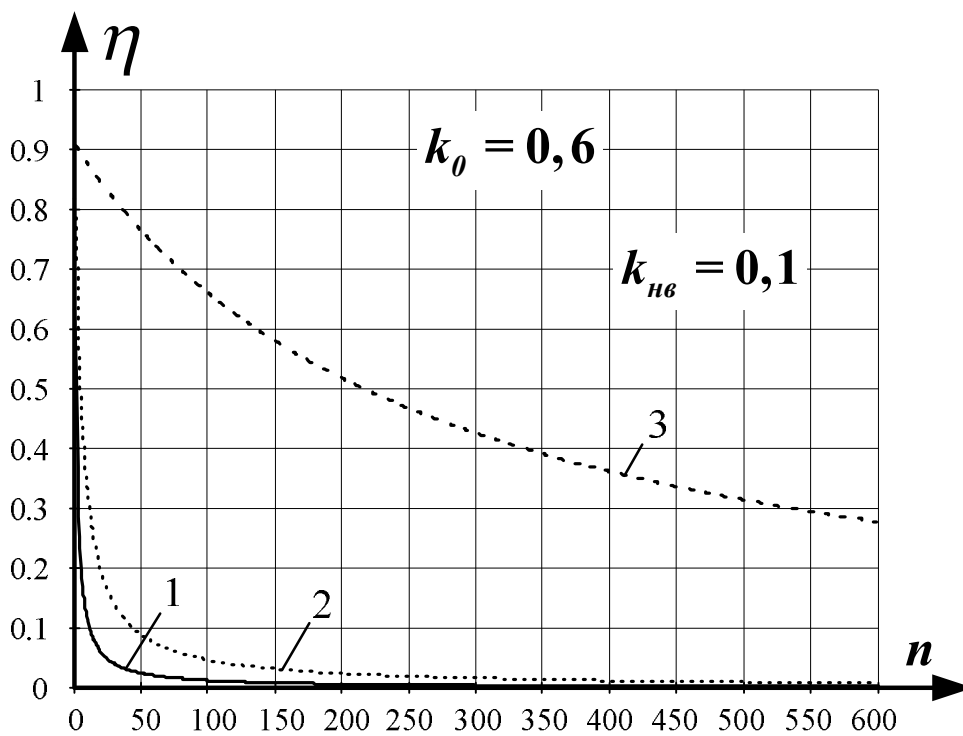
Тобто при значенні коефіцієнту навантаження згідно з (4.20) ККД системи електропостачання буде найбільшим при визначених параметрах елементів системи. Порівнюючи вираз (4.17) при умові $\varepsilon_l = \varepsilon_e = 0$ з виразом (4.20), отримаємо співвідношення $k_{нвп} = k_{нвк}^2$ або $k_{нвк} = \sqrt{k_{нвп}}$, тобто максимальні значення потужності P_2 і ККД системи мають місце при різних значеннях коефіцієнту навантаження. Так, при $k_{нвп} = 0,16$ (рис. 4.4,а) максимум ККД буде при $k_{нвк} = \sqrt{0,16} = 0,4$, коли робота системи вже буде нестійкою.



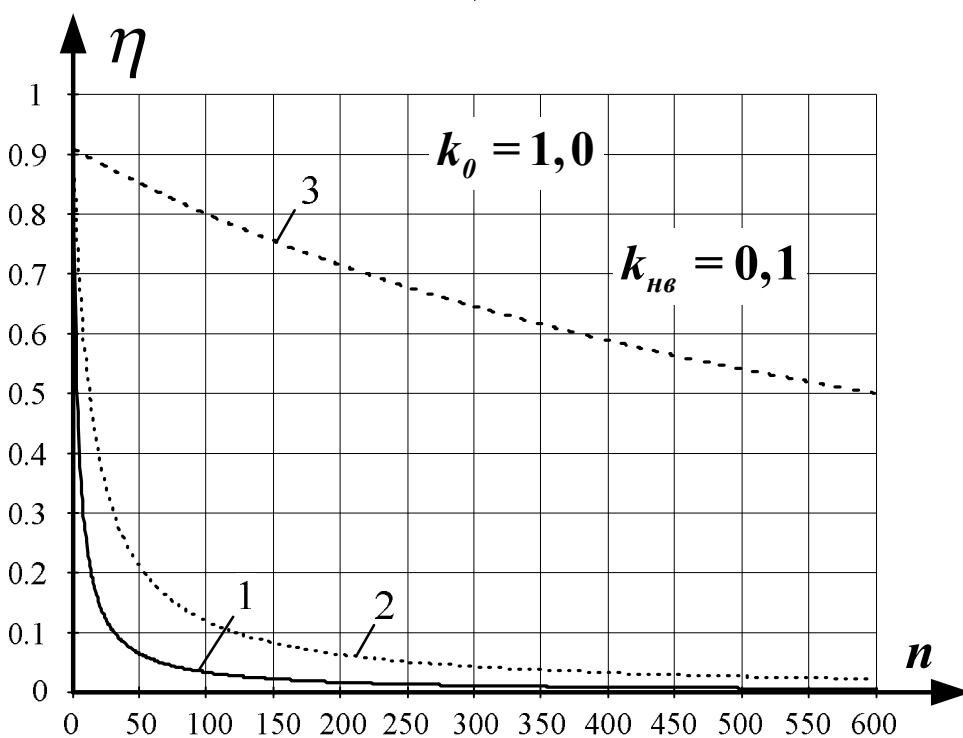
а) при $k_0 = 0,6$; $n = 600$;

б) при $k_0 = 1,0$; $n = 600$.

Рисунок 4.7 – Залежність коефіцієнту корисної дії системи електропостачання від коефіцієнту навантаження (1 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 1,0$; 2 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0,5$; 3 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0$)



а)



б)

а) при $k_0 = 0,6$;б) при $k_0 = 1,0$.

Рисунок 4.8 – Залежність коефіцієнту корисної дії системи електропостачання від конструктивної довжини лінії (1 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 1,0$; 2 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0,5$; 3 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0$)

Розглянемо варіант живлення тягової лінії від джерела струму, вважаючи струм лінії I_1 заданою і сталою величиною. У цьому випадку з рівнянь системи (4.2) одержимо:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \left(\underline{Z}_{11} + \frac{(\omega M)^2}{\underline{Z}_{22}} \right); \quad (4.21)$$

$$\dot{I}_2 = -\frac{j\omega M}{\underline{Z}_{22}} \dot{I}_1. \quad (4.22)$$

Після відповідних перетворень співвідношень (4.21) і (4.22) маємо:

$$\dot{U}_1 = U_{1_k} \sqrt{\frac{\left[1 - Q_e Q_l \left(\varepsilon_l \varepsilon_e - \frac{k_0^2}{n} \right) \right]^2 + (\varepsilon_l Q_l + \varepsilon_e Q_e)^2}{1 + \varepsilon_e^2 Q_e^2}} \cdot e^{j(\varphi_2 - \varphi_1)}, \quad (4.23)$$

де $U_{1_k} = I_1 R_l = I_1 \cdot R'_l \cdot n = U'_{1_k} \cdot n$; $U'_{1_k} = I_1 \cdot R'_l$;

$$\dot{I}_2 = k_0 \sqrt{\frac{R'_l Q_l Q_{e_0}}{R_e \left[(1 + 1/k_{ne})^2 + (\varepsilon_e Q_{e_0})^2 \right]}} \cdot I_1 e^{-j\varphi_3}, \quad (4.24)$$

де $\varphi_3 = \arctg(\varepsilon_e Q_e) + \pi/2$.

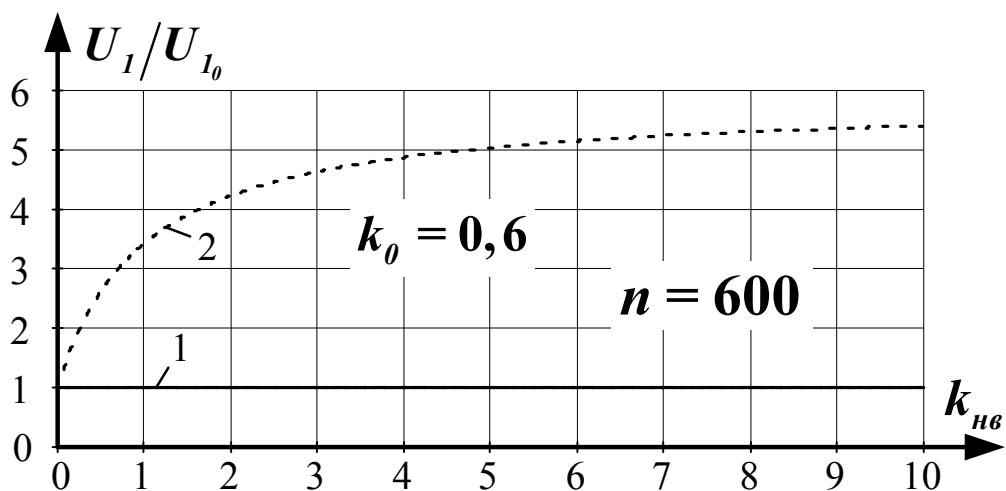
Модуль напруги на вході тягової лінії в режимі неробочого ходу, тобто $Q_e = 0$:

$$U_{1_0} = U_{1_k} \sqrt{1 + \varepsilon_l^2 Q_l^2}. \quad (4.25)$$

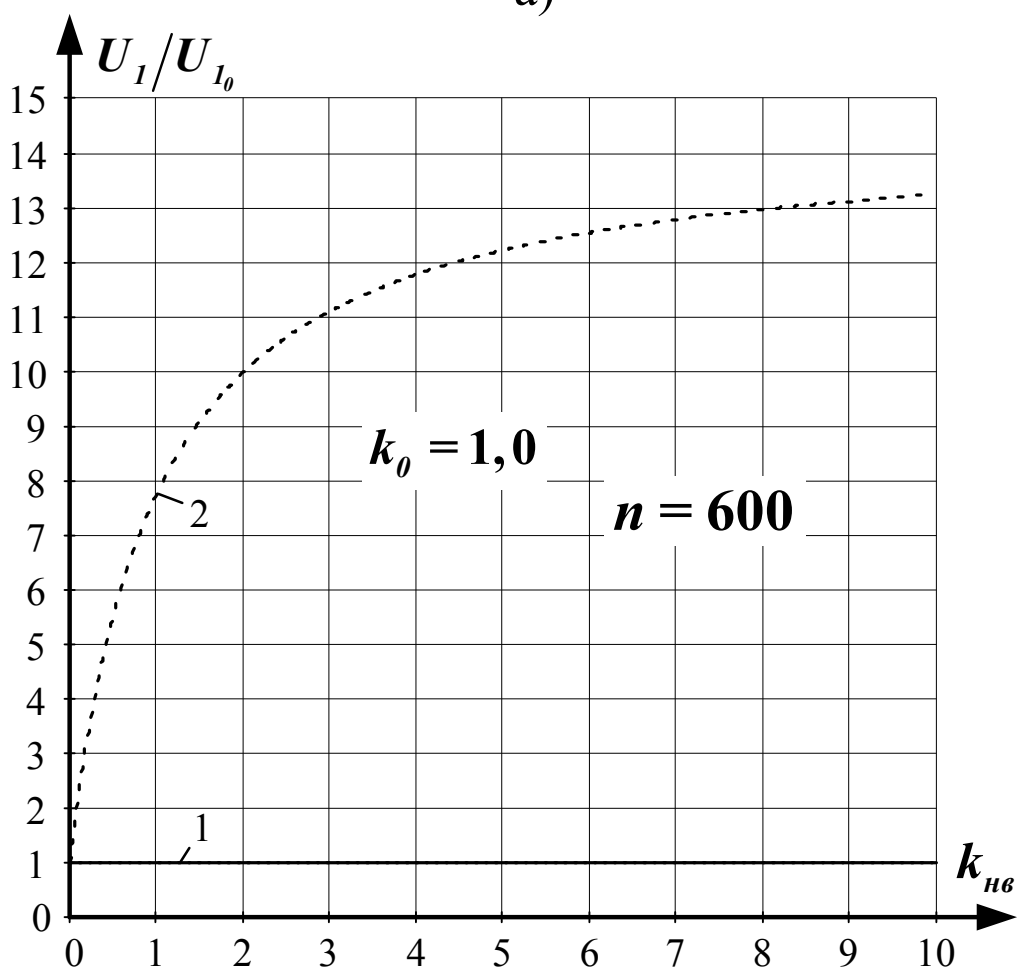
Відношення модулів напруг на вході тягової лінії при навантаженні та неробочому ході:

$$\frac{U_1}{U_{1_0}} = \sqrt{\frac{\left[1 - Q_e Q_l \left(\varepsilon_l \varepsilon_e - \frac{k_0^2}{n} \right) \right]^2 + (\varepsilon_l Q_l + \varepsilon_e Q_e)^2}{\left[1 + (\varepsilon_e Q_e)^2 \right] \cdot \left[1 + (\varepsilon_l Q_l)^2 \right]}}. \quad (4.26)$$

За формулою (4.26) розраховано залежності відносної напруги на вході лінії від коефіцієнту навантаження при $n = 600$ і різних значеннях коефіцієнтів k_0 , ε_l , ε_e , що зображено на рис. 4.9, а, б. З аналізу рис. 4.9 витікає, що тягова лінія реагує на навантаження зростанням напруги на вході тільки при повній компенсації індуктивних опорів лінії та обмотки енергоприймача;



а)



б)

а) при $k_0 = 0,6$; $n = 600$;б) при $k_0 = 1,0$; $n = 600$.

Рисунок 4.9 – Модуль відносної напруги на вході тягової лінії в залежності від коефіцієнту навантаження (1 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 1,0$; 2 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0,5$; 3 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0$)

зі зростом навантаження зростає (не прямопропорційно) рівень напруги на вході лінії; більшою мірою напруга зростає при більш високих значеннях k_0 .

На рис. 4.10 показано залежності відносної напруги на вході лінії від її конструктивної довжини при $k_{нв} = 0,2$. Видно, що напруга зростає прямопропорційно довжині і більшою мірою – при меншому значенні k_0 .

Модуль напруги при виході енергоприймача

$$U_2 = I_2 R_{нв} = k_0 \sqrt{\frac{R_e R'_l Q_l Q_{e_0}}{k_{нв}^2 \left[(1 + 1/k_{нв})^2 + (\varepsilon_e Q_{e_0})^2 \right]}} \cdot I_1. \quad (4.27)$$

В режимі неробочого ходу, тобто при $k_{нв} = 0$:

$$U_{2_0} = k_0 \sqrt{R_e R'_l Q_l Q_{e_0}} \cdot I_1 = k_0 \sqrt{\frac{R_e Q_l Q_{e_0}}{R'_l}} \cdot U'_{1к}. \quad (4.28)$$

Відношення модулів напруг при навантаженні і в режимі неробочого ходу:

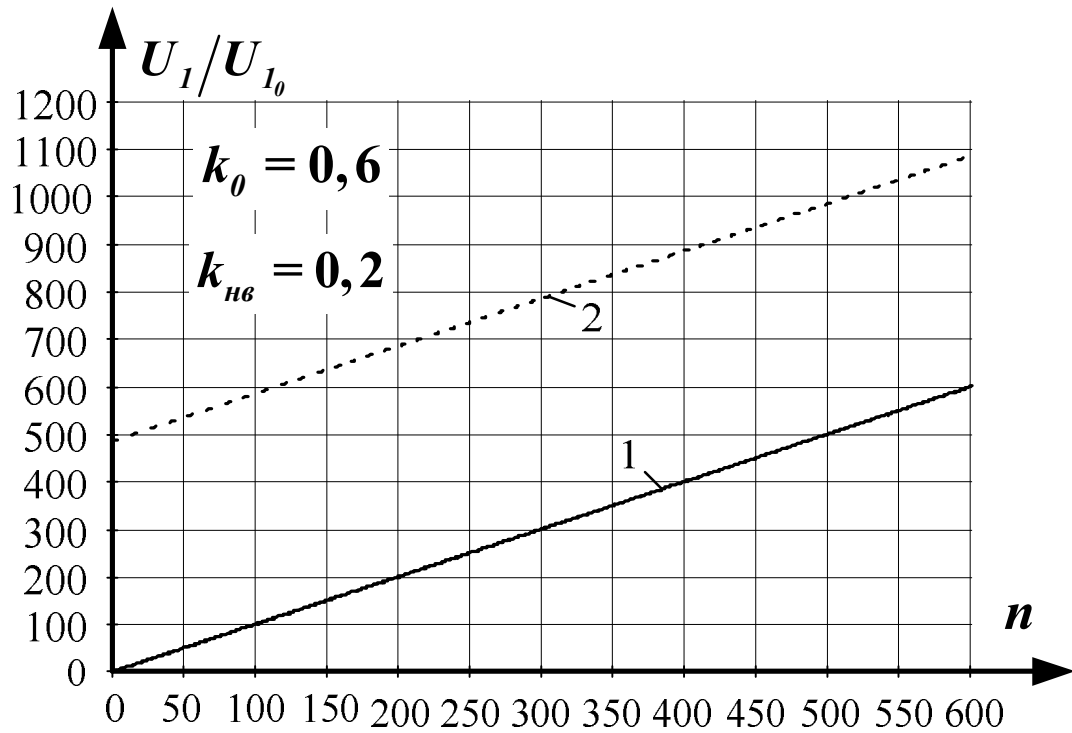
$$\frac{U_2}{U_{2_0}} = \frac{1}{\sqrt{(1 + k_{нв})^2 + (\varepsilon_e Q_{e_0} k_{нв})^2}}. \quad (4.29)$$

За формулою (4.29) розраховано залежності відношення напруг від коефіцієнту навантаження, представлені на рис. 4.11. При $\varepsilon_e = 0$, $k_{нв} = 1$, $U_2/U_{2_0} = 0,5$.

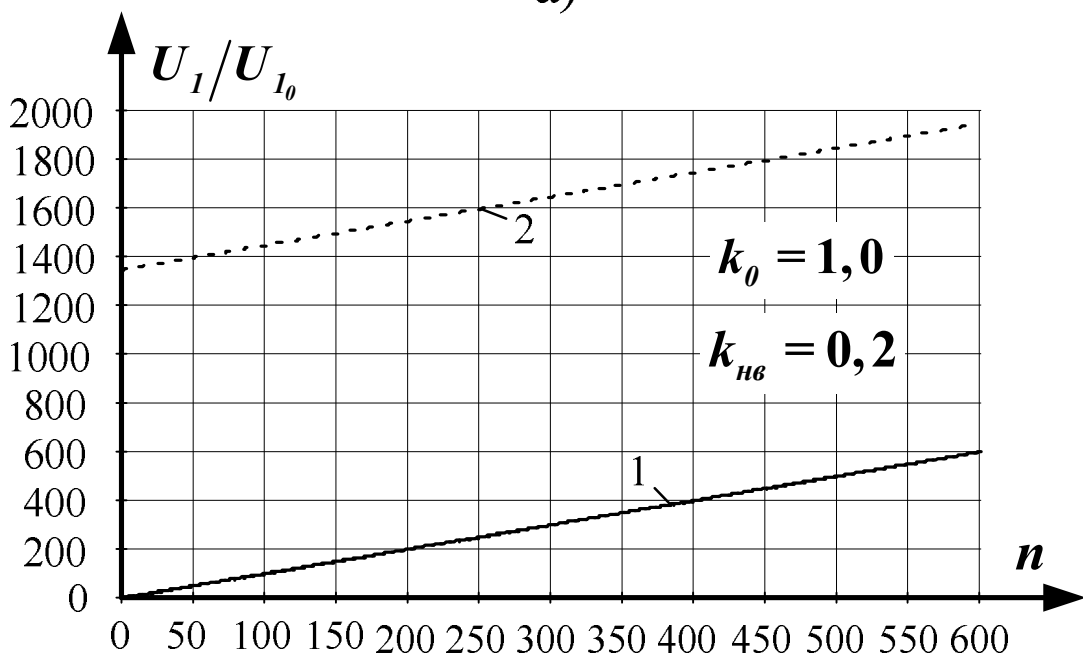
Крутість зовнішньої характеристики (4.29) при $\varepsilon_e = 0$:

$$k_2 = \frac{d(U_2/U_{2_0})}{dk_{нв}} = \frac{-1}{(1 + k_{нв})^2}. \quad (4.30)$$

На рис. 4.2 приведено результати розрахунків модуля k_2 в залежності від $k_{нв}$ у вигляді графіків. З порівняння графіків залежностей k_1 і k_2 витікає, що при порівняно невеликих навантаженнях ($k_{нв} < 0,3$) крутість зовнішньої характеристики енергоприймача при живленні лінії від джерела струму набагато менша такої при живленні від джерела напруги.



а)



б)

а) при $k_0 = 0,6$;б) при $k_0 = 1,0$.

Рисунок 4.10– Залежності модуля напруги на вході лінії від її конструктивної довжини при $k_{нв} = 0,2$ (1 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 1,0$; 2 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0,5$; 3 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0$)

З іншого боку, при навантаженнях, відповідних $k_{не} > 0,2$ і живленні мережі від джерела напруги, робота системи електропостачання стає нестійкою (рис. 4.4).

Активна потужність, що подається у тягову лінію:

$$P_1 = P_{1к} \sqrt{\frac{\left[1 - Q_e Q_l \left(\varepsilon_l \varepsilon_e - \frac{k_0^2}{n}\right)\right]^2 + (\varepsilon_l Q_l + \varepsilon_e Q_e)^2}{1 + (\varepsilon_e Q_e)^2}} \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1), \quad (4.31)$$

де $P_{1к} = I_1^2 \cdot R_l = I_1^2 R'_l n = P'_k n$, $P'_k = I_1^2 R'_l$.

Активна потужність, що передається двигуном електровозу:

$$P_2 = \frac{k_0^2 Q_l Q_{e_0} P'_{1к}}{k_{не} \left[(1 + 1/k_{не})^2 + (Q_e Q_{e_0})^2 \right]}. \quad (4.32)$$

На рис. 4.12 зображено залежності відносної потужності навантаження $P_2/P_{1к}$ від коефіцієнту навантаження при $n = 600$. Видно, що тільки при виконання умови $\varepsilon_l = \varepsilon_e = 0$ двигуни електровоза можуть отримати достатню енергію, розмір якої буде більшим при більш високому значенні k_0 .

При $I_1 = 150$ А, $R_l = 2,52$ Ом, $P_{1к} = 56,7$ кВт, $P'_k = 94,5$ Вт. При умовах $k_0 = 0,6$, $\varepsilon_e = 0$, $k_{не} = 0,3$, $Q_l = 53,1$, $Q_{e_0} = 152$ маємо $P_2 = 48,7$ кВт.

Коефіцієнт дії системи електропостачання для цього варіанту живлення тягової лінії також визначається за формулою (4.16).

Значення коефіцієнта $k_{не}$, при якому у навантаженні має місце максимальна потужність:

$$k_{неp} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\varepsilon_e Q_{e_0})^2}}. \quad (4.33)$$

При забезпеченні резонансу напруг у колі енергоприймача $k_{неp} = 1,0$.

Значення ККД для цього випадку згідно з (4.19):

$$\eta_p = \frac{1}{\frac{n}{k_0^2 Q_l Q_{e_0}} + 2}, \quad (4.34)$$

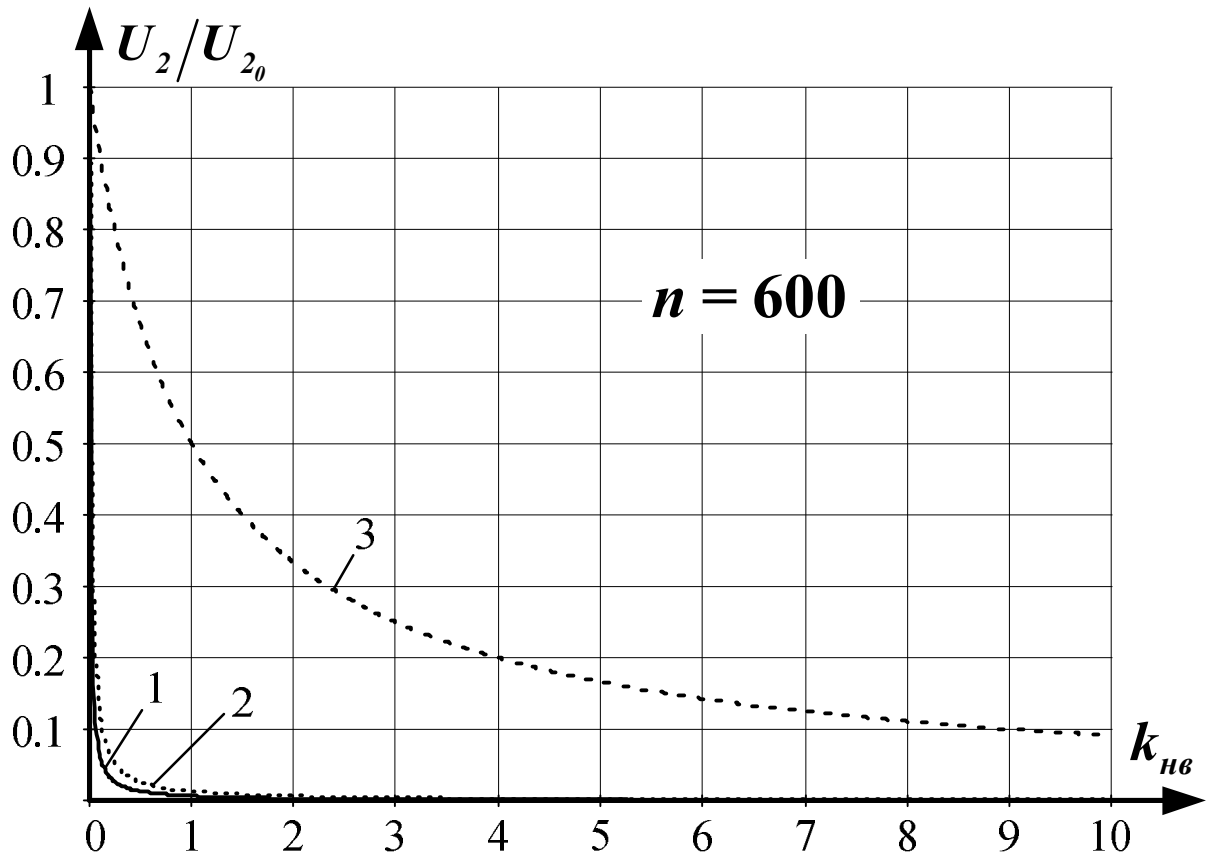
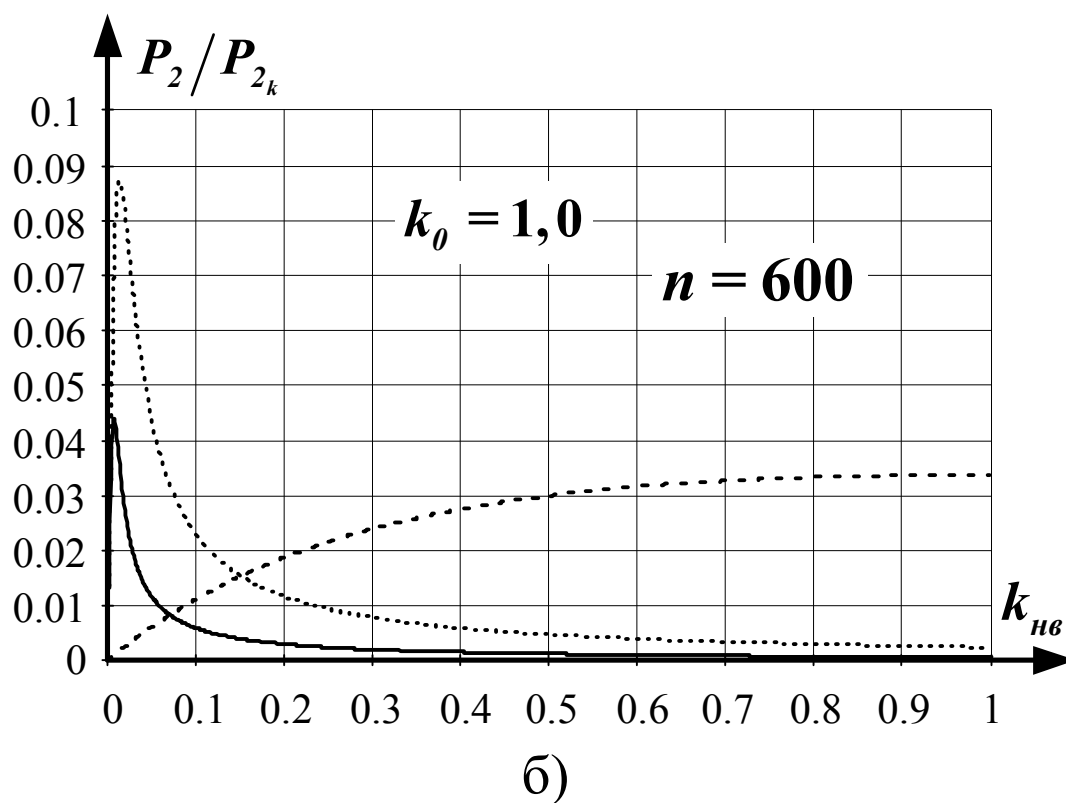
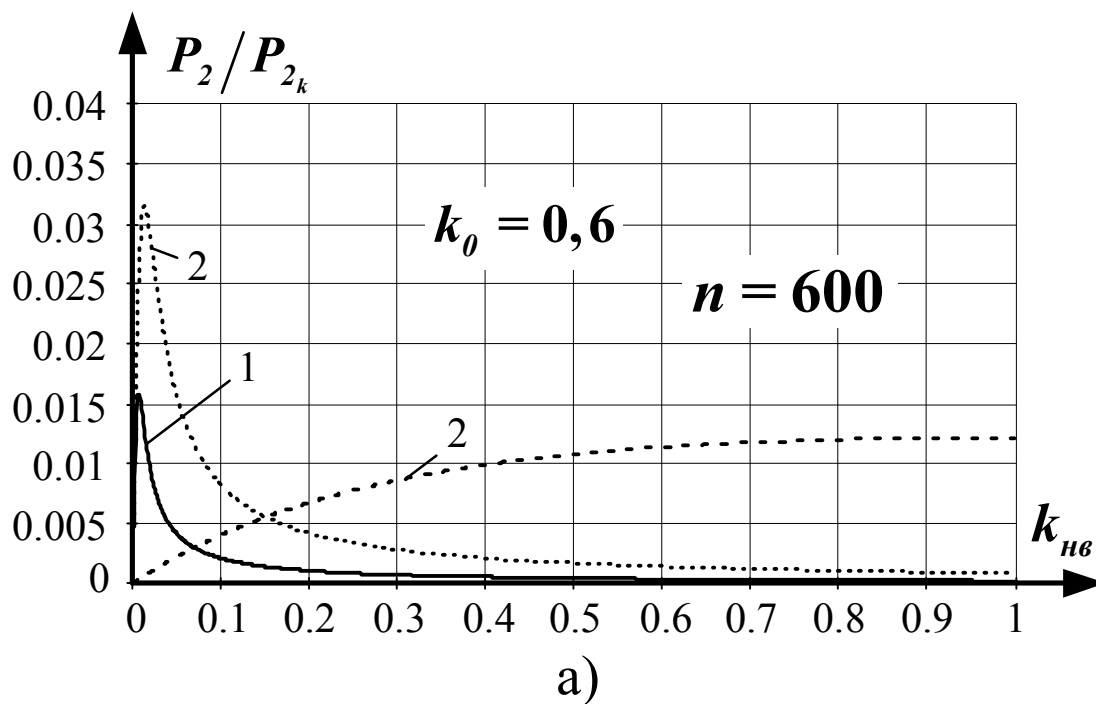


Рисунок 4.11– Відносна напруга на вході обмотки енергоприймача в залежності від коефіцієнту навантаження при $n = 600$ (1 – при $\varepsilon_l = \varepsilon_e = 1,0$; 2 – при $\varepsilon_l = \varepsilon_e = 0,5$; 3 – при $\varepsilon_l = \varepsilon_e = 0$)

тобто не перевищить 50 %. Активна потужність, яку в цьому випадку одержують двигуни електровозу:

$$P_{2_M} = 0,5k_0^2 Q_l Q_{e_0} \cdot P'_{1_k} \quad (4.35)$$

При $k_0 = 0,6$ та інших приведених раніше умовах одержимо $P_{2_M} = 137,3$ кВт.



а) при $k_0 = 0,6$;

б) при $k_0 = 1,0$.

Рисунок 4.12– Активна потужність навантаження у відносних одиницях в залежності від коефіцієнту навантаження (1 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 1,0$; 2 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0,5$; 3 – при $\varepsilon_n = \varepsilon_e = 0$)

5 ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ НА ТЯГОВУ МЕРЕЖУ І ЕНЕРГОПРИЙМАЧ ПРИ ПРОМИСЛОВІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОМПЛЕКСУ

5.1 Процеси при передачі енергії пересувним електроспоживачам у системі електропостачання вузла "тягова мережа - енергоприймач"

Система електропостачання пересувних електроспоживачів, у якій використовується безконтактна передача енергії, містить кілька електричних контурів [12, 14]. Вони характеризуються індуктивним зв'язком один з одним: деякі зв'язки є основними, для яких і створювалася система електропостачання, інших - супутніми й по своїй дії небажаними для взаємодії. Можливості змінювати умови їхньої взаємодії досить обмежені, оскільки положення електричних контурів у просторі гірського вироблення визначається необхідним числом геометричних координат, виходячи з технології ведення робіт.

Енергія зовнішнього джерела живлення системи електропостачання витрачається на роботу переміщення пересувних електроспоживачів, нагрівання провідників в електричних контурах і на зміну запасу енергії в електромагнітному полі елементів.

У визначенні взаємозв'язку між енергією в системі електропостачання і її складових, у тому числі енергією електромагнітного поля, необхідно розглядати структуру передавального, приймально-силових контурів електроспоживачів і супутнім провідникам системи електропостачання провідних контурів, які утворюються в інженерних конструкціях. Енергія електромагнітного поля є складним доданком у сповненої енергії системи електропостачання, у якому, у даній роботі, виділимо певні складові (зарядну, обмінну й споживану).

Установимо залежності між цими доданками енергії й показниками; укажемо основні, які характеризують режим електроспоживання в системі електропостачання пересувних електроспоживачів. Завдання оцінки кількості

запасеної, обмінній і переданої в системі електропостачання енергії мають важливе значення; її рішення дозволить установлювати міру впливу змін цієї енергії на режими живлення й роботи пересувних електроспоживачів. Визначення характеристик енергії по окремих елементах системи електропостачання спрямовано на з'ясування її енергетичних показників і використання як основи в аналізі електромагнітних і електромеханічних процесів в аварійних ситуаціях і стійкості сталих режимів.

Необхідність розгляду енергетичних характеристик окремих елементів системи електропостачання диктується тим, що результуючі опори як передавального (X_L) так і приймально-силових контурів пересувних електроспоживачів (X_C), на відміну від рішення інших завдань, наприклад в [13], не можуть характеризувати зміни й запас енергії в них. Так якщо результуючий реактивний опір ланцюга (послідовне з'єднання реактивних елементів індуктивного (L) і ємнісного виду (C)) перших і другого електричних контурів, відповідно $X_L = \omega L_L - 1/\omega C_L$ й $X_C = \omega L_C - 1/\omega C_C$, те загальна енергія в них буде дорівнює сумі електромагнітної енергії в їхніх елементах і, відповідно до теорії електричних ланцюгів, цей запас повинен залишатися незмінним (тут, індекс "л" ставиться до елементів передавального контуру; індекс "є" - до елементів пересувних електроспоживачів; $\omega = 2\pi f$ - кутова частота струму в мережі системи електропостачання, у цей час використовується частота $f = 5000 \text{ Гц}$).

5.2 Енергія електромагнітного поля в системі електропостачання вузла "тягова мережа - енергоприймач"

Визначимо складові сумарної енергії електромагнітного поля від струму в тяговій мережі і їхній рівень відносно до переданої енергії в системі електропостачання: реактивних елементах, що володіють індуктивністю або ємністю, електричних контурах пересувних електроспоживачів.

Енергія магнітного поля, створюваного змінним електричним струмом, що протікає в індуктивності, як відомо, змінюється в часі за складним законом - має постійну складову й змінну, що змінюється з подвійною частотою по порівнянню зі струмом. Конструктивно тягова мережа містить дві галузі (A и B) з рівним значенням індуктивності (власна індуктивність проводу L_{np} й взаємодіючі індуктивності проводів M_{np})

$$L_A = L_B = L_{np} - M_{np},$$

що роблять взаємний вплив при обтіканні змінним струмами:

$$i_A = I_m \sin(\omega t - \varphi);$$

$$i_B = I_m \sin(\omega t - \varphi + 180^\circ) = -I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Потокозчеплення фазних проводів, для випадку відсутності електровозів, буде дорівнює:

$$\Psi_A = i_A L_{np} + i_B M_{np};$$

$$\Psi_B = i_B L_{np} + i_A M_{np}.$$

Тоді сумарний запас енергії поля в індуктивності елементів тягової мережі складе:

$$w_{L\Sigma} = \Psi_A i_A + \Psi_B i_B$$

або

$$w_{L\Sigma} = I_m^2 2(L_{np} - M_{np}) \cdot [1 - \cos 2(\omega t - \varphi)] / 4; \quad (5.1)$$

він є по один складає змінним у часі. Для параметрів мережі в системі електропостачання безконтактних електровозів на шахті "Лутугінська" у ДХК "Луганськвугілля" вираження (5.1) має вигляд

$$w_{L\Sigma} = 58,725 [1 - \cos 2(\omega t - \varphi)] \quad \text{Вас}.$$

5.3 Енергія електричного поля конденсатора в системі електропостачання вузла "тягова мережа - енергоприймач"

Енергія електричного поля конденсатора в ланцюзі змінного струму - також змінна в часі величина. При включенні конденсаторів, що

компенсують, у галузі тягової мережі послідовна напруга на їхніх затискаках залежить від струму:

$$u_{C(A)} = \frac{1}{C} \int I_m \sin(\omega t - \varphi) \cdot dt = \frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t - \varphi);$$

$$u_{C(B)} = \frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t - \varphi + 180^\circ) = -\frac{I_m}{\omega C} \cos(\omega t - \varphi).$$

Енергія поля в конденсаторі $C_{КП}$ галузей буде дорівнює:

$$w_{C(A)} = \frac{C_{КП} u_{C(A)}^2}{2} = \frac{I_m^2}{2\omega^2 C_{КП}} \cos^2(\omega t - \varphi) = \frac{I_m^2}{4\omega^2 C_{КП}} (1 + \cos 2(\omega t - \varphi));$$

$$w_{C(B)} = \frac{C_{КП} u_{C(B)}^2}{2} = \frac{I_m^2}{4\omega^2 C_{КП}} (1 + \cos 2(\omega t - \varphi)).$$

Сумарна енергія поля в конденсаторах тягової мережі (у галузях установлені відповідно n_A й n_B компенсаційних пунктів):

$$w_{C\Sigma} = n_A w_{C(A)} + n_B w_{C(B)} = (n_A + n_B) \frac{I_m^2}{4\omega^2 C_{КП}} (1 + \cos 2(\omega t - \varphi)); \quad (5.2)$$

для параметрів елементів мережі в системі електропостачання вираження (5.2) має вигляд

$$w_{C\Sigma} = 57,302(1 + \cos 2(\omega t - \varphi)), \quad \text{ВAc}.$$

Запас енергії поля в реактивних елементах тягової мережі визначається вираженням

$$w_{\Sigma LC} = \frac{I_m^2 2(L_{np} - M_{np}) [1 - \cos 2(\omega t - \varphi)]}{4} + (n_A + n_B) \frac{I_m^2}{4\omega^2 C_{КП}} (1 + \cos 2(\omega t - \varphi))$$

або з виділенням постійного в часі доданка

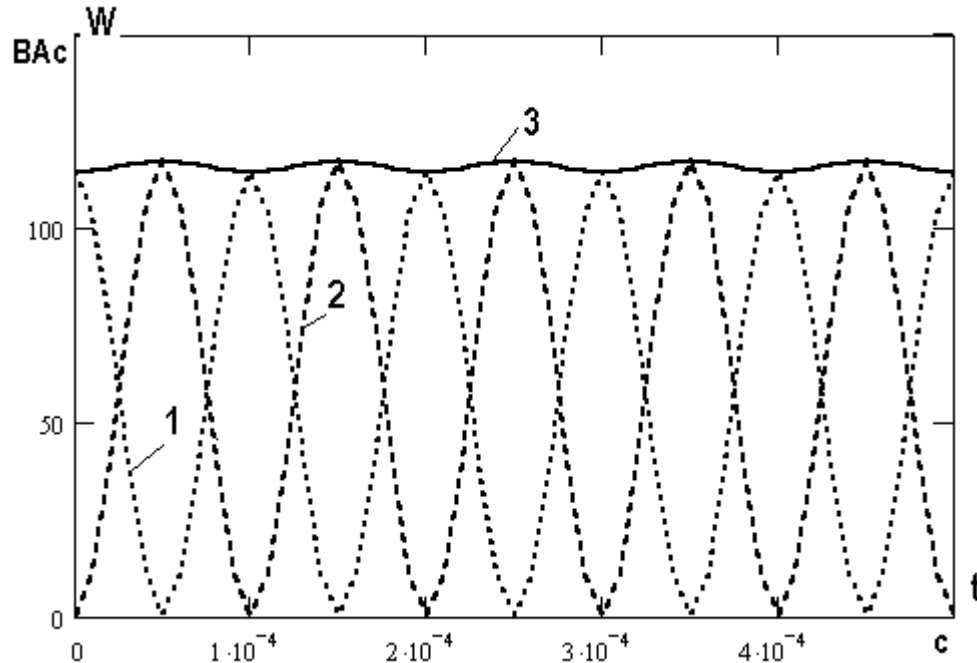
$$w_{\Sigma LC} = \frac{I_m^2}{4\omega} \left\{ \left[2\omega(L_{np} - M_{np}) + \frac{n_A + n_B}{\omega C_{КП}} \right] - \left[2\omega(L_{np} - M_{np}) - \frac{(n_A + n_B)}{\omega C_{КП}} \right] \cos 2(\omega t - \varphi) \right\}. \quad (5.3)$$

По реальних параметрах елементів тягової мережі (5.3) приймає вид

$$w_{\Sigma LC} = 116,026 - 1,423 \cos 2(\omega t - \varphi), \quad \text{ВAc};$$

графічна ілюстрація цього вираження наведена на рисунки 5.1. Зарядна енергія у реактивних елементах є постійною (крива 3), у процесі роботи тягової мережі циркулює усередині елементів її передавального контуру між електричною ємністю компенсаційних пунктів (крива 1) і індуктивністю

фазних проводів (крива 2). Вона практично вимагає поновлення від джерела живлення тільки по обмінній складовій енергії. Обмінна енергія між джерелом живлення й тяговою мережею (див. рисунок 5.2, коливальна складова) за рівнем амплітуди порівняно незначна.



- 1 - у ємності компенсаційних пунктів;
- 2 - в індуктивності тягової лінії;
- 3 - запас енергії в тяговій мережі.

Рисунок 5.1 – Енергія електромагнітного поля в реактивних елементах тягової мережі:

Як треба з вираження (5.3) зміна обмінної складової енергії по амплітуді залежить від реактивного розладу стану резонансу напруг у тяговій мережі: чим сильніше розлад, Тім більше завантажене джерело живлення обмінною енергією.

Отже на створення сталого режиму по реактивній енергії буде витрачена постійна складова енергії, а обмінна енергія буде (другий доданок) буде міняти знак двічі за період змінного струму.

Складова енергії, що перетвориться в тепло в провідниках тягової мережі з сумарним опором R_d , дорівнює

$$w_{R,L} = \int i^2 R_{\Sigma} dt = \int I_m^2 R_{\Sigma} \sin^2(\omega t - \varphi) dt = I_m^2 R_{\Sigma} \left[\frac{t}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin 2(\omega t - \varphi) \right]$$

або

$$w_{R,L} = \frac{I_m^2 t}{2} R_{\Sigma} \left[1 - \frac{1}{\omega t} \sin 2(\omega t - \varphi) \right]. \quad (5.4)$$

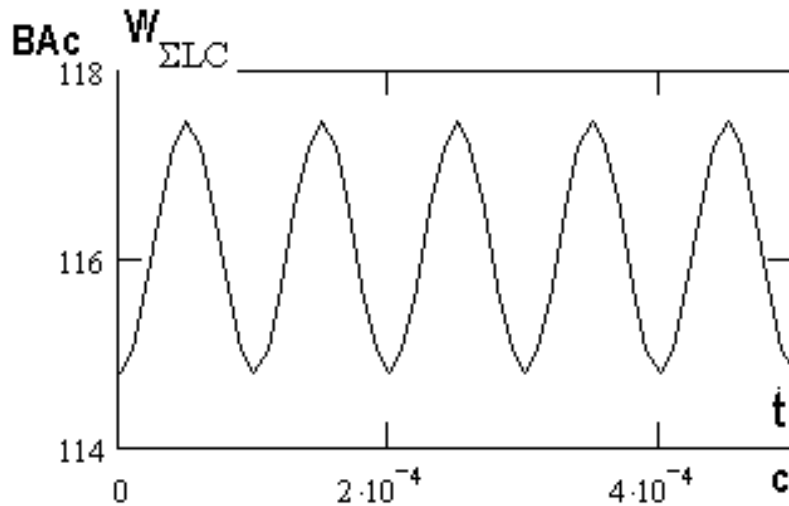


Рисунок 5.2 – Зміна зарядної енергії в реактивних елементах тягової мережі

Енергія, що споживає від джерела живлення тягова мережа в режимі холостого ходу, буде дорівнює

$$w_{TC,XX} = \frac{I_m^2}{4\omega} \left\{ \left[2\omega(L_{np} - M_{np}) + \frac{n_A + n_B}{\omega C_{КП}} \right] - \left[2\omega(L_{np} - M_{np}) - \frac{(n_A + n_B)}{\omega C_{КП}} \right] \cos 2(\omega t - \varphi) - \right. \\ \left. - R_{\Sigma} \sin 2(\omega t - \varphi) + 2\omega R_{\Sigma} \cdot t \right\}. \quad (5.5)$$

Вираження (5.5) містить доданки різного характеру: перше характеризує для тягової мережі зарядну енергію; другові й третє - обмінну енергію в елементах; четверте - енергію нагрівання провідників.

5.4 Складові енергії, пов'язані з наявністю індуктивного зв'язку в системі електропостачання вузла "тягова лінія - енергоприймач"

Складові енергії, пов'язані з наявністю індуктивного зв'язку з пересувними електроспоживачами, визначаються наступної. При розладі стану

резонансу напруг у приймально-силовому контурі енергоприймача пересувного електроспоживача в тягову мережу вносяться активні й реактивна складові опори, які розглядаємо як еквівалент його тягового навантаження.

Реактивна складова результуючого опору контуру енергоприймача в експлуатаційних режимах практично завжди має індуктивний характер і в тягову мережу вноситься через індуктивний зв'язок відповідно складова опору ємнісного характеру. Цієї внесеної в передавальний контур ємністю (далі використані позначення: $R_{не}$ - активний опір - еквівалент тягового навантаження; $\xi_{\text{э}}$ - коефіцієнт, що характеризує розлад стану резонансу напруг у приємносиловому контурі електровоза)

$$C_{\xi BH} = \frac{(R_{не} + R_{\text{э}})^2 + X_{\text{э}}^2 \xi_{\text{э}}^2}{\omega^3 M^2 X_{\text{э}} \xi_{\text{э}}},$$

будемо еквівалентно характеризувати відповідну складову електромагнітної енергії в тяговій мережі від пересувних електроспоживачів

$$w_{X,\text{э}} = \frac{C_{\xi BH} u^2 c}{2} = \frac{I_m^2}{4\omega^2 C_{\xi BH}} (1 + \cos 2(\omega t - \varphi)).$$

Останнє вираження перетворимо до виду

$$w_{X,\text{э}} = \frac{\omega M^2 X_{\text{э}} \xi_{\text{э}}}{(R_{не} + R_{\text{э}})^2 + X_{\text{э}}^2 \xi_{\text{э}}^2} \cdot \frac{I_m^2}{4} (1 + \cos 2(\omega t - \varphi)). \quad (5.6)$$

Для параметрів реальної системи електропостачання вираження (5.6) має вигляд

$$w_{X,\text{э}} = 0,259(1 + \cos 2(\omega t - \varphi)), \quad BAc.$$

Активна складова опору, що еквівалентна активної складової енергії переданої пересувному електроспоживачу, буде дорівнює

$$R_{BH,\text{э}} = \frac{\omega^2 M^2 (R_{не} + R_{\text{э}})}{(R_{не} + R_{\text{э}})^2 + X_{\text{э}}^2 \xi_{\text{э}}^2}.$$

На її основі складова енергії, що передається на роботу одному споживачеві, буде описана вираженням

$$w_{R,\text{э}} = \int i^2 R_{BH,\text{э}} dt = \int I_m^2 R_{BH,\text{э}} \sin^2(\omega t - \varphi) dt = I_m^2 R_{BH,\text{э}} \left[\frac{t}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin 2(\omega t - \varphi) \right],$$

у якому виділяємо два доданки

$$w_{R,\varnothing} = \frac{I_m^2 t}{2} \frac{\omega^2 M^2 (R_{нз} + R_{\varnothing})}{(R_{нз} + R_{\varnothing})^2 + X_{\varnothing}^2 \xi_{\varnothing}^2} - \frac{I_m^2}{4} \frac{\omega M^2 (R_{нз} + R_{\varnothing})}{(R_{нз} + R_{\varnothing})^2 + X_{\varnothing}^2 \xi_{\varnothing}^2} \sin 2(\omega t - \varphi). \quad (5.7)$$

Тоді складова енергії системи електропостачання, що витрачається на покриття втрат і передається на корисну роботу споживачам, буде дорівнює

$$w_R = \int i^2 R_{BX} dt = \int I_m^2 R_{BX} \sin^2(\omega t - \varphi) dt = I_m^2 R_{BX} \left[\frac{t}{2} - \frac{1}{4\omega} \sin 2(\omega t - \varphi) \right],$$

де $R_{BX} = R_L + R_{BH,\varnothing}$ - активна складова вхідного опору тягової мережі.

Виділяючи в w_R доданок постійного знака, одержимо

$$w_R = \frac{I_m^2 t}{2} \left[R_L + \frac{\omega^2 M^2 (R_{нз} + R_{\varnothing})}{(R_{нз} + R_{\varnothing})^2 + X_{\varnothing}^2 \xi_{\varnothing}^2} \right] - \frac{I_m^2}{4\omega} \left[R_L + \frac{\omega^2 M^2 (R_{нз} + R_{\varnothing})}{(R_{нз} + R_{\varnothing})^2 + X_{\varnothing}^2 \xi_{\varnothing}^2} \right] \sin 2(\omega t - \varphi). \quad (5.8)$$

Для параметрів системи електропостачання на шахті "Лутугінська" вираження (5.8) має вигляд

$$w_R = 1,417 \cdot 10^5 t - 2,255 \sin 2(\omega t - \varphi), \text{ Вас.}$$

Енергія системи електропостачання на вході тягової мережі буде дорівнює

$$w_{TC} = w_{TC,XX} + \sum_{i=1}^{N_3} (w_{X,\varnothing i} + w_{R,\varnothing i})$$

і описується через її показники наступною залежністю, у якій шляхом перетворень виділені за часом доданки: постійна, змінного знака й постійного знака,

$$\begin{aligned} w_{TC} = \frac{I_m^2}{4\omega} & \left\{ 2\omega(L_{np} - M_{np}) + \frac{n_A + n_B}{\omega C_{КП}} + \sum_{i=1}^{N_3} \frac{\omega^2 M_i^2 X_{\varnothing i} \xi_{\varnothing i}}{(R_{нз,i} + R_{\varnothing i})^2 + X_{\varnothing i}^2 \xi_{\varnothing i}^2} + \right. \\ & + \left[2\omega(L_{np} - M_{np}) - \frac{n_A + n_B}{\omega C_{КП}} - \sum_{i=1}^{N_3} \frac{\omega^2 M_i^2 X_{\varnothing i} \xi_{\varnothing i}}{(R_{нз,i} + R_{\varnothing i})^2 + X_{\varnothing i}^2 \xi_{\varnothing i}^2} \right] \cdot \cos 2(\omega t - \varphi) - \\ & \left. - \left[R_L + \sum_{i=1}^{N_3} \frac{\omega^2 M_i^2 (R_{нз,i} + R_{\varnothing i})}{(R_{нз,i} + R_{\varnothing i})^2 + X_{\varnothing i}^2 \xi_{\varnothing i}^2} \right] \cdot \sin 2(\omega t - \varphi) + 2 \left[R_L + \sum_{i=1}^{N_3} \frac{\omega^2 M_i^2 (R_{нз,i} + R_{\varnothing i})}{(R_{нз,i} + R_{\varnothing i})^2 + X_{\varnothing i}^2 \xi_{\varnothing i}^2} \right] \cdot \omega t \right\} \end{aligned} \quad (5.9)$$

або в чисельній оцінці

$$w_{TC} = 116,285 - 1,164 \cos 2(\omega t - \varphi) - 2,255 \sin 2(\omega t - \varphi) + 1,147 \cdot 10^5 t, \text{ Вас.}$$

Енергії, що складають, в останнім рівнянні представлені відповідно складовим елементам тягової мережі й електроспоживачім. Тому по них

можна проаналізувати вагомість кожної складової енергії від параметрів режиму.

Для наочності, по фізичному змісті складові вираження, виконаємо його перетворення, використовуючи наступні припущення:

- думаємо конструкцію тягової лінії незмінної

$$2(L_{np} - M_{np}) = L_{TC,0} \ell,$$

де ℓ - довжина двофазної лінії; $L_{TC,0}$ - питома індуктивність тягової лінії;

- урахуємо компенсаційні пункти по обох проводах тягової лінії з їхнім рівномірним розміщенням і однаковою ємністю $C_{КП}$ в кожному місці їхньої установки

$$n_A + n_B = n_{КП}.$$

Тоді вираження (5.9) можна представити у вигляді

$$w_{TC} = A + B_1 \cos 2(\omega t - \varphi) - B_2 \sin 2(\omega t - \varphi) + D \cdot t, \quad (5.10)$$

де

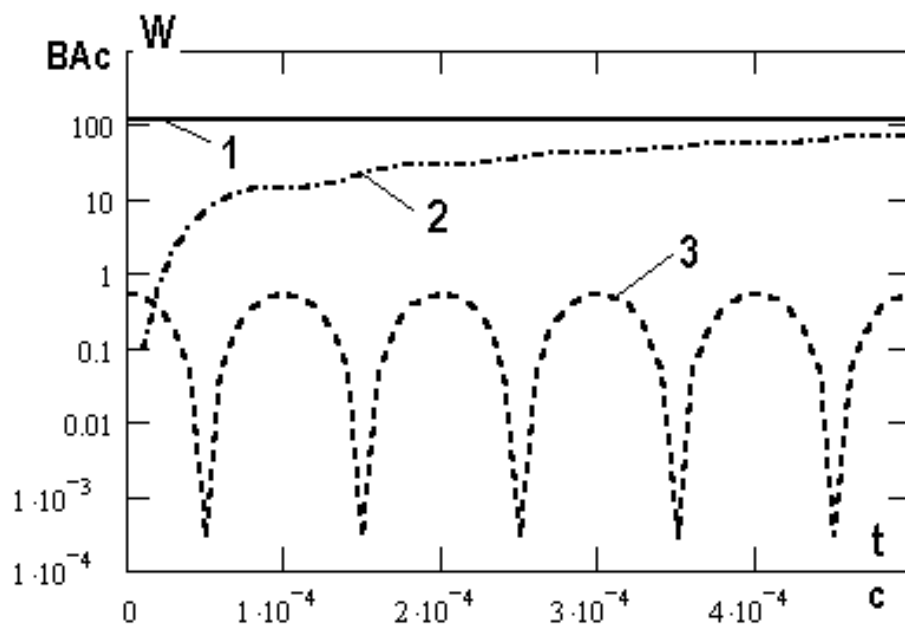
$$A = \frac{I_m^2}{4\omega} \left[\omega L_{TC,0} \ell + \frac{n_{TC}}{\omega C_{КП}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{Э}}} k_{\Pi, \text{Э-Л}, i} X_{\text{Э}i} \xi_{\text{Э}i} \right];$$

$$B_1 = \frac{I_m^2}{4\omega} \left[\omega L_{TC,0} \ell - \frac{n_{TC}}{\omega C_{КП}} - \sum_{i=1}^{N_{\text{Э}}} k_{\Pi, \text{Э-Л}, i} X_{\text{Э}i} \xi_{\text{Э}i} \right];$$

$$B_2 = \frac{I_m^2}{4\omega} \left[R_{\text{Л}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{Э}}} k_{\Pi, \text{Э-Л}, i} (R_{\text{не}, i} + R_{\text{Э}i}) \right];$$

$$D = \frac{I_m^2}{2} \left[R_{\text{Л}} + \sum_{i=1}^{N_{\text{Э}}} k_{\Pi, \text{Э-Л}, i} (R_{\text{не}, i} + R_{\text{Э}i}) \right].$$

Чисельний аналіз доданків отриманого вираження для енергії, що поставляє в систему електропостачання пересувних споживачів, наведений на рисунки 5.1 і рисунки 5.3. Обмінна складова енергії між тяговою мережею й пересувним електроспоживачем (див. рис 5.3, крива 3) по амплітуді незначна.



- 1 – зарядна енергія тягової мережі;
 2 – складова енергії, що витрачає на нагрівання провідників і передана пересувному споживачеві;
 3 – обмінна енергія між тяговою мережею й пересувним електроспоживачем.

Рисунок 5.3 – Складові енергії, що надходить від джерела системи електропостачання

Основний енергетичний потік визначається (рис 5.3, відповідно, криві 1 і 2) вираженням

$$w_{TC} = A + D \cdot t. \quad (5.11)$$

Тут істотний рівень зарядної енергії в системі електропостачання (складова A) необхідно враховувати в аналізі аварійних режимів роботи. В аварійних ситуаціях тягова мережа за рахунок зарядної енергії може підживляти місце ушкодження.

5.5 Методика виконання розрахунку параметрів вузла "тягова мережа - енергоприймач" при передачі енергії на електроспоживач

Існуюча методика розрахунку параметрів вузла "тягова мережа - енергоприймач" [12] ґрунтується на послідовному виборі значень

параметрів, виходячи з деяких допущень для спрощення розрахунку. Коефіцієнт корисної дії вузла передачі енергії визначається на заключному етапі після остаточного розрахунку значень параметрів і розмір його звичайно далекий від оптимального. У роботі [12] отримані графічні співвідношення (рис. 5.4) між параметрами вузла, виконання яких забезпечує максимальне значення к.к. д. Ці співвідношення використані при розробці справжньої методики розрахунку. Передбачається, що у відкаточному виробленні (розглядаються умови вугільних шахт, небезпечних по газі й пилу) працює один електровоз.

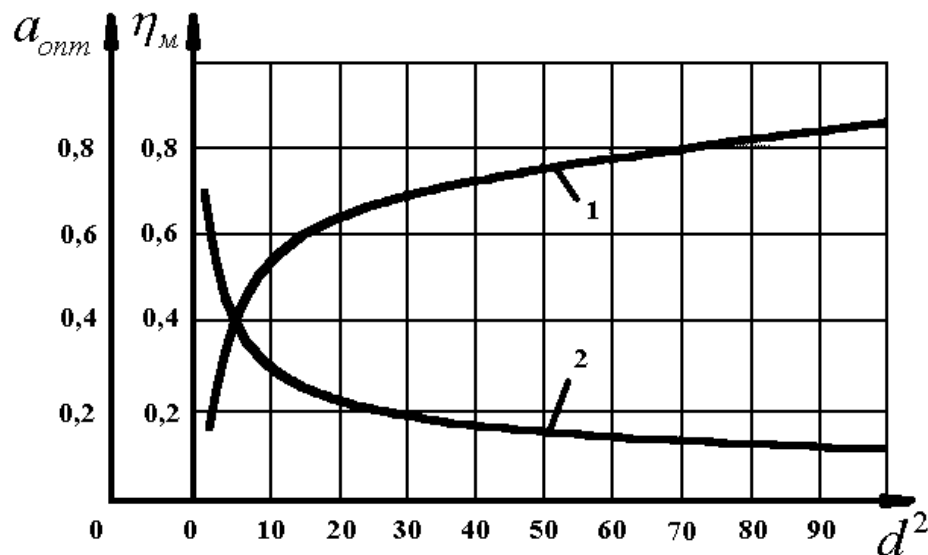


Рисунок 5.4 – Графічні співвідношення між параметрами вузла, виконання яких забезпечує максимальне значення к.к. д.

За результатами тягового розрахунку вибирають для приводу електровоза електродвигуни, звичайно це два двигуни постійного струму з послідовним порушенням (номінальна потужність одного двигуна - P_n , номінальна напруга - U_n , годинний струм - $I_{д.ч.}$).

Розрахунок параметрів вузла "тягова мережа - енергоприймач" виконується для найбільш напруженого режиму роботи - годинного. У цьому режимі необхідно забезпечити максимальне значення к.к.д. системи електропостачання. Передбачається, що в контурах тягової мережі й енергоприемника забезпечений стан резонансу напруг.

Вибирають елементи системи електропостачання електровоза - силовий випрямляч, фільтр і пристрій керування, орієнтуючись на напругу U_n й струм $I_{д.ч.}$. Визначають для годинного режиму роботи спадання напруги ΔU_c . Необхідне значення напруги на виході обмотки енергоприймача (діюче значення) у годинному режимі роботи

$$U_3 = (U_0 + \Delta U_c) / \sqrt{2},$$

де $U_0 = k_1 U_n$ - напруга на обмотках двигунів у годинному режимі роботи; рекомендується $k_1 \geq 0,85$.

Е.р.с. обмотки енергоприймача

$$E_3 = U_3 + \Delta U_3, \quad (5.12)$$

де $\Delta U_3 = I_3 R_3$ - спадання напруги на активному опорі контуру R_3 обмотки в годинному режимі роботи; I_3 - струм обмотки в годинному режимі.

По кривих (рис. 5.4) для необхідного значення к.к.д. вибирають значення a_{opt} - оптимального коефіцієнта навантаження й d^2 - квадрата добротності вузла "тягова мережа - енергоприймач".

З огляду на, що

$$a_{opt} = \frac{R_3}{R'_n} = \frac{I_3 R_3}{I_3 R'_n} = \frac{\Delta U_3}{U_3},$$

де R'_n - наведене до виходу обмотки енергоприймача опір навантаження в годинному режимі роботи, одержимо

$$\Delta U_3 = a_{opt} U_3. \quad (5.13)$$

Запишемо співвідношення (5.12) з обліком (5.13)

$$E_3 = U_3 (1 + a_{opt}).$$

При обраній величині е.р.с. E_3 напруга на обмотках двигунів у режимі холостого ходу буде

$$U_{д.х.х.} = \sqrt{2} (E_3 - \Delta U_{с.х.х.} - \Delta U_{3.х.х.}) = \sqrt{2} [E_3 - k_2 (\Delta U_{с.х.х.} + \Delta U_{3.х.х.})],$$

де $k_2 = 0,1$ з обліком того, що струм холостого ходу становить приблизно $0,1 I_{д.ч.}$.

Якщо напруга $U_{\text{д.х.х.}}$ перевищує U_n в межах припустимого за умовами комутації, то залишають знайдене значення E_3 . У протилежному випадку приймають менше значення $a_{\text{онм}}$ або передбачають інший спосіб зменшення $U_{\text{д.х.х.}}$.

Визначають потужність, споживану двигунами електровоза в годинному режимі роботи

$$P_{\text{д.ч.}} = 2I_{\text{д.ч.}} \cdot U_{\text{д.}}$$

Розраховують активну потужність ΔP_c , споживану елементами системи електропостачання в годинному режимі роботи, у тому числі й потужність власних потреб.

Знаходять активну потужність, яку необхідно одержати на виході обмотки енергоприймача

$$P_3 = P_{\text{д.ч.}} + \Delta P_c.$$

Годинний струм обмотки енергоприймача в режимі резонансу напруг

$$I_3 = \frac{P_3}{U_3}.$$

Еквівалентний опір навантаження, наведене до виходу обмотки енергоприймача

$$R'_n = \frac{U_3}{I_3}.$$

Далі визначають к.к.д. контуру з енергоприймача

$$\eta_3 = \frac{P_3}{P_3 + \Delta P_3} = \frac{I_3 R'_n}{I_3 R'_n + I_3 R_3} = \frac{R'_n}{R'_n + R_3} = \frac{1}{1 + a_{\text{онм}}}.$$

де $\Delta P_3 = I_3 R_3$ - втрати потужності в контурі енергоприймача.

Активна потужність на вході енергоприймача, одержувана з контуру тягової мережі,

$$P_{\text{з.вх.}} = P_3 + \Delta P_3 = \frac{P_3}{\eta_3}.$$

Запишемо співвідношення для d^2 [12]

$$d^2 = \frac{(\omega M)^2}{R_l R_s}, \quad (5.14)$$

де ω - кругова частота струму тягової мережі; M - взаємна індуктивність мережі й обмотки енергоприймача на ділянці їхнього зближення; R_l - активний опір контуру тягової мережі.

Представивши

$$M = M_0 l w_s,$$

де M_0 - питома взаємноіндуктивність; l - довжина магнітопроводу енергоприймача; w_s - число витків обмотки енергоприймача;

$$R_l = k_l \rho \frac{2l_l}{S_l},$$

k_l - коефіцієнт, що враховує витиснення струму в кабелі лінії, вплив сторонніх провідних контурів і втрати в конденсаторах, що компенсують; ρ - питомий опір; S_l , l_l - поперечний переріз кабелю й довжина лінії відповідно;

$$R_s = k_s \rho \frac{l_s}{S_s},$$

k_s - коефіцієнт, аналогічний k_l , але враховуючий ще й магнітні втрати; S_s , l_s - поперечний переріз і довжина кабелю обмотки енергоприймача відповідно.

Після підстановки M , R_l , R_s в (5.14) і перетворень одержують

$$M_0 = \frac{4d^2 k_l (k_l j_l) (k_s j_s) \rho^2 l_l}{2\pi f P_{\text{вх}}}, \quad (5.15)$$

де k_l - коефіцієнт, що враховує довжину лобових частин обмотки; j_l , j_s - щільності струму в кабелі тягової лінії й обмотці енергоприймача.

Прийнявши значення f , наприклад, 5000 Гц і орієнтовно: $k_l=1,1$; $(k_l j_l) = A(k_s j_s) = B$, де A , B - певні числа, прийняті виходячи з досвіду експлуатації подібних систем, транспорту для конкретної довжини лінії l_l , визначають значення M_0 по (5.15).

Далі, використовуючи результати розрахунків M_0 для різних конструкцій енергоприймача і тягових мереж [13] приймають для конкретних умов відкочування конструкції, що забезпечують орієнтовно необхідне значення M_0 . Вибором розмірів полюсних наконечників магнітопроводу енергоприймача, їхньої форми, відстані між тяговою мережею й енергоприймача досягають необхідного значення M_0 .

Запишемо співвідношення для a_{omn} у вигляді

$$a_{omn} = \frac{R_3}{R_n'} = \frac{k_3 \rho l_3 I_s}{U_3 S_3} = \frac{k_3 \rho 2k_1 w_3 j_3}{U_3},$$

звідки знайдемо необхідне число витків обмотки енергоприймача

$$w_3 = \frac{a_{omn} U_3}{2k_1 \rho (k_3 j_3)} = \frac{a_{omn} U_3}{2k_1 \rho B}.$$

Перетин кабелю обмотки енергоприймача $S_3 = I_3 / j_3$. Довжина кабелю обмотки визначається по формулі

$$l_3 = 2k_1 l w_3$$

і уточнюється по конструктивних розмірах магнітопроводі. Активний опір обмотки енергоприймача без обліку витиснення струму й ефекту близькості

$$R_{30} = \rho \frac{l_3}{S_3}.$$

Далі розраховують значення коефіцієнта k_3 по формулі

$$k_{3p} = \frac{k_{\epsilon_1} R_{30} + \sum R_{\text{вн.з}}}{R_{30}} = k_{\epsilon_1} + \frac{\sum R_{\text{вн.з}}}{R_{30}},$$

де k_{ϵ_1} - коефіцієнт, що враховує збільшення активного опору за рахунок витиснення струму й ефекту близькості; $\sum R_{\text{вн.з}}$ - сума внесених у контур опорів [14]. Визначають розрахункове значення $A_p = k_3 j_3$. Якщо воно відрізняється від прийнятого спочатку з більш, ніж на 10 % у більшу сторону, то вибором іншого типу конденсаторів, що компенсують, іншої конструкції екрана, матеріалу магнітопроводу забезпечують прийняте значення A або вибирають нові значення щільності струму в обмотці зі співвідношення

$$j_{\text{эп}} = \frac{A}{k_{\text{эп}}}.$$

Струм тягової лінії

$$I_{\text{л}} = \frac{E_{\text{э}}}{\omega M_0 l w_{\text{э}}}.$$

Орієнтовно поперечний переріз кабелю тягової мережі

$$S_{\text{л}} = \frac{I_{\text{л}}}{j_{\text{л}}}.$$

Вибирають перетин і конструкцію високочастотного кабелю; розраховують значення коефіцієнта витиснення $k_{\text{е}}$.

Обчислюють значення коефіцієнта для мережі по формулі

$$k_{\text{лп}} = k_{\text{е2}} + \frac{I_{\text{л}} \sum R_{\text{вн.л}}}{\rho l_{\text{л}} j_{\text{л}}},$$

де \sum - сума внесених у мережу активних опорів [14].

Розрахункове значення коефіцієнта

$$A_{\text{п}} = j_{\text{л}} \cdot k_{\text{лп}}.$$

У випадку відмінності $A_{\text{п}}$ від прийнятого A на початку розрахунку, знаходять нове значення щільності струму $j_{\text{лп}} = \frac{A}{k_{\text{лп}}}$, і методом послідовних наближень забезпечують виконання співвідношення $A = k_{\text{лп}} j_{\text{лп}}$. Остаточню вибирають перетин кабелю мережі

$$S_{\text{лп}} = \frac{I_{\text{л}}}{j_{\text{лп}}}.$$

Активний опір тягової мережі без обліку витиснення струму

$$R_{\text{л0}} = \rho \frac{l_{\text{л}}}{S_{\text{лп}}}$$

і активний опір контуру тягової мережі

Визначають втрати потужності в контурі тягової мережі

$$\Delta P_{\text{л}} = I_{\text{л}}^2 R_{\text{л}}.$$

Знаходять активний опір, внесене в контур тягової мережі з боку енергоприймача, при роботі електровоза в годинному режимі

$$R_{ен} = \frac{P_{э.вх}}{I_l^2}.$$

Розраховують напруга на вході тягової мережі (на виході перетворювача частоти) у режимі резонансу напруг

$$U_l = I_l (R_l + R_{ен}).$$

Активна потужність на вході тягової мережі в годинному режимі роботи $P_l = U_l I_l$.

Розрахункове значення коефіцієнта корисної дії вузла "тягова мережа - енергоприймач"

$$\eta_{л.э.р} = 1 - \frac{\Delta P_{э} + \Delta P_l}{P_l}.$$

Орієнтовно обсяг провідникової міді для виготовлення тягової мережі $V_{м_л} = 2S_l I_l$, для обмотки енергоприймача $V_{м_э} = S_э I_э$.

Останні відносини не враховують витрату провідників на відведення до конденсаторів, що компенсують.

По викладеній вище методиці виконаний розрахунок параметрів вузла "тягова мережа - енергоприймач" для умов існуючої системи відкочування з індуктивною передачею енергії на електровоза.

Вихідні дані: на електровоз установлені два двигуни постійного струму типу ДРТ номінальною потужністю 23,5 кВт, номінальною напругою 185 В, годинним струмом 148 А; довжина тягової лінії 3500 м.

У таблиці 5.1 наведені результати розрахунку для годинного режиму роботи. Там же наведені параметри вузла "тягова мережа - енергоприймач" існуючої системи відкочування.

Порівняльний аналіз наведених у таблиці 5.1 значень параметрів дає підставу зробити висновок про ефективність розробленої методики. При цьому поряд зі збільшенням к.к.д. спостерігається помітне зменшення витрати провідникових матеріалів.

Таблиця 5.1 - Параметри вузла «тягова мережа - енергоприймач»

№	Параметри	Існуюча система відкатки	Результати розрахунку по методиці
1	Конструкція енергоприймача	Відкритий магнітопровід з двох коритообразних профілів	Відкритий магнітопровід з двох коритообразних профілів з полюсними наконечниками
2	Конструкція тягової мережі	Двохпровідна, кабель круглого перетину	Двохпровідна, кабель плоский у вигляді стрічки
3	Питома взаємноіндуктивність тягової лінії і обмотки енергоприймача, μ_0 , 10^{-6} Гн/м	1,0	2,3
4	Е.р.с., що наводиться в обмотці енергоприймача, E_3 , В	216	170,6
5	Число витків обмотки енергоприймача, w_3	9	12
6	Струм обмотки енергоприймача, I_3 , А	329	407
7	Активний опір контура енергоприймача, R_3 , Ом	0,15	0,067
8	Поперечний перетин кабелю обмотки енергоприймача, S_3 , мм ²	130	162
9	Втрати потужності в контурі обмотки енергоприймача, ΔP_3 , кВт	16,2	11,9
10	Еквівалентний опір навантаження, R_n' , Ом	0,507	0,35
11	Струм тягової мережі, I_d , А	150	40,6
12	Активний опір контура тягової мережі, R_d , Ом	2,52	9,1
13	Поперечное сечение кабеля тяговой линии, S_d , мм ²	95	22
14	Втрати потужності в контурі тягової мережі, ΔP_d , кВт	56,7	16,2
15	Активний опір, що вноситься в контур тягової мережі, $R_{вн}$, Ом	3,16	41,9
16	Напруга на вході тягової мережі, U_d , В	852	2100
17	Активна потужність, що поступає в мережу, P_d , кВт	127,8	85,3
18	К.к.д. вузла «тягова мережа - енергоприймач», $\eta_{л.э}$	0,43	0,67
19	Витрата провідникових матеріалів в лінії, $V_{м.л.}$, м ²	0,57	0,128
20	Витрата провідникових матеріалів для обмотки енергоприймача, $V_{м.э.}$, 10^{-2} м ²	1,43	2,1
21	Сумарна витрата провідникових матеріалів, V_m , м ²	0,584	0,149

6 ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ КОМПЛЕКСУ І ЕЛЕКТРОВОЗА ПРИ ЗАСТОСУВАННІ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ КІНЕТИЧНОГО АКУМУЛЯТОРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

6.1 Використання накопичувачів енергії в шахтному електровозному транспорті

В шахтах, небезпечних за газом та пилом, мають перспективу використання електровози з безконтактним живленням від високочастотної тягової лінії та електровози з механічними (інерційними), електромеханічними та ємнісними накопичувачами енергії. Більш того, накопичувачі енергії бажано застосовувати у електровозах з безконтактним живленням, що дозволить використати енергію гальмування потягу.

Застосування енергії накопичувача дозволить виконувати електровозу деяку роботу (наприклад, маневри) у тих місцях транспортної виробки, куди важко або неможливо протягти кабелі тягової лінії (наприклад, біля ствольний двір). Використання ємнісних накопичувачів енергії порівняно малої потужності дозволяє спростити схеми електропостачання електровозів та підвищити коефіцієнт корисної дії системи транспорту (наприклад, у випадку живлення тягової лінії імпульсами струму, при виконанні тягової мережі у вигляді окремих послідовно з'єднаних котушок і т.п.).

6.2 Енергетичні можливості механічного (інерційного) накопичувача

Для транспортних засобів раціонально використовувати механічні накопичувачі енергії обертового руху – інерційні накопичувачі (маховики) у вигляді дисків, циліндрів, ободів тощо. Запасаєма при русі кінетична енергія $W = J \cdot \omega^2 / 2$, де J - момент інерції маховика відносно вісі обертання; $\omega = 2 \cdot \pi \cdot n$ – кутова швидкість (n – частота обертання маховика). Якщо дисковий маховик має радіус r і масу $M = \gamma \cdot V$, (V - об'єм, γ - густина матеріалу), то

$J = M \cdot r^2 / 2 = \gamma \cdot V \cdot r^2 / 2$ і $W = \pi^2 \cdot M \cdot r^2 \cdot n^2$, або $W = \pi^2 \cdot \gamma \cdot V \cdot r^2 \cdot n^2$. Відповідно, питома енергія (на одиницю маси та об'єму): $W_M = \pi^2 \cdot r^2 \cdot n^2$, Дж/кг і $W_V = \pi^2 \cdot \gamma \cdot r^2 \cdot n^2$, Дж/м³. Допустиме значення n при заданому розмірі r обмежується лінійною коловою швидкістю $U = \omega \cdot r = 2 \cdot \pi \cdot n \cdot r$, яка, у свою чергу, залежить від допустимої розривної напруги матеріалу σ_p . У залежності від геометричної форми металевих маховиків допустимі колові швидкості для них складають від 200 до 500 м/с.

Для маховика у вигляді тонкого ободу допустима гранична колова швидкість $U = \sqrt{\sigma_p / \gamma}$, отже, максимальна запасемо ним енергія $W = 0,5 \cdot M \cdot U^2 = 0,5 \cdot M \cdot \sigma_p / \gamma$. Питома енергія $W_M = W / M = 0,5 \cdot \sigma_p / \gamma$. Узагальнюючи для різних за формою механічних накопичувачів, запишемо $W_M = K_\phi \cdot \sigma_p / \gamma$, де K_ϕ - коефіцієнт форми маховика. В таблиці 6.1 наведені значення K_ϕ , відповідні різним конструкціям маховиків на основі даних [15,16].

Таблиця 6.1 - Коефіцієнти форми K_ϕ для різних маховиків дискового та ободового типів

1.	Диск незмінної товщини з малим отвором у центральній зоні	0,3
2.	Тонкий обід	0,5
3.	Диск з ободом	0,3 – 0,5
4.	Диск незмінної товщини без центрального (осьового) отвору	0,6
5.	Конічний та гіперболічні диски без осьового отвору	0,8
6.	Диск рівної міцності	~1,0

Із наведених вище співвідношень слідує прямопропорційна залежність рівня питомої енергії маховиків від допустимої механічної напруги на розлив σ_p їх матеріалу.

З метою оцінки граничних значень W_M в таблиці 6.2 наведено характерні механічні параметри кращих сортів металевих (масивних) матеріалів, перспективних для виготовлення маховиків.

Таблиця 6.2 - Механічні властивості металевих матеріалів для виготовлення маховиків

Параметр	Леговані сталі	Титанові сплави (BT)	Алюмінієві сплави (B95)	Магнієві сплави (MA)
Густина γ , $кг/м^3$	7960	4600	2800	1850
Коефіцієнт Пуасона ν	0,24-0,28	0,3-0,31	0,32-0,36	0,31-0,34
Модуль потужності E , $Н/м^2$	$(2-2,2) \cdot 10^{11}$	$(1,15-1,2) \cdot 10^{11}$	$7,2 \cdot 10^{10}$	$3,5 \cdot 10^{10}$
Границя міцності σ_p , $Н/м^2$	$(8-13) 10^8$	$(8-14) 10^8$	$(2-5) 10^8$	$(2-5) 10^8$
Допустима механічна напруга σ_p , $Н/м^2$	$(2-4) 10^8$	$(2-4) 10^8$	$(0,5-2) 10^8$	$(0,5-2) 10^8$
Найбільше значення відношення σ_p/γ , $Дж/кг$	$1,65 10^5$	$3 10^5$	$1,8 10^5$	$2,7 10^5$

У розрахунках маховиків звичайно приймають коефіцієнт запасу міцності $K_3 = \frac{\sigma_6}{\sigma_p} \geq 2 \div 4$.

Граничне значення запасаної кінетичної енергії одиничним маховиком визначається конструктивно-технологічними обмеженнями по масі та габаритам. Наприклад, при виконанні маховика без центрального отвору можлива його надійна робота з частотою обертання 3000 *об/хв* при діаметрі до 2,0 м. Реально досягнутий рівень запасаної енергії у механічному накопичувачі з горизонтальним валом склав 36 *МДж*. У конструкціях з вертикальним валом можливий рівень запасаної енергії (10^3 - 10^4) *МДж*.

6.3 Загальні співвідношення для інерційних накопичувачів енергії

Основним функціональним елементом вказаних накопичувачів є обертовий маховик. Рівняння руху маховика, слухне в режимах заряду (розкручування) та розряду (гальмування) накопичувача, має вид

$$M_{36} = J \frac{d\omega}{dt} + M_T. \quad (6.1)$$

У рівнянні (6.1) зовнішній момент $M_{зв}$ є активним (рухомим) моментом при заряді або реактивним (гальмівним) моментом при розряді накопичувача. Динамічний момент $M_{дин} = J \frac{d\omega}{dt}$ має знак (напрямок дії), що визначається кутовим прискоренням $\varepsilon = \frac{\partial\omega}{\partial t}$. Момент тертя $M_T = M_{T_a} + M_{T_n}$ складається з моментів аеродинамічного тертя (M_{T_a}) і тертя в підшипникових опорах та ущільненнях (M_{T_n}). Помножимо обидві частини співвідношення (6.1) на ωdt і після інтегрування одержимо рівняння балансу енергії у накопичувачі.

$$J \frac{\omega_1^2 - \omega_2^2}{2} + \int_{t_1}^{t_2} \omega \cdot M_{T_a} dt + \int_{t_1}^{t_2} \omega \cdot M_{T_n} dt = \int_{t_1}^{t_2} \omega \cdot M_{зв} dt, \quad (6.2)$$

де ω_1, ω_2 - початкова та кінцева кутові швидкості; t_1, t_2 - відповідні значення часу.

Із (6.2) слідує, що, наприклад, в режимі розряду кінетична енергія $W_K = 0,5 \cdot J \cdot (\omega_1^2 - \omega_2^2)$ втрачається на здійснення корисної роботи

$$W = \int_{t_1}^{t_2} \omega \cdot M_{зв} dt \quad (6.3)$$

та компенсацію втрат енергії та тертя

$$W_T = \int_{t_1}^{t_2} \omega \cdot M_{T_a} dt + \int_{t_1}^{t_2} \omega \cdot M_{T_n} dt. \quad (6.4)$$

Для збільшення ефективності роботи інерційних накопичувачів треба забезпечити найбільш можливий рівень початкової кінетичної енергії $W_{K_1} = J \cdot \omega_1^2 / 2$ та звести до мінімуму втрати W_T допомогою відповідних конструктивних рішень.

Вважаючи, що момент тертя M_{T_n} є незмінним в часі, запишемо співвідношення для енергії втрат на тертя в розрахунку на пару підшипників

$$M_{T_n} = M_{T_n} \int_{t_1}^{t_2} \omega(t) dt = \varphi_c \cdot M_{T_n}, \quad (6.5)$$

де φ_c - сумарний кут повороту маховика за час $\Delta t = t_2 - t_1$.

Момент тертя (для пари підшипників)

$$M_{T_n} = 0,5 \cdot g \cdot m \cdot f_{T_n} \cdot d_e, \quad (6.6)$$

де f_{T_n} - коефіцієнт тертя у підшипнику; d_e - діаметр валу в опорі; m - маса маховика; g - $9,81 \text{ м/с}^2$.

Для опор кочення $f_{T_n}=0,001-0,004$, для опор ковзання $f_{T_n}=0,015-0,02$ в залежності від якості підшипників. При заданій кутовій швидкості ω потужність втрат у двох підшипниках

$$P_{T_n} = \omega \cdot M_{T_n} = 2\pi \cdot n \cdot M_{T_n}. \quad (6.7)$$

Із наведених співвідношень слідує, що для зменшення втрат потужності на тертя треба зменшувати масу маховика та коефіцієнт тертя у підшипниках. Досягти вказаного можна за допомогою магнітного підвішування ротора.

Момент втрат від аеродинамічного тертя циліндричного маховика у кожусі $M_{T_a} = M_{T_u} + M_{T_o}$ складається з моменту M_{T_u} , який діє на циліндричну поверхню шириною L , та моменту M_{T_o} на двох дискових (торцевих) поверхнях діаметром $D = 2R$. Відповідні потужності втрат P_{T_u} та P_{T_o} [17] у випадку турбулентної течії газу (повітря).

$$\begin{aligned} P_{T_u} &= 2\pi \cdot n \cdot M_{T_u} = 0,458B^4 \cdot L \cdot n^3; \\ P_{T_o} &= 2\pi \cdot n \cdot M_{T_o} = 3,82 \cdot 10^2 \cdot C_M \cdot \gamma_a \cdot D^5 \cdot L \cdot n^3, \end{aligned} \quad (6.8)$$

де $C_M = 0,0277 \cdot \text{Re}_o^{-0,2} \cdot (\delta_T/R)^{-0,2}$ - коефіцієнт моменту аеродинамічного опору; $\text{Re}_o = \omega \cdot R^2 / \nu_a$ - дискове число Рейнольдса; δ_T - торцевий (по радіусу) проміжок між маховиком та кожухом; γ_a, ν_a - густина та кінематична в'язкість середовища, що оточує обертовий маховик.

Для зменшення аеродинамічних втрат потужності при обертанні маховика згідно (6.8) доцільно створювати спеціальне середовище всередині кожуха. Так, наприклад, густина повітря $\gamma_a=1,29 \text{ кг/м}^3$, а густина водню $\gamma_a=0,0899 \text{ кг/м}^3$, гелію $\gamma_a=0,178 \text{ кг/м}^3$. Ефективно також зменшення тиску у внутрішній порожнині (вакуумування кожуха). Рациональний розмір δ_T проміжка між маховиком та кожухом залежить від товщини примежового шару

газа, на внутрішній поверхні кожуха. Орієнтовно можна приймати $\delta_T \approx (0,01-0,03) \cdot D$.

Конче потрібна ретельна обробка поверхонь маховика і кожуха та надання маховику аеродинамічно обтічної форми.

Виходячи з балансу енергії (6.2) коефіцієнт корисної дії (ККД) заряду (розкручування маховика) інерційного накопичувача

$$\eta_z = \frac{W_K}{W_K + W_T}, \quad (6.9)$$

а ККД розряду

$$\eta_p = 1 - \frac{W_T}{W_K}. \quad (6.10)$$

Якщо маховик обертається у повітряному середовищі нормального тиску і встановлений у звичайні опори кочення або ковзання, то досягти високих значень ККД неможливо ($\eta_z, \eta_p \approx 0,7$).

6.4 Зарядка інерційного накопичувача енергії

Вважаючи наближено момент тертя M_T в накопичувачі як момент в'язкого тертя, тобто $M_T = K_M \cdot \omega$, де K_M - механічний опір, запишемо рівняння руху маховика у виді

$$M_{зв} = M_{дин} + K_M \cdot \omega. \quad (6.11)$$

Бажано забезпечити заряд накопичувача в режимі постійного кутового прискорення, тобто при $M_{дин} = const$. Тоді, при умові нульової початкової кутової швидкості $\omega(0) = 0$ мають місце такі співвідношення:

$$\begin{aligned} \omega(t) &= M_{дин} \cdot t / J; \\ M_{зв}(t) &= M_{дин} \left[1 + \frac{t}{\tau_M} \right]; \\ \tau_M &= \frac{J}{K_M}. \end{aligned} \quad (6.12)$$

По закінченні процесу заряду тривалістю t_3 кутова швидкість маховика досягне значення $\omega(t_3) = \omega_3$, тоді із () слідує

$$\begin{aligned}\omega(t) &= \frac{\omega_3 \cdot t}{t_3}; & M_{зв}(t) &= M_{Тз} \frac{\tau_M + t}{t_3}; \\ M_{дин} &= \frac{J \cdot \omega_3}{t_3}; & M_{Ез} &= K_M \cdot \omega_3.\end{aligned}\tag{6.13}$$

Витрати енергії внаслідок тертя

$$W_T = \int_0^{t_3} K_M \cdot \omega^2(t) dt = K_M \cdot \omega_3^3 \cdot \frac{t_3}{3} = \frac{1}{3} \cdot M_{Тз} \cdot \omega_3 \cdot t_3.\tag{6.14}$$

6.5 Аналіз відомих конструкцій інерційних накопичувачів енергії у транспортних засобах

Інерційні накопичувачі енергії відрізняються від одного формою маховиків конструкцією двигунів, які розкручують маховик (це в основному, електродвигуни) та схемами управління процесами заряду та розряду. За формою маховики розрізняють на: 1) дискові незмінної товщини з отвором у середній частині і без нього; 2) у вигляді тонкого обіду; 3) дискові з обідом; 4) у вигляді конічних та гіперболічних дисків без центрального отвору; 5) дискові рівної міцності; 6) стрижневі рівної міцності.

Найбільш прості за конструкцією - це дискові та ободові маховики найбільш ефективний – диск рівної міцності.

Електричні двигуни, які використовують в інерційних накопичувачах енергії – це машини постійного струму, асинхронні, синхронні та вентильні. Бажано, щоб двигун забезпечував легкий перехід у генераторний режим для здійснення рекуперації енергії при гальмуванні транспортного засобу.

Двигуни постійного струму забезпечують просте керування процесом заряду накопичувача, досягнення значних кутових швидкостей, які врешті обмежуються можливим іскренням на колекторі. З іншого боку, такі двигуни мають складну конструкцію, значну масу та малу надійність в роботі.

Синхронні двигуни живляться трифазним змінним струмом, що спрощує схему електропостачання, легко забезпечують режим рекуперації енергії, але мають складну конструкцію і вимагають використання перетворювачів напруги змінної частини для розгону маховика. Маса

накопичувача з синхронним двигуном перевищує масу накопичувача з двигуном постійного струму в 1,35 рази [18].

Асинхронні двигуни також живляться трифазним змінним струмом, мають просту конструкцію та надійні в роботі. Однак, при живленні струмом частоти 50 Гц гранична кутова швидкість ротора не перевищує 3000 об/хв що утруднює накопичення кінетичної енергії достатнього рівня без використання редуктора. Крім того, у звичайних асинхронних двигунах практично неможливо забезпечити режим рекуперації енергії. Маса накопичувача з асинхронним двигуном складає 58% маси накопичувача з двигуном постійного струму при однаковому рівні енергії [18].

Вентильні двигуни-генератори будують звичайно, на базі синхронних машин. Вони забезпечують будь-яку частоту обертання ротора незалежно від частоти напруги живлення. Схема живлення двигуна-генератора включає інвертор, який забезпечує частотно-струмове керування електричною машиною в період заряду та випрямлення змінного струму при розряді накопичувача. Недоліками є складна схема керування та складна конструкція синхронної машини. Маса вентильного приводу складає 40-50% від маси приводу з двигуном постійного струму [18].

Наведемо конкретні приклади. Фірма «Гаррет» США [17] розробила для транспортного засобу комбіноване джерело живлення у вигляді інерційного механічного накопичувача енергії (МН) та хімічної акумуляторної батареї АБ (рис. 6.1). На вісь ведучих коліс ВВК транспортного засобу обертовий момент передається за допомогою блока трансмісії БТ, до якої енергія підводиться від валів маховика МН та електричних машин EM_1 і EM_2 , сполучених механічно з ланками планетарної передачі всередині БТ. Електричні машини постійного струму і кожна з них може працювати як двигун, або як генератор. Напрямок потоку енергії (від АБ до МН і навпаки) регулюється блоком керування БК, який реагує на сигнали від педалей транспортного засобу: акселератора ПА та гальма ПГ в залежності від режиму руху транспорту. Наприклад, при

гальмуванні коліс K , перемиканням БТ за допомогою БК переводять EM_1 і EM_2 у генераторний режим; отримана енергія використовується для заряду АБ.

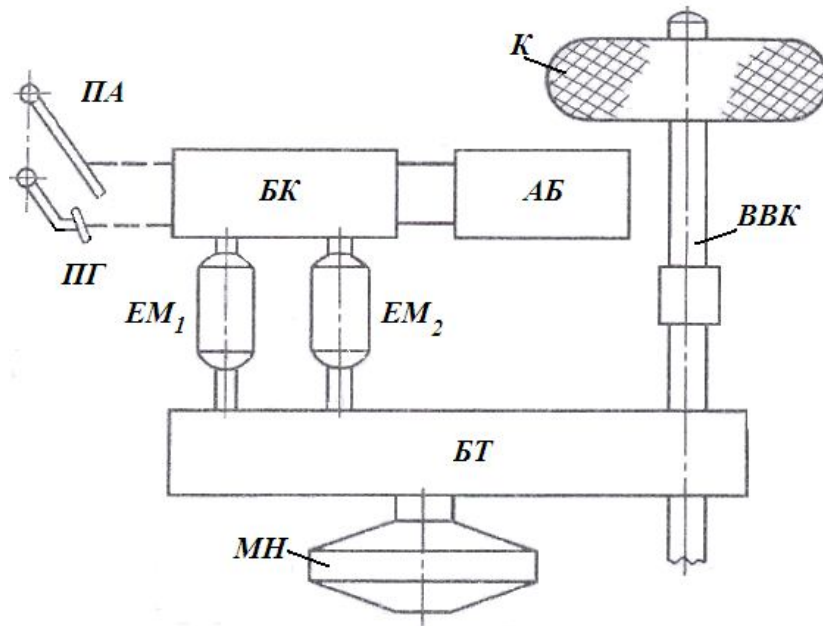


Рисунок 6.1 – Структурна схема комбінованого джерела живлення

В [19] запропоновано пристрій для передачі електричної енергії транспортному засобу (рис. 6.2), в якому для розкрути маховика використовується електрична машина змінного струму (асинхронна або синхронна). Кабель мережі змінного струму 1 через автоматичний вимикач 2, який встановлено разом з іншим обладнанням у спеціальному контейнері 3, сполучено з тиристорним перетворювачем частоти 4. Останній може бути виконано з ланкою постійного струму. Вихід тиристорного перетворювача 4 з'єднано зі спіральною електричною котушкою 5, яку закріплено у кільцевому пазі циліндричного магнітопроводу 6 із фериту. До транспортного засобу 7 на рухомому шарнірному кронштейні прикріплено магнітопровід 9 з аналогічною спіральною електричною котушкою 10 у відповідному пазі. Котушка 10 через випрямляч 11 та вимикач 12 з'єднана з інвертором 13. Останній живить електричну машину (мотор-генератор) 14, сполучену з маховиком 15.

Місця стоянки транспорту обладнані контейнерами 3. Для розкручування маховика магнітопровід 9 транспортного засобу сполучається з магнітопроводом 6 контейнера, далі вмикається вимикач 2 і електрична енергія

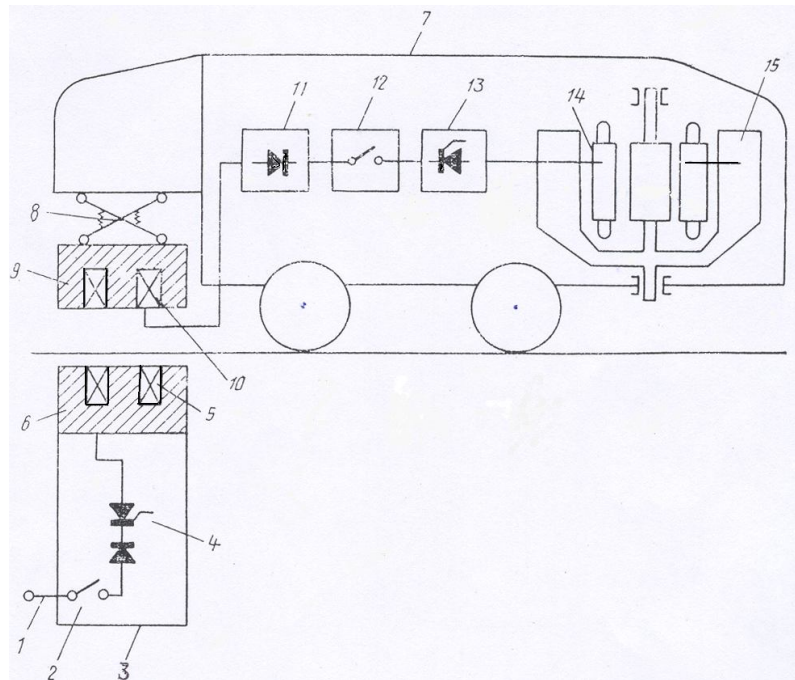


Рисунок 6.2 – Структурна схема пристрою для передачі електричної енергії транспортному засобу

з напругою частоти 20 кГц передається через випрямляч 11, вимикач 12 до тиристорного перетворювача 13. Останній створює напругу регульованої частоти від нульової до, наприклад, 400Гц, що забезпечує плавний розгін маховика 15 з кутовою швидкістю до 800 об/хв. В подальшому кінетична енергія маховика забезпечує рух транспортного засобу.

У роботі [20] наведено транспортний засіб (локомотив) з обертовим маховиком, який розкручується за допомогою двигуна постійного струму. Для живлення двигуна передбачено використання керованого випрямляча, розміщеного на зарядній підстанції та ввімкненого до виходу трансформатора. Останній, посередництвом електромагнітного пускача, з'єднано з трифазною мережею змінного струму. Для розгону маховика двигун сполучається з ним через редуктор зарядки. Для роботи локомотива маховик через редуктор ходу сполучається з ведучою віссю колісної пари. У транспортному засобі [20] не передбачено режим рекуперації енергії.

У роботі [21] наведено опис транспортного засобу з інерційним накопичувачем енергії у складі не менше трьох маховичних дисків, оснащених зосередженими постійними магнітами, розміщеними по периферії дисків.

Кожен маховичний диск оснащено котушкою збудження у вигляді двох послідовно з'єднаних секцій, закріплених на П - подібних магнітопроводах, що охоплюють зазначені маховичні диски. Виводи котушок збудження підключені до джерела струму регульованої частоти, підключеного до акумуляторної батареї і блоку керування. Зазначені котушки при взаємодії їх магнітних полів з постійними магнітами дисків забезпечують розкручування цих дисків. Маховичні диски розміщені у вакуумному корпусі на вертикальному валу і постачені круговим диском магнітної підвіски. Вал через блок трансмісії зв'язаний з віссю обертання коліс транспортного засобу. За допомогою роlikової муфти з валом маховичного накопичувача зв'язана електрична машина постійного струму, яка підключена до акумуляторної батареї і блоку керування. Електрична машина забезпечує первинний поштовх при розкручуванні маховичних дисків та підзаряд акумулятора за рахунок енергії гальмування транспортного засобу.

Технічне рішення, запропоноване в [21] дозволить здійснювати разгін маховика за короткий час без ушкоджень вала, маховичних дисків і перевантаження акумуляторної батареї. Але структурна схема електропостачання коліс транспортного засобу занадто складна, що знизить надійність роботи і не забезпечить достатнього за рівнем коефіцієнта корисної дії.

6.6 Пропоновані технічні рішення відносно механічних накопичувачів енергії

Аналіз інформації стосовно інерційних накопичувачів енергії дозволяє запропонувати для використання в транспортних засобах вугільних шахт наступне:

- 1) маховик накопичувача виконувати у вигляді тонкостінного обіду;
- 2) для розкручування маховика використати асинхронний трифазний двигун з масивний ротором [22] або асинхронний двигун з двопаketним ротором [23], розрахований для інтенсивних динамічних режимів роботи. Вказані двигуни відзначаються значними пусковими моментами та меншими, у

порівнянні з типовими конструкціями, пусковими струмами. Двигуни мають просту конструкцію, високу надійність у роботі та відносно малу вартість;

3) для розгону маховика до достатньо великої кутової швидкості ($n=6000\div 8000$ об/хв) використати тиристорні або транзисторні перетворювачі частоти напруги живлення (до $f=400$ Гц);

4) у випадку, коли рівень накопиченої кінетичної енергії буде достатнім при $n=3000$ об/хв, використати двополюсний асинхронний двигун згідно [22] або [23], а для розгону маховика застосувати відносно простий, компактний та надійний тиристорний регулятор напруги, який, до того ж, коштує на порядок менше тиристорного перетворювача частоти;

5) рекуперацію енергії в гальмівних режимах роботи транспорту здійснювати шляхом підключення маховика через зарядний редуктор до ведучої осі транспортного засобу;

6) використання часткової магнітної підвіски маховика за допомогою двох кільцевих дискових постійних магнітів, один з яких закріплено з нижньої частини маховика, а другий – в нижній частині корпусу з відповідним проміжком відносно першого.

6.7 Енергетичні можливості електромеханічних накопичувачів енергії

В електромеханічних накопичувачах запасється, як правило, кінетична енергія обертового руху маховика, який при заряді накопичувача розкручується за допомогою механічного або електричного приводу (електричної машини, яка працює в режимі двигуна). Ротор в деяких варіантах накопичувачів конструктивно суміщено з маховиком. При розряді накопичувача механічна енергія перетворюється в електричну посередництвом електричної машини, яка працює в режимі генератора. При цьому, як генератор може бути використана та же машина, яка слугує електродвигуном для розганяння маховика, або інша електрична машина, також установлена на валу з маховиком.

При заряді накопичувача електрична машина (двигун) споживає відносно невелику усереднену потужність P_s від джерела живлення на протязі

часу t_3 . В режимі розряду електрична машина (генератор) віддає усереднену потужність $P_p > P_3$ за час $t_p < t_3$.

В залежності від конструкції та призначення накопичувача до його складу можуть входити різні електричні машини: змінного струму (асинхронні, синхронні), постійного струму, включаючи колекторні або вентильні; уніполярні (одноіменнополюсні).

Згідно висновкам роботи [18] маса накопичувача енергії з використанням асинхронної машини складає $0,5 \div 0,7$ від маси накопичувача з машиною постійного струму. Крім того, асинхронні машини більш надійні в роботі та мають меншу вартість. Тому, при розробці конструкції накопичувача енергії для шахтних електровозів передбачається використання асинхронних машин, причому одна і та ж машина поперемінно має працювати як двигун в як генератор.

При розгоні маховика двигуном електромеханічного накопичувача витрачається енергія

$$W_3 = \int_0^{t_3} P(t)dt = W_K + W_T + W_{el} + W_{m2}, \quad (6.15)$$

де $P(t)$ - споживана двигуном потужність від джерела живлення; W_K - накопичена маховиком та ротором двигуна кінетична енергія; W_T - енергія механічних втрат на тертя (ротора і маховика об навколишнє середовище, в опорах маховика і ротора та в рухомих контактах струмознімача); W_{el} - енергія електричних втрат у силовому ланцюзі (обмотці статора, контактах, кабелях, елементах системи керування); W_{m2} - енергія втрат у елементах магнітного кола (на гістерезис та вихрові струми); t_3 - тривалість заряду.

При живленні асинхронного двигуна накопичувача синусоїдним за формою змінним струмом активна потужність, споживана двигуном

$$P(t) = m \cdot U_\phi(t) \cdot I_\phi(t) \cdot \cos\varphi(t), \quad (6.16)$$

де m - число фаз; $U_\phi(t), I_\phi(t)$ - залежні ввід часу t діючі значення фазних напруг та струму; $\varphi(t)$ - фазовий зсув між миттєвими значеннями напруги та струму.

Визначимо тривалість розкручування маховика асинхронним двигуном. Тобто залежність $M_{\text{зв}} = M_{\delta}(s)$ електромагнітного моменту M_{δ} від ковзання $s = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0}$ запишімо у вигляді с прощеної формули (Клосса)

$$M_{\delta} = 2 \cdot M_m / (s_m^{-1} \cdot s + s_m \cdot s^{-1}), \quad (6.17)$$

де M_m - максимальне значення моменту; s_m - ковзання, відповідне моменту M_m (критичне); ω_0 - синхронна кутова швидкість.

У рівнянні (6.1) приймемо у першому наближенні $M_T = 0$. Тоді

$$M_{\text{зв}} = J \frac{d\omega}{dt}; \quad 2 \cdot M_m / (s_m^{-1} \cdot s + s_m \cdot s^{-1}) = J \frac{d\omega}{dt}. \quad (6.18)$$

Враховуючи, що $\omega = (1-s) \cdot \omega_0$, $\frac{d\omega}{dt} = -\omega_0 \frac{ds}{dt}$ і після підстановки в (6.18), одержимо

$$2 \cdot M_m dt = -J \cdot \omega_0 \cdot (s_m^{-1} \cdot s + s_m \cdot s^{-1}) ds. \quad (6.19)$$

Тривалість розкручування маховика, тобто час заряду накопичувача

$$t_3 = (0,5 \cdot J \cdot \omega_0 / M_m) \int_{s_3}^1 (s_m^{-1} \cdot s + s_m \cdot s^{-1}) ds. \quad (6.20)$$

Границі інтегрування в (6.20) відповідають: $s = 1$ - нерухомому маховику (ротору двигуна); ковзання $s_3 > 0$ - круговій швидкості ω_3 реального неробочого ходу двигуна. Після інтегрування одержимо

$$t_3 = (0,5 \cdot J \cdot \omega_0 / M_m) \cdot (0,5 \cdot s_m^{-1} - 0,5 \cdot s_m^{-1} s_3^2 - s_m \cdot \ln s_3). \quad (6.21)$$

Розряд електромеханічного накопичувача відбувається звичайно при повному або форсованому збудженні електричної машини, яка працює в режимі генератора. При цьому у навантаження (в електровозі це – тягові двигуни) передається корисна електрична енергія

$$W_p = W_e = \int_0^{t_p} P_G(t) dt, \quad (6.22)$$

де $P_G(t)$ - активна потужність генератора; t_p - тривалість розряду.

За час t_p у електричну енергію перетворюється тільки частина енергії W_K , друга частина її витрачається на покриття втрат. Деяка частина енергії W_K

залишається не використаною, якщо за час t_p кутова швидкість ротора $\omega_2 = \omega(t)$ не досягає нульового рівня.

На основі (6.15), (6.17) запишемо співвідношення

$$W_e = \eta_p \cdot (W_{K_1} - W_{K_2}) = 0,5 \cdot \eta_p \cdot J_M \cdot \omega_1^2 \cdot \left[1 - \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \right], \quad (6.23)$$

де $\eta_p < 1$ - ККД розряду, $J_M = 0,5 \cdot M_M \cdot R_M^2$ - момент інерції маховика та ротора електричної машини; M_M - маса маховика та ротора; R_M - радіус маховика; W_{K_1}, W_{K_2} - значення кінетичної енергії, відповідні початковій ω_1 та кінцевій ω_2 кутовий швидкостям.

Звідси (при завданих значеннях інших параметрів накопичувача) визначається маса маховика з ротором

$$M_M = 4 \cdot W_e / \left(\eta_p \cdot R_M^2 \cdot \omega_1 \cdot \left(1 - \frac{\omega_2^2}{\omega_1^2} \right) \right). \quad (6.23)$$

6.8 Аналіз відомих конструкцій електромеханічних накопичувачів енергії

Як було сказано вище, до складу електромеханічних накопичувачів можуть входити різні електричні машини. Так, машину постійного струму (МПС) можна використати як двигун для розкрути маховика і, після нескладних перемикачів, як електрогенератор для живлення навантаження. Достоїнство колекторних або вентильних машин постійного струму – це простота та гнучкість регулювання кутової швидкості та обертового моменту двигуна або напруги генератора. Недоліки колекторних МПС – невелика гранична потужність при частоті обертання $n > 3000 \text{ об/хв}$ та обмеження по струму, який протікає через колектор та щітки. Недоліки вентильних МПС – порівняно великі габарити та маса напівпровідникового комутатора.

Електромеханічний накопичувач енергії з асинхронною машиною має просте конструктивне виконання то просту структурну схему, в якій забезпечення зарядного циклу, робота в режимі чергування, а також живлення навантаження у розрядному циклі здійснюється від одних и тих же затискачів електричної машини. Недоліками такого накопичувача є: 1) збільшення маси

машини із-за суперечливих вимог, пропорованих до зарядного циклу (режим двигуна) та розрядного циклу (режим генератора); 2) використання конденсаторів із значною ємністю для забезпечення роботи машини в режимі генератора; 3) складність регулювання вихідної напруги асинхронного генератора із широкому діапазоні зміни частоти обертання, що являє собою найбільш важку проблему. Останнє змушує відмовлятися від використання асинхронного генератора.

Електромеханічний накопичувач, який містить асинхронний двигун та синхронний генератор, забезпечує просте регулювання вихідної напруги в режимі розряду енергії. При цьому, використання різних машин в зарядному в розрядному циклах дозволяє оптимізувати кожен з них на свій режим роботи. Недоліки такого накопичувача: 1) складність конструкції; 2) значні витрати енергії при розкручуванні маховика; 3) велика вартість та низький коефіцієнт корисної дії.

У режимі заряду електромеханічного накопичувача (розкручування ротора) показники питомої енергії мають менші значення порівняно з механічними накопичувачами на основі металевих маховиків. Справа в тому, що до складу електромеханічних накопичувачів входять електричні машини, ротори яких у більшості випадків мають зубцево-пазову структуру з обмотками зі струмом. Це приводить до обмеження допустимої колової швидкості ротора, яка значно менша, ніж у монолітних маховиків.

Поведений аналіз конструкцій накопичувачів показав, що найбільш раціональним є використання в них асинхронних машин при умові усунення вказаних недоліків.

Наведемо приклади виконання електромеханічних накопичувачів з машинами змінного струму. У книзі [24] наведено опис конструкції накопичувача, в якому ротор асинхронного двигуна суміщено з маховиком, причому ротор розміщено зовні статора. Сам статор з обмоткою закріплено на нерухомому порожнистому валу, всередині якого проходять вивідні провідники трифазної обмотки. Ротор має короткозамкнену стрижневу обмотку.

Магнітопровід ротора закріплено на внутрішній поверхні маховика. Від джерела живлення підвищеної частоти $f=400$ Гц на обмотку статора подається трифазна напруга. У чотириполюсному виконання двигуна його ротор обертається в підшипниках з частотою $n=12 \cdot 10^3$ об/хв. Експлуатація накопичувача передбачається в режимах збереження та використання його кінетичної енергії.

У роботі [25] описано дві конструкції електромеханічних накопичувачів із синхронними електричними машинами. Ротори машин мають магнітопроводи, в яких закріплено (дискретно) постійні магніти. У кожному з накопичувачів ротор приєднано до внутрішньої поверхні кільцевого маховика. Товщина стінки маховика вибрана в діапазоні значень $(0,15-0,2) r_2$, де r_2 - зовнішній радіус кільця, що забезпечує рівень питомої енергії, близький до максимального. Статор машини зроблено безпазовим; обмотку статора у вигляді тонкого провідного шару закріплено на поверхні магнітопроводу. Останній розміщено на зовнішній поверхні нерухомої тонкостінної труби.

Розгін маховика здійснюється при живленні обмотки статора від тиристорного перетворювача частоти. При розряді накопичувача тиристорний перетворювач переводиться у режим випрямляча змінного струму.

6.9 Пропозиції відносно електромеханічних накопичувачів енергії для шахтних транспортних засобів

Електромеханічні накопичувачі раціонально використовувати у типових конструкціях електровозів, наприклад, у акумуляторних для обґрунтованої заміни електрохімічних накопичувачів (акумуляторів). У цьому випадку накопичувач потрібно пристосувати до роботи його з тим електротехнічним обладнанням та електродвигунами, якими постачено електровоз.

Аналіз відомих технічних рішень стосовно електромеханічних накопичувачів енергії дозволяє запропонувати для використання у транспортних засобах вугільних шахт наступне:

1) асинхронну машину з короткозамкненим ротором для роботи як у якості двигуна, так і у якості генератора;

- 2) ротор закріпити на внутрішній поверхні маховика у вигляді обіду, статорна нерухомому валу у внутрішній порожнині ротора;
- 3) розкручування маховика здійснювати живленням обмотки статора від керованого тиристорного або транзисторного перетворювача частоти у режимі інвертора;
- 4) живлення двигунів електровоза здійснювати після переводу асинхронної машини у генераторний режим за допомогою перетворювача частоти в режимі роботи як керований випрямляч.

Це дозволяє відмовитись від використання конденсаторів, що звичайно забезпечують генератор реактивною енергією.

Для реалізації приведенного вище необхідно оптимізувати параметри асинхронної машини з метою забезпечення ефективної роботи її як у режимі двигуна, так і у режимі генератора. Крім того, треба мати відповідний напівпровідниковий перетворювач, надійний у роботі, доступний та порівняно дешевий. У теперішній час це складна проблема, яка ще повністю не вирішена.

Пропонується спрощений варіант електромеханічного накопичування енергії. А саме :

- 1) використати асинхронну машину з фазним ротором, який суміщено з маховиком, тобто закріплено на його внутрішній поверхні;
- 2) розкручування маховика здійснювати живлення обмотки статора від напівпровідникового перетворення частоти або пряма від трифазної мережі. В останньому випадку енергію ковзання ротора використати для заряду акумулятора або ємнісного накопичування енергії;
- 3) у генераторному режимі роботи забезпечити живлення обмотки ротора регульованим постійним струмом;
- 4) у гальмівних режимах роботи транспорту забезпечити роботу тягових двигунів (звичайно, це двигуни постійного струму) у генераторному режимі для заряду акумуляторів або ємнісного накопичувача енергії.

На рис. 6.3 представлена конструктивна схема пропонованого (за другим варіантом) накопичувача. На порожнистому валу 1 закріплено

магнітопровід 2 статора асинхронної машини з обмоткою 3. Виводи 4 обмотки виведено зовні через порожнистий вал. Маховик 5 за допомогою двох боковин 6 установлено на підшипники кочення 7. На внутрішній поверхні кільцевого маховика закріплено магнітопровід ротора 8 з обмоткою 9 в його пазах. Виводи трифазної обмотки ротора поєднано до трьох контактних кілець 10, закріплених на циліндрі 11 з ізоляційного матеріалу. Циліндр з одного боку опирається на підшипник 12. До зовнішньої поверхні кілець прилягають провідні щітки 13. Корпус 14 закриває рухомі частини накопичувача.

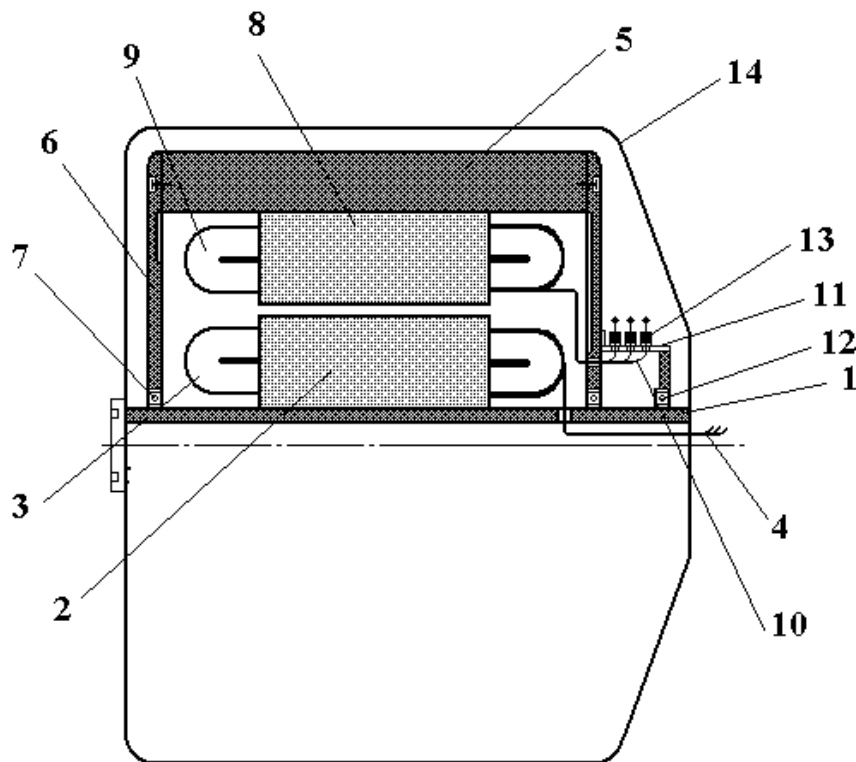


Рисунок 6.3 – Конструктивна схема накопичувача

На схемі електричних з'єднань (рис. 6.4) елементів накопичувача показана обмотка статора ОС асинхронної машини, яка за допомогою перемикача П1 поєднується до трифазної мережі живлення (положення 1) у режимі розкручування маховика , або до виводів керованого випрямляча В1 (положення 2) при розряді накопичувача. Двигуна ЕМ електровоза у режимі його руху приєднується до випрямляча В1 посередництвом перемикача П2 (положення 4): при гальмуванні електровоза двигуни ЕМ переводять у

генераторний режим роботи і вмикають до виводів акумулятора АБ1 (або ємнісного накопичувача енергії) (положення 3 перемикача П2).

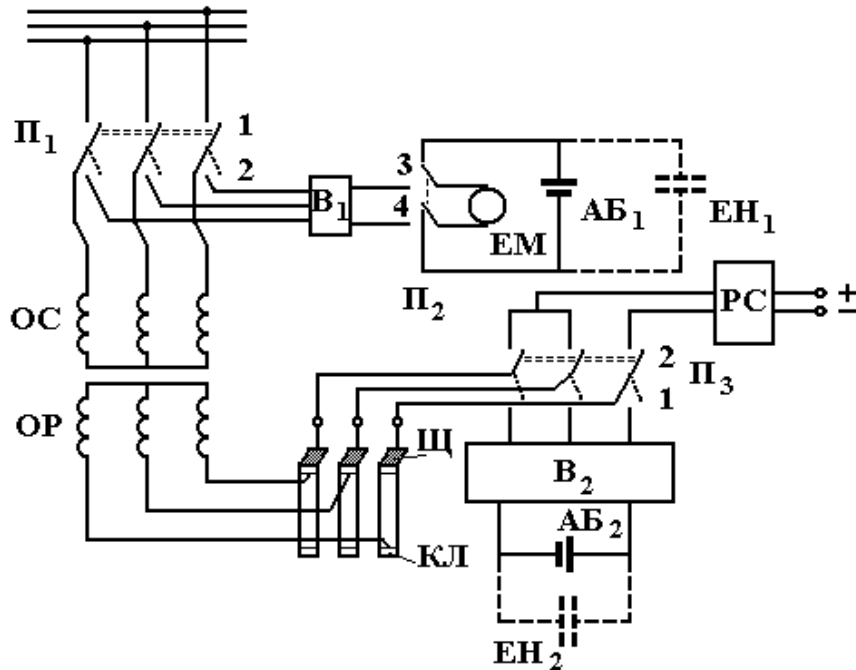


Рисунок 6.4 – Електрична схема накопичувача

Обмотка ротора ОР асинхронної машини через контактні кільця КЛ та провідні щітки на період розкручування маховика приєднується (за допомогою перемикача П3) до виводів керованого випрямляча В2 (положення 1 перемикача). Випрямляч В2 живить (заряджає акумуляторну батарею АБ2 або ємнісний накопичувач енергії ЕН2). При цьому використовується енергія ковзання, яка виділяється у електричному колі ротора.

Після розкручування маховика перемикач П3 переводять положення 2. При цьому забезпечується живлення обмотки ротора ОР керованим постійним струмом від регулятора струму РС. Останній живиться від акумуляторної батареї АБ2 (на рис. Не показано). Таким чином асинхронна машина переводиться у генераторний режим роботи. В обмотці статора ОС індукуються змінна електрорушійна сила, яка після випрямлення В2 живить двигуни електровоза ЕМ.

7 ОЦІНКА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОВОЗА ПРИ ВИКОРИСТАННІ ЄМКІСНИХ НАКОПИЧУВАЧІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В СИСТЕМІ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

7.1 Обґрунтування доцільності використання ємнісного накопичувача енергії для умов шахтного безконтактного транспорту

У шахтах, небезпечних за газом та пилом, найбільш прийнятним є використання безконтактного живлення електровозів посередництвом електромагнітного поля тягової мережі, кабелі якої (прямий та зворотній) ввімкнені до високочастотного джерела живлення. Як було сказано вище, у деякі місця транспортної виробки (біляствольний двір) майже неможливо або нерационально (виробки з малим вантажопотоком) прокласти і закріпити там кабелі тягової мережі. У цьому випадку на електровозі за час його руху по основній транспортній магістралі необхідно накопичити достатньо енергії для подальшого використання її у зазначених вище випадках.

Для цих завдань можна використовувати накопичувач енергії на конденсаторах які можуть вирішувати такі завдання: маневрові роботи на короткі відстані; забезпечення постійної напруги подаваного на електродвигуни електровоза; відбору потужності в період гальмування й так далі.

Пошук виробників конденсаторів показав, що достатньо багато компаній з далекого і ближнього зарубіжжя виробляють конденсатори з подвійним електричним шаром. Серед компаній далекого зарубіжжя можна виділити: Maxwell technologies, Panasonic Industrial Company, ELNA America, Kbi, NESSCap, AVX, Cooper Electronic Technologies, EPCOS AG. Серед компаній ближнього зарубіжжя: ЗАТ "ЕЛІТ", РКК "Енергія" ім. С.П. Корольова, ВАТ НДІ Гиріконд, ТОВ МНПО «ЕКОНД».

У таблиці 7.1 представлено технічні характеристики імпульсних конденсаторів енергоємних (ІКЕ), випускаючих російським ТОВ МНВО «ЕКОНД».

Таблиця 7.1 - Технічні характеристики імпульсних конденсаторів енергоємних

Тип ІКЕ	U, В	C, Ф	Pmax, кВт	Imax, А	Iут., мА	Обл. темпер., °С	Ресурс, років	Об'єм, дм ³	Вага, кг	Вживання
25/14	14	255	32,7	4600	≤1,0	-45 +50	≥10	11,4	27,0	Пуск ДВС автотракторної і залізничної техніки (дрезин; дизелів колійних машин, рефрижераторних вагонів).
40/28	28	100	78,4	5600	≤1,0	-45 +50	≥10	15,0	32,0	
60/28	28	160	130,6	9200	≤1,0	-45 +50	≥10	18,7	38,0	
90/200	200	4,50	100,0	1000	≤1,0	-45 +50	≥10	22,9	36	Гібридний транспорт, електротранспорт, джерела безперебійного живлення.
85/270	270	2,50	135,0	1000	≤1,0	-45 +50	≥10	27,4	52	
90/300	300	2,00	150,0	1000	≤1,0	-45 +50	≥10	23,7	38,0	
115/300	300	2,50	150,0	1000	≤1,0	-45 +50	≥10	27,5	53	
40/64	75	23,0	187,6	4250	≤1,0	-45 +50	≥10	17,2	38,0	Конденсаторна система пуску дизелів магістральних і маневрових тепловозів.
40/96	115	8,50	189,0	2700	≤1,0	-45 +50	≥10	16,2	34,0	
1,5/18	18	7,00	9,00	1000	≤1,0	-45 +50	≥10	4,99	10,0	Агрегати безперебійного живлення, електроприводи комутаційних апаратів і іншого призначення, буферні накопичувачі електричних підстанцій і прямих перетворювачів енергії, акустичні системи, навігаційні маяки, рентгенівська апаратура, імпульсні джерела струму.
6/24	12÷24	21,0	9,60	600	≤1,0	-45 +50	≥10	4,99	12,0	
20/150	150	1,80	56,2	750	≤1,0	-45 +50	≥10	11,0	23,0	
15/175	175	1,00	61,2	700	≤1,0	-45 +50	≥10	9,76	21,5	
33/200	200	1,65	100,0	700	≤1,0	-45 +50	≥10	10,4	30,0	
60/200	200	3,00	100,0	1000	≤1,0	-45 +50	≥10	13,3	28,0	
27/220	220	1,12	121,0	1100	≤1,0	-45 +50	≥10	20,8	40,0	
20/300	300	0,45	150,0	1000	≤1,0	-45 +50	≥10	8,31	25,0	
40/300	300	0,90	120,0	800	≤1,0	-45 +50	≥10	20,4	40,0	
18/350	350	0,30	152,2	700	≤1,0	-45 +50	≥10	12,8	29,0	
40/400	400	0,50	200,0	1000	≤1,0	-45 +50	≥10	15,8	32,0	
36/700	700	0,15	350,0	1000	≤1,0	-45 +50	≥10	17,4	36,0	

Головне достоїнство конденсаторів з подвійним електричним шаром (іоністорів) – це на декілька порядків більша ємність, ніж у будь-яких інших класів конденсаторів. Іоністори за діапазонами реалізації питомої енергії і питомої потужності займають проміжне положення між хімічними джерелами струму і електролітичними конденсаторами. Але на відміну від хімічних джерел струму вони мають ширший температурний діапазон експлуатації (зберігають працездатність при негативних температурах); у них практично необмежена кількість циклів заряд/розряд, вони здатні видати в імпульсі велику потужність з високим коефіцієнтом корисної дії і при цьому не розігріватися.

7.2 Енергетичні можливості ємнісного накопичувача

В якості накопичувачів енергії має сенс використати електричні конденсатори значної ємності, тобто ємнісні накопичувачі. Досягнута питома енергія конденсаторів з подвійним хімічним шаром (ультраконденсаторів) складає $w_M = 7$ кДж/кг. Визначимо масу та ємність конденсаторів накопичувача енергії для роботи електровоза протягом 10 хвилин із середньою потужністю (навантаження двигунів) 30 кВт. Необхідна для руху транспорту енергія $W_{C_p} = (P_d \cdot t_p) / \eta_p$, де $P_d = 30$ кВт – середня потужність навантаження; $t_p = 10$ хвилин – час роботи транспорту; $\eta_p = 0.8$ – коефіцієнт корисної дії системи розряду конденсаторів.

Розмір енергії, що повинна бути накопичена $W_{C_3} = P_3 \cdot t_3$, де P_3 – середня зарядова потужність; t_3 – тривалість процесу заряду конденсаторів.

Якщо вибрати $P_3 = 10$ кВт, то тривалість заряду, виходячи з рівності $W_{C_p} = W_{C_3}$, повинна бути не меншою

$$t_3 = \frac{P_d \cdot t_p}{P_3 \cdot \eta_p} = \frac{30 \cdot 10}{10 \cdot 0,8} = 37,5 \text{ хвилин.}$$

Маса конденсаторів накопичувача

$$m = \frac{W_{C_p}}{w_M} = \frac{30 \cdot 10 \cdot 60}{7 \cdot 0,8} = 3214 \text{ кг.}$$

Енергія, що передається до розрядного контуру накопичувача

$$W_H = 0,5 \cdot C_H \cdot (U_p^2 - U_{C_0}^2)$$

де C_H – ємність конденсаторів накопичувача; U_p , U_{C_0} – напруга на конденсаторах перед розрядом і залишкова напруга на них в кінці розряду.

Прийmemo $U_{C_0} = 0,3 \cdot U_p$, тоді потрібна ємність при умові $W_H = W_{C_p}$ конденсаторів складе

$$C_H = \frac{2 \cdot W_H}{0,9 \cdot U_p^2} = \frac{2 \cdot P_d \cdot t_p}{0,9 \cdot U_p^2 \cdot \eta_p}$$

При $U_p = 500$ В маємо

$$C_H = \frac{2 \cdot 30 \cdot 10^3 \cdot 10 \cdot 60}{0,9 \cdot 550^2 \cdot 0,8} = 4958,7 \text{ Ф.}$$

На жаль, забезпечити таку ємність конденсаторів при вказаній напрузі і обмежених габаритах при сучасному розвитку техніки.

В подальшому розраховуємо на можливості конденсаторів, виробництво яких освоєно, та прийняті напруги живлення $U_d = 200$ В двигунів шахтних електровозів. Для накопичувача електроенергії використаємо конденсатори типу ІКЕ-90/200 (виробництво ТОВ МНВО «ЕКОНД», м. Москва) з такими характеристиками: номінальна напруга $U_d = 200$ В; ємність одного конденсатора $C = 4,5$ Ф; накопичена енергія 90 кДж; маса 36 кг; питома (на одиницю маси) енергія $w_M = 2,78$ кДж/кг; об'єм 22,9 дм³.

При допустимій масі батареї конденсаторів $n_1 = 2600$ кг, кількість конденсаторів складе $n = 2600/36 = 72,2$. Прийmemo $n = 72$. Об'єм, що займають конденсатори, $V = 72 \cdot 22,9 \cdot 1,2 = 1978$ дм³. Розмір енергії, що може бути накопичена $W_C = 7,2 \cdot 90 = 6,48 \cdot 10^3$ кДж. Ємність батарей конденсаторів при паралельному їх з'єднанні $C_H = 72 \cdot 4,5 = 324$ Ф. Енергія, яку може бути передано двигунам електровоза, $W_H = 0,5 \cdot C_H (U_p^2 - U_{C_0}^2) = 0,45 \cdot C_H U_p^2 = 0,45 \cdot 324 \cdot 200^2 = 5,83 \cdot 10^3$ кДж. Для руху електровоза може бути використано частину цієї енергії, а саме $W_H \cdot \eta_p = 5,83 \cdot 10^3 \cdot 0,8 = 4,7 \cdot 10^3$ кДж.

Час руху транспорту у випадку живлення двигунів від ємнісного накопичувача енергії складе: $t_p = W_n \cdot \eta_p / P_d$.

При потужності навантаження $P_d = 25$ кВт, $t_p = 4,7 \cdot 10^3 / 25 = 186$ с або 3,1 хв. При середній швидкості руху $6 \cdot 10^3$ м/год транспорт пройде за розрахований час шлях довжиною 310 м. Якщо часу при вказаній ємності накопичувача недостатньо для виконання маневрів, тоді в кінці відкатної виробки в районі біля ствольного двору необхідно обладнати станцію для зарядки ємності накопичувача, або для обміну накопичувачами.

Прийmemo допустиму тривалість заряду накопичувача $t_s = 20$ хв. Тоді середня зарядова потужність складе

$$P_s = \frac{P_d \cdot t_p}{\eta_p \cdot t_s} = \frac{25 \cdot 3,1}{0,8 \cdot 20} = 4,84 \text{ кВт},$$

тобто 10,3 % від номінального навантаження (47 кВт) двигунів електровоза.

7.3 Використання ємнісних накопичувачів електричної енергії в шахтному електровозному транспорті

На рис. 7.1 показано структурну схему електропостачання двигунів електровоза з використанням ємнісного накопичувача енергії. Позначено: ОЕ – обмотка енергоприймача; ВП – випрямляч; C_p – конденсатор для забезпечення у колі обмотки ОЕ стану резонансу напруг; Д – дросель; C_n – конденсатори накопичувача; БК – блок керування двигунами D_1 і D_2 ; C_ϕ – конденсатор для зменшення пульсації напруги ВП.

Дросель Д зменшує стрибки струму при заряді конденсаторів C_n та сприяє підвищенню коефіцієнта корисної дії схеми заряду. Конденсатори C_n розділено на окремі групи, наприклад, 9 груп по 8 конденсаторів у кожній, що дозволяє більш рівномірно навантажувати джерело живлення при заряді конденсаторів та вводити в роботу, при потребі будь-яку кількість груп конденсаторів. Мається на увазі, що групи заряджаються по чергово, а розряджати можуть як одночасно, так і по чергово.

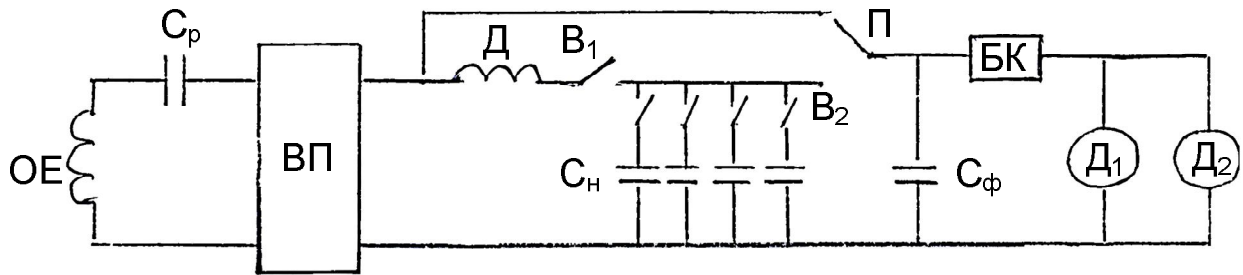


Рисунок 7.1 – Структурна схема електропостачання двигунів електровоза з ємнісним накопичувачем енергії

Схема (рис. 7.1) передбачає, як незалежний заряд конденсаторів C_n (вимикач B_1 ввімкнено) одночасно з роботою двигунів D_1 і D_2 електровоза (перемикач Π – у верхньому положенні), так і залежний (перемикач Π – у нижньому положенні) по одних і тих же дротах.

В останньому випадку заряджений ємнісний накопичувач демпфує вплив різких змін рівня навантаження електровоза на джерело живлення. Для забезпечення живлення двигунів тільки від накопичувача перемикач Π переводять у нижнє положення, а вимикач B_1 розмикають (вимикач B_2 замкнено). Накопичувач з конденсаторами C_n можна зробити з'ємними, що дозволить в окремих місцях транспортної магістралі замінити його на інший, але завчасно заряджений.

Введення ємнісного накопичувача до схеми електропостачання двигунів електровоза дає можливість використовувати енергію гальмування транспорту. При цьому двигуни переводяться у генераторний режим роботи. Двигуни електровоза – це звичайно машини постійного струму з послідовним збудженням. Для забезпечення ефективного гальмування необхідно незалежне збудження з можливістю регулювання струму збудження у напрямку його збільшення. Для цього пропонується наступне: котушки послідовної обмотки збудження виконати з окремих елементарних провідників з виводами у клемну коробку і наступним приєднанням їх до комутуючих пристроїв (перемикачів). При роботі електричної машини в режимі двигуна елементарні провідники з'єднуються взаємно паралельно, створюючи один ефективний провідник із

значним поперечним перерізом. Обмотка збудження з таких ефективних провідників з'єднується послідовно з обмоткою якоря.

При роботі електричної машини в режимі генератора обмотка збудження від'єднується від обмотки якоря. Її елементарні провідники з'єднуються взаємно-послідовно, створюючи обмотку збудження із значною кількістю витків, що вмикається до регульованого джерела живлення постійного струму.

На рис. 7.2 представлено схему електричних з'єднань елементів системи електропостачання електровоза в режимі його гальмування. Створені вказаним вище способом обмотки збудження OZ_1 і OZ_2 обох двигунів з'єднано

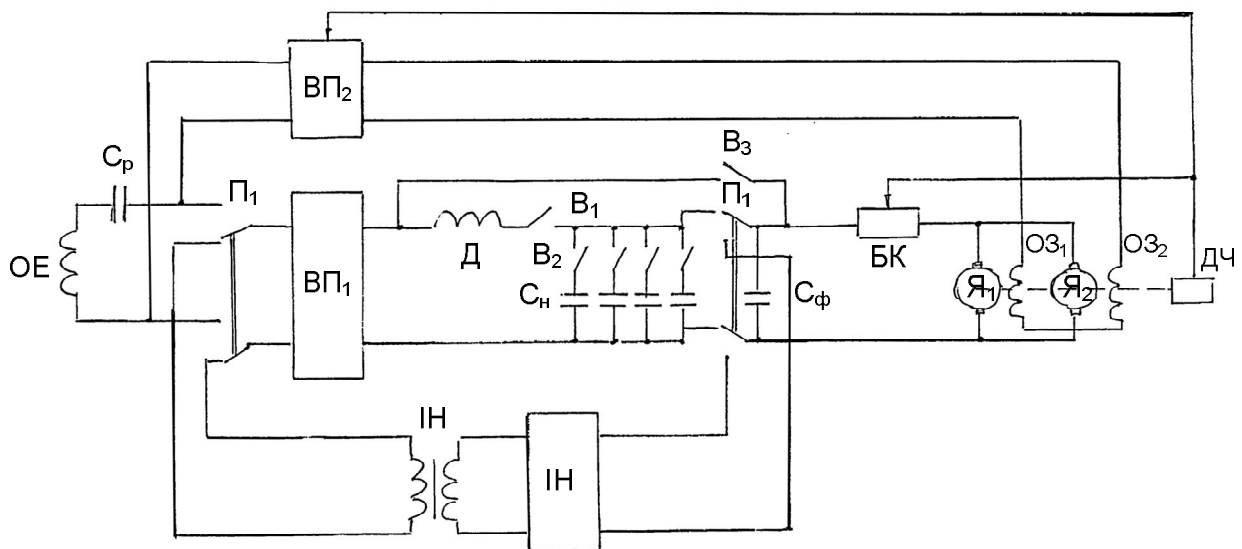


Рисунок 7.2 – Схема з'єднань елементів системи електропостачання електровоза в режимі гальмування

взаємопослідовно і ввімкнено до виводів керованого випрямляча VP_2 . Останній живиться від обмотки OE енергоприймача. Обмотки якорів $Я_1$, $Я_2$ двигунів з'єднано на рис. 7.2 взаємопаралельно (можливе і послідовне з'єднання) і посередництвом блоку керування BK , що працює у зворотному напрямі може бути ввімкнено безпосередньо для конденсаторів C_n ємнісного накопичувача (перемикач P_1 – у верхньому положенні) або до входу височастотного інвертора IH (перемикач P_1 – у нижньому положенні). Інвертор IH перетворює постійну напругу, що генерують якорі $Я_1$, $Я_2$, у змінну з частотою 5 кГц, що

відповідає частоті живлення тягової мережі. Трансформатор T_p підвищує вихідну напругу інвертора до потрібного рівня, яка через перемикач Π_2 у його нижньому положенні поступає на вхід головного випрямляча $ВП_1$. До виходу останнього ввімкнено дросель $Д$, через який заряджаються конденсатори $С_n$. Для збільшення ефективності гальмування конденсатори $С_n$ по чергово відповідним вмиканням вимикачів $В_2$. Давач частоти ДЧ обертання валів двигунів регулює вихідну напругу керованого випрямляча $ВП_2$ таким чином, щоб струм збудження відповідно зростає зі зменшенням частоти обертання. Також давач частоти корегує дію блоку керування БК, який є широтно-імпульсним і забезпечує потрібний темп гальмування.

8 ОПИС СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПЕРЕСУВНИХ ЕЛЕКТРОСПОЖИВАЧІВ З ІНДУКТИВНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ З ПОЗИЦІЇ БАЛАНСУ ПОТУЖНОСТІ

8.1 Баланс потужності в системі електропостачання з використанням ємнісного накопичувача енергії

При впровадженні накопичувача енергії до системи енергопостачання електроприймача особливе значення відводиться питанню енергоефективності. Проаналізуємо роботу накопичувача з енергетичної точки зору.

Нехай W_z – енергія, що передається накопичувачу на зберігання, W_p – енергія, що віддається накопичувачем у навантаження, ΔW_z , ΔW_p , ΔW_x – енергія, що втрачається при заряді, розряді і зберіганні відповідно (тоді енергетична діаграма роботи накопичувача може бути представлена як на рис. 8.1).

Враховуючи, що

$$W_p = \eta_z \cdot \eta_p \cdot \eta_x \cdot W_z = \eta_n \cdot W_z, \quad (8.1)$$

де $\eta_n = \eta_z \cdot \eta_p \cdot \eta_x$ – ККД накопичувача; η_z – ККД заряду; η_x – ККД зберігання; η_p – ККД розряду.

Визначимо втрати енергії в накопичувачі:

$$\Delta W_\Sigma = W_z - W_p = W_z - \eta_n W_z = (1 - \eta_n) W_z. \quad (8.2)$$

Слід зауважити, що даний вираз справедливий лише для випадку використання накопичувача в режимі «заряд – повний розряд» (розряд до рівня енергії на початку заряду).

Розглянемо довільний графік навантаження якого-небудь устаткування (рис. 8.1) у випадках роботи без накопичувача енергії і з ним.

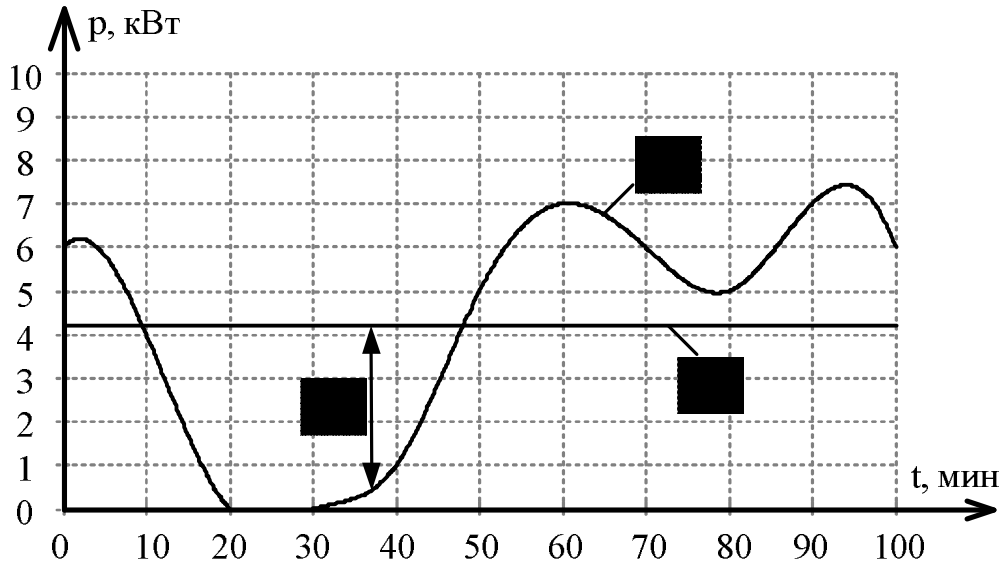


Рисунок 8.1 – Довільний графік навантаження будь-якого устаткування

На рис. 8.1 енергію заряду представлено площею, утвореною кривою 2 (вирівняний графік навантаження) і ділянками кривої 1 (вихідний графік навантаження), розташованими нижче кривої 2.

Таким чином, W_3 по абсолютній величині можна представити у вигляді:

$$W_3 = -\int_0^{t_3} \delta p(t) \cdot dt, \quad (8.3)$$

де t_3 – сумарний час, протягом якого накопичувач заряджається; $\delta p(t) = p(t) - p_{cp}$ – потужність, що віддається накопичувачем.

Сумарні втрати в накопичувачі за цикл «заряд – повний розряд» можна представити як:

$$\Delta W_{\Sigma} = -(1 - \eta_n) \int_0^{t_3} \delta p(t) \cdot dt. \quad (8.4)$$

Вочевидь, що встановлювати накопичувач доцільно, якщо у загальному випадку виконується умова:

$$Z_n < \mathcal{E}_n, \quad (8.5)$$

де Z_n – витрати на накопичувач; \mathcal{E}_n – ефект від установки накопичувача.

Зокрема,

$$\Delta W_{\Sigma} \leq W_3, \quad (8.6)$$

де W_3 – економія енергії.

Спробуємо знайти узагальнювальну залежність для визначення скорочення втрат енергії у будь-якому пристрої, через який проходить потік енергії від джерела до приймача.

Представимо схематично процес передачі (рис. 8.2).

Нехай пристрій має свій ККД η . Тоді можемо записати:

$$p_2 = \eta \cdot p_1 \Rightarrow p_1 = \frac{p_2}{\eta},$$

де p_1 – потужність, що поступає до пристрою; p_2 – потужність, що передається від пристрою далі.

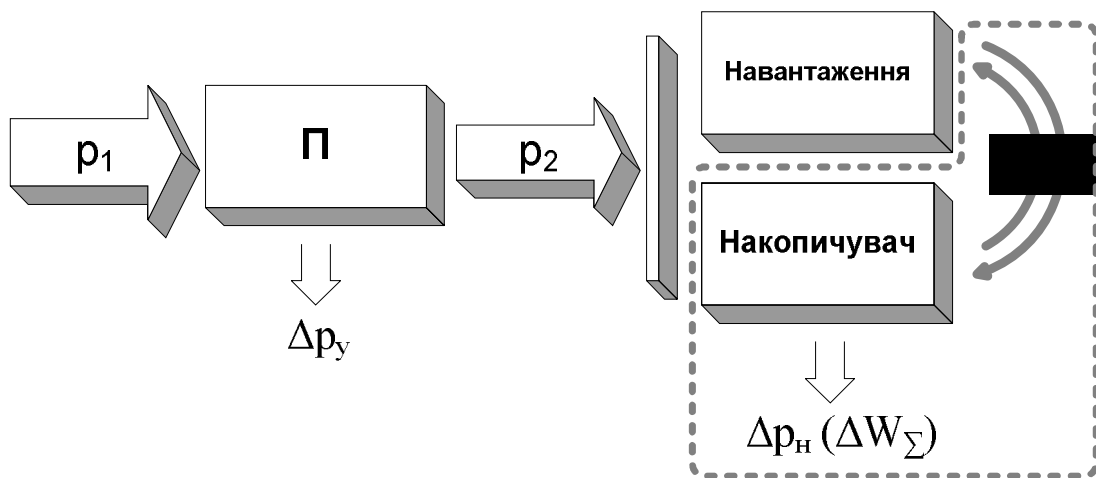


Рисунок 8.2 – Процес передачі енергії до електроприймача

Визначимо втрати потужності у пристрої:

$$\Delta p_y = p_1 - p_2 = \frac{p_2}{\eta} - p_2 = p_2 \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right).$$

Представимо p_2 у вигляді $p_{cp} + \delta p$ згідно з рис. 8.2. Тоді:

$$\Delta p_y = (p_{cp} + \delta p) \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) = \frac{p_{cp} + \delta p}{\eta} - (p_{cp} + \delta p).$$

Розрахуємо втрати енергії у пристрої за період часу від 0 до T :

$$\begin{aligned} \Delta W &= \int_0^T \Delta p_y(t) dt = \int_0^T \left(\frac{p_{cp} + \delta p(t)}{\eta} - p_{cp} - \delta p(t) \right) dt = \\ &= \int_0^T \frac{p_{cp} + \delta p(t)}{\eta} dt - \int_0^T p_{cp} dt - \int_0^T \delta p(t) dt. \end{aligned}$$

Якщо прийняти, що графік навантаження вирівнюється повністю, то

$\int_0^T \delta p(t) dt = 0$ і вираз для ΔW прийме вигляд:

$$\Delta W = \int_0^T \frac{p_{cp} + \delta p(t)}{\eta(p_{cp} + \delta p(t))} dt - \int_0^T p_{cp} dt.$$

Розрахуємо втрату енергії для випадку, коли графік навантаження повністю вирівняно (встановлено накопичувач). Втрати потужності у пристрої для цього випадку:

$$\Delta p_n = p_2 \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) = p_{cp} \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) = \frac{p_{cp}}{\eta} - p_{cp}.$$

Втрати енергії:

$$\Delta W_n = \int_0^T \Delta p_n dt = \int_0^T \left(\frac{p_{cp}}{\eta(p_{cp})} - p_{cp} \right) dt = \int_0^T \frac{p_{cp}}{\eta(p_{cp})} dt - \int_0^T p_{cp} dt.$$

Тепер можна визначити зменшення втрат енергії у пристрої після установки накопичувача і вирівнювання графіка навантаження (економія енергії):

$$\begin{aligned} W_{\Delta} &= \Delta W - \Delta W_n = \\ &= \int_0^T \frac{p_{cp} + \delta p(t)}{\eta(p_{cp} + \delta p(t))} dt - \int_0^T p_{cp} dt - \int_0^T \frac{p_{cp}}{\eta(p_{cp})} dt + \int_0^T p_{cp} dt = \\ &= \int_0^T \frac{p_2(t)}{\eta(p_2(t))} dt - \frac{p_{cp}}{\eta(p_{cp})} \cdot T \end{aligned}$$

В отриманому виразі $p_2(t)/\eta(p_2(t))$ не що інше як потужність, споживана пристроєм Π при невіривняному графіку навантаження електроприймача, а

$\int_0^T \frac{p_2(t)}{\eta(p_2(t))} dt$ – енергія, спожита цим пристроєм за період T :

$$\int_0^T \frac{p_2(t)}{\eta(p_2(t))} dt = \int_0^T p_1(t) dt = W_1.$$

$p_{cp} \cdot T / \eta(p_{cp})$ – енергія, споживана пристроєм Π за час T при вирівняному графіку навантаження електроприймача.

Аналізуючи отриману залежність W_{Σ} можна зробити висновок, що зменшення втрат енергії у пристрої після установки накопичувача і вирівнювання графіка навантаження електроприймача спостерігатиметься лише за умови, коли:

$$\int_0^T \frac{p_2(t)}{\eta(p_2(t))} dt > \frac{P_{cp}}{\eta(P_{cp})} \cdot T.$$

Схематично елементи приведеної нерівності представлено на рис. 8.3.

На величину правого порівнюваного у приведеній нерівності впливає форма графіка навантаження електроприймача ($p_2(t)$) і форма графіка залежності $\eta(p_2(t))$, тоді як ліве порівнюване – стала величина. Тому однозначного виводу про ефективність вирівнювання графіка навантаження, з точки зору скорочення втрат енергії у будь-якому пристрої, через який проходить потік енергії від джерела до приймача, зробити не можна. Питання повинне вирішуватися у кожному конкретному випадку окремо.

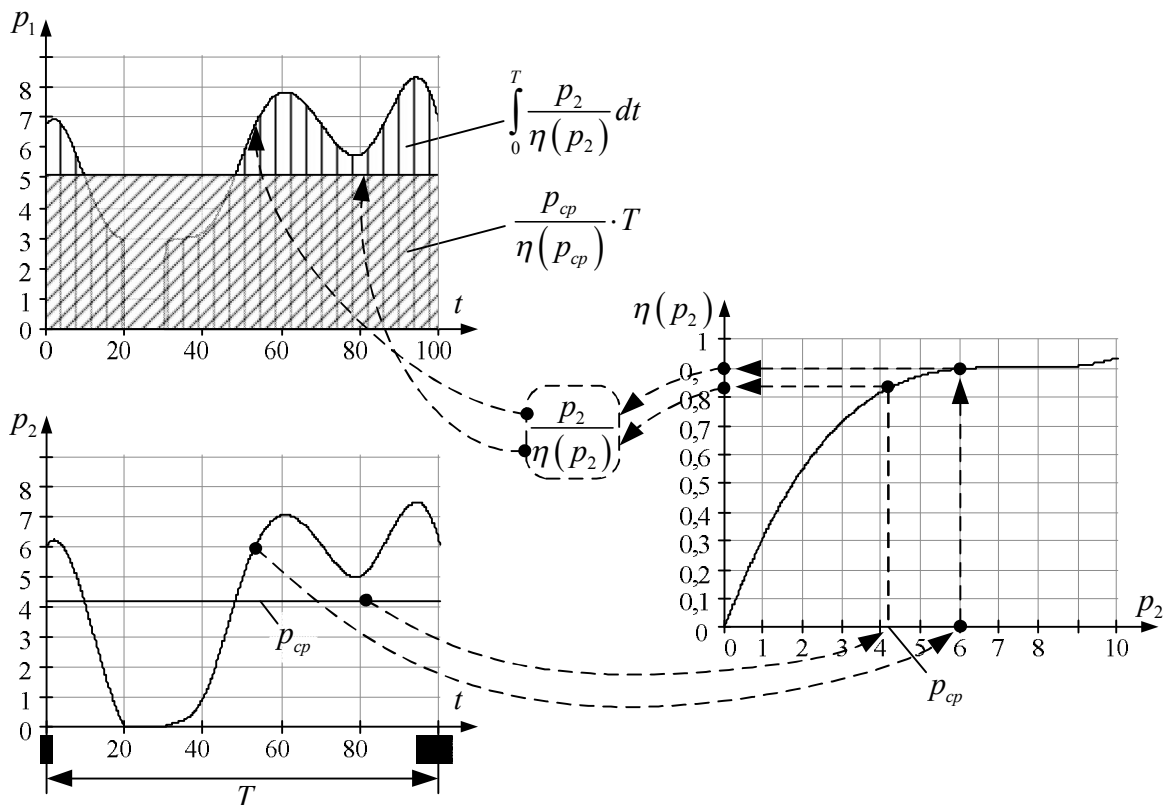


Рисунок 8.3 – Складові рівняння зменшення втрат енергії в пристрої після установки накопичувача і вирівнювання графіка навантаження

8.1 Баланс потужності в системі електропостачання з використанням механічного (інерційного) накопичувача

Відомо, що необхідна потужність і тяга електровоза вибираються з умови проведення по відкаточному штреку складу із заданою вагою й заданою технічною швидкістю. При заданій ваговій нормі ефективна потужність двигунів електровоза визначається по співвідношенню:

$$P_e = \frac{Q_e(W + i)}{k} \cdot V, \text{ кВт} \quad (8.7)$$

де Q — вага поїзда, кН ; W — повний питомий опір руху при швидкості тривалого режиму, н/кН ; i — величина ухилу, $\%$; V — швидкість тривалого режиму, м/с ; k — коефіцієнт використання потужності

$$k = \frac{P_\partial}{P_e}, \quad (8.8)$$

де P_∂ — потужність електровоза на ободі коліс при тривалій швидкості.

Це співвідношення справедливо для потужності електровоза при русі на підйомі й не може бути збільшена більше номінальної

Для оцінки ємності накопичувача можна використовувати статистичні дані про режими роботи електровоза під час робочої зміни. Це показники роботи у вигляді розподілу відносного часу роботи залежно від дотичної потужності або потужності на ободі колеса.

Приймаючи за одиницю дотичну потужність тривалого режиму, визначимо коефіцієнт завантаження двигунів електровоза по дотичній потужності

$$\psi_k = \frac{\sum_{i=1}^n P_i \tau_i}{P_\partial \left(\sum_{i=1}^n \tau_i T_{xx} \right)} = \sum_{i=1}^n \overline{P_i \tau_i}, \quad (8.9)$$

де P_i , τ_i — дотична потужність і час одиничного режиму; T_{xx} — час роботи на холостим ходу.

Періодичність виконання різних робіт електровозом під час зміни визначається вираженням

$$T = \sum_{i=1}^n \tau_i + T_{xx}. \quad (8.10)$$

Очевидно, при спостереженні за роботою під час зміни електровоза величина T є випадковою й може бути визначена лише з деяким ступенем вірогідності, однак для оцінки енергоємності накопичувача не потрібно великої точності у визначенні T , тому що величину енергоємності для забезпечення виконання тягових операцій потрібно вибирати із запасом 20-30%. Енергоємність накопичувача якщо розміщати на електровозі обмежена ваговими й габаритними параметрами. Тому доцільно визначити мінімальну енергоємність накопичувача, необхідну для виконання певного виду робіт електровозом для того, щоб оцінити технічні можливості його застосування. Енергія, витрачена електровозом на ободі коліс при виконанні циклу робочих операцій, визначається зі співвідношення:

$$E_k = \psi_k P_o T_u \left(\sum_{i=1}^n \bar{\tau}_i + \bar{\tau}_{xx} \right), \quad (8.11)$$

де τ_i , τ_{xx} — відносний час роботи під навантаженням і на холостим ходу.

Енергія, що повинен виробляти електродвигун для виконання циклу робочих операцій за час робочої зміни, буде дорівнює:

$$E_e = \psi_k P_o T_u \left(\sum_{i=1}^n \frac{\bar{\tau}}{K_i} + \bar{\tau}_{xx} \frac{B_{xx}}{B_u} \right), \quad (8.12)$$

де $\frac{B_{xx}}{B_u}$ — відносна витрата енергії електровозом на холостим ходу; K_i — коефіцієнт використання потужності на i -ом режимі.

Допустимо, є накопичувач енергії, здатний віддавати енергію на тягу в тривалому режимі й сприймати енергію гальмування. Позначимо кількість енергії, виробленої на ободах коліс при гальмуванні за час прийнятого циклу $E_{кинT}$:

$$E_{кинT} = \sum_{i=1}^m E_{кинi} \text{ ,} \quad (8.13)$$

де $E_{кин i}$ — кількість енергії, вироблена на ободі коліс при рекуперації на i -ї ділянці.

З урахуванням втрат при передачі енергії від обода коліс до накопичувача одержимо:

$$E_{кинT} = \sum_{i=1}^m E_{кинi} \cdot \eta_{ni} \text{ ,} \quad (8.14)$$

де $\eta_{ni} = \frac{E_{ni}}{E_{кинi}}$ — ефективність передачі енергії від обода коліс до накопичувача.

З урахуванням енергії гальмування одержимо:

$$E_{em} = E_e - E_{кинT} \text{ .}$$

Необхідна середня потужність тягових двигунів буде

$$P_{em} = \frac{E_{em}}{T_{\psi}} = \psi_k P_{\phi} \left(\sum_{i=1}^n \frac{\bar{\tau}}{K_i} + \bar{\tau}_{xx} \frac{B_{xx}}{B_n} \right) - T_{\psi} \sum_{i=1}^{m-1} E_{кинi} \cdot \eta_{ni} \text{ .} \quad (8.15)$$

Необхідна енергія накопичувача може бути визначена по співвідношенню :

$$E_n = P_{\phi} T_{\psi} \sum_{i=1}^{i=n} \frac{(\bar{P}_i - \psi) \bar{\tau}_i}{\eta_{ni}} \text{ , при } \bar{P}_i > \psi \text{ и } E_n \geq E_{кинi \max} \quad (8.16)$$

де $\eta'_{ni} = \frac{E_{ki}}{E_i}$ — коефіцієнт ефективності передачі енергії від накопичувача до обода коліс. $E_{кин\ i\ max}$ — максимальна величина поверненої кінетичної енергії гальмування.

Економічна ефективність застосування накопичувачів енергії залежить від ціни накопичувача, ефективності накопичувача в циклі заряд - розряд, ваги - габаритних показників, вартості обслуговування при експлуатації.

Очікуваний ефект залежить від характеристик накопичувача по енергоемності, ефективності рекуперації енергії гальмування й ступені повернення накопиченої енергії на тягу. З огляду на втрати в тяговій передачі й у накопичувачі, ступінь використання енергії накопичувача може перебувати в межах від 0,6 до 0,75. Крім того, техніко-економічний ефект істотно залежить від вартості накопичувача.

В И С Н О В О К

При виконанні НДР 2007 - 2008 року отримані наступні результати:

- Розроблено математичні моделі для оцінки взаємоіндуктивності з обмотками енергоприймача, впливу на взаємоіндуктивність зміщення енергоприймача від штатного положення, затрат провідникових матеріалів, втрат потужності в проводах мережі.
- Розроблено кілька нових конструкцій енергоприймачів, більш ефективних в порівнянні з існуючими. Один з енергоприймачів зроблено з двох пар секцій з магнітопроводами з фериту. Також розроблено дві конструкції енергоприймачів, які забезпечують роботу електровозів як на прямих ділянках тягової мережі, так і на ділянках з розгалуженнями та перетинаннями проводів тягової мережі, що дозволить підвищити ефективність системи електропостачання.
- В розробці нових конструкцій тягової мережі використаний принцип коаксіального розміщення проводів. Це дозволить відмовитися від повдовжньої ємнісної компенсації реактивного опору кола з використанням дорогих конденсаторів, що включаються в ланцюг обмотки енергоприймача для забезпечення в ній режиму резонансу напруги.
- Живлення тягової лінії від джерела напруги раціонально застосовувати при незмінному і достатньо малому навантаженні ($k_{ia} = 0,1$). Забезпечити експлуатацію системи з максимальним значенням ККД при цьому неможливо, тому що система стає нестійкою при відповідних максимуму ККД коефіцієнтах навантаження.
- Для зменшення впливу магнітного поля на «сторонні» провідні кола пропонується конструкція мережі, в якій прямий і зворотний проводи взаємно перетинаються, утворюють котушки прямокутної форми.

Конструкція енергоприймача складається з окремих секцій, кожна з яких має відкритий магнітопровід з вкладеною обмоткою.

- Працездатність системи електропостачання двигунів електровозу забезпечується тільки при компенсації індуктивних опорів тягової мережі та обмотки енергоприймача, наприклад, за допомогою увімкнених послідовно конденсаторів.
- Живлення тягової лінії від джерела струму раціонально застосовувати при змінному навантаженні у межах від $k_{ia}=0$ до $k_{ia}=0,6\div 0,7$. При цьому є можливість забезпечити експлуатацію системи при максимальному значенні ККД і досить високому розмірі потужності на виході обмотки енергоприймача.
- Розроблена методика розрахунку параметрів вузла «тягова мережа – енергоприймач», яка базується на отриманих графічних співвідношеннях, для забезпечення найбільшого значення коефіцієнта корисної дії при зменшенні втрат електричної енергії та витрат провідникових матеріалів.
- Визначена споживана потужність при роботі електровозів. Дано опис системи електропостачання пересувних електроспоживачів з індуктивною передачею енергії з позиції балансу потужності.
- Надана оцінка енергетичним показникам комплексу електроустаткування електровоза при застосуванні в системі електропостачання кінетичного акумулятора електричної енергії та ємнісних накопичувачів електричної енергії в системі електропостачання.

Наукове значення роботи полягає в дослідженні питань вибору з розроблених конструктивних вузлів обладнання системи електропостачання з енергозберігаючими параметрами та розглянути

питання електромагнітної сумісності для будь-яких режимів роботи та умов експлуатації.

Практичне значення отриманих результатів.

Отримана нова конструкція мережі, в якій прямий і зворотний проводи взаємно перетинаючись, утворюють котушки прямокутної форми. Магнітні поля сусідніх котушок взаємно протилежні, тому сумарна е.р.с. що наводиться в протяжному "сторонньому" колі буде близька до нуля. Конструкція енергоприймача складається з окремих секцій, кожна з яких має відкритий магнітопровід з вкладеною обмоткою. Обмотки сусідніх секцій, число яких вибрано парним, сполучені між собою послідовно - зустрічно. З цієї причини, е.р.с. від магнітного поля енергоприймача в «сторонніх» колах також наближається до нуля.

Розроблено кілька нових конструкцій енергоприймачів, більш ефективних в порівнянні з існуючими. Один з енергоприймачів зроблено з двох пар секцій з магнітопроводами з фериту. Також розроблено дві конструкції енергоприймачів, які забезпечують роботу електровозів як на прямих ділянках тягової мережі, так і на ділянках з розгалуженнями та перетинаннями проводів тягової мережі, що дозволить підвищити ефективність системи електропостачання.

Живлення тягової лінії від джерела струму раціонально застосовувати при змінному навантаженні у межах від $k_{i\dot{a}} = 0$ до $k_{i\dot{a}} = 0,6 \div 0,7$. При цьому є можливість забезпечити експлуатацію системи при максимальному значенні ККД і досить високому розмірі потужності на виході обмотки енергоприймача.

В розробці нових конструкцій тягової мережі використаний принцип коаксіального розміщення проводів. Це дозволить відмовитися від повдовжньої ємнісної компенсації реактивного опору кола з використанням дорогих конденсаторів, що включаються в ланцюг

обмотки енергоприймача для забезпечення в ній режиму резонансу напруги.

Розглянуті складові енергії в живленні системи електропостачання пересувних споживачів: зарядна, обмінна і передавана. Показано, що основний енергетичний процес визначається зарядною і передаваною складовими енергії. Обмінна енергія залежить від початкового розладу стану резонансу напруг в силових електричних контурах. Зарядну енергію в тяговій мережі необхідно обов'язково враховувати в аналізі аварійних ситуацій та режимів.

Виконано оцінку енергетичних показників накопичувача енергії на ультраконденсаторах (випускаються промисловістю). Розраховано час зарядки й розрядки, маса габаритні параметри. Визначено припустиму кількість батарей у зборці залежно від часу зарядки й припустимої потужності, яку видасть на електроспоживач. Розглянуто дві структурні схеми відбору потужності із двигунів електровоза для зарядки накопичувача енергії на ультраконденсаторах.

Проаналізовано різні технічні рішення й застосування електромеханічного накопичувача енергії на високочастотних електровозах для шахт. Проведено аналіз енергетичних можливостей електромеханічних накопичувачів. Розглянуто варіант із включення накопичувача енергії в ланцюг ротора й статора електродвигуна електровоза з використання енергії гальмування.

Матеріали НДР використані в друкарських працях:

1. Патент України № 79544 „ Пристрій для енергопостачання транспортного засобу ” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, С.В.Дибрін // (25.06.2007 Бюл. № 9)

2. Патент України № 24829 „Пристрій електропостачання для живлення транспортного засобу” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // (10.07.2007 Бюл. № 10)

3. Патент України № 25152 Пристрій безконтактного електроживлення транспортного засобу // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // (25.07.2007 Бюл. № 11)

4. Патент України №25155 „ Пристрій для безконтактного енергопостачання транспортного засобу ” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, С.В.Дибрін // (25.07.2007, Бюл. №11);

5. Патент України №79861 „Пристрій для безконтактної передачі енергії на рухомий об’єкт” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // (25.07.2007, Бюл. №11);

6. Патент України №79862 „Пристрій для безконтактного електроживлення транспортного засобу” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // (25.07.2007. Бюл. №11);

7. Патент України №79879 „ Пристрій для безконтактного енергопостачання транспортного засобу ” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, С.В.Дибрін // (25.07.2007. Бюл. №11);

8. Патент України №25814 „ Обладнання для енергопостачання транспортного засобу ” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, С.В.Дибрін // (27.08.2007. Бюл. №13);

9. Патент України №80185 „Пристрій електропостачання для живлення транспортного засобу” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // (27.08.2007, Бюл. №13);

10. Патент України №80186 „ Тягова мережа системи електропостачання з безконтактною передачею енергії на електровози (варіанти)” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко // (27.08.2007, Бюл. №13);

11. Патент України №27896 „Тягова мережа в системі електропостачання з безконтактною передачею енергії на електровози ” // Г.Г.Півняк, М.Г.Поляков, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко // (26.11.2007, Бюл. №19);

12. Патент України №27897 „Тягова мережа для безконтактного живлення електровозів ” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко // (26.11.2007, Бюл. №19);

13. Патент України №28190 „ Тягова мережа для безконтактного живлення електровозів ” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко // (26.11.2007, Бюл. №19);

14. Патент України №65929 „ Енергоприймач безконтактного електровоза ” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, І.Б.Кольцов // (26.11.2007, Бюл. №19);

15. Патент України №80963 „ Енергоприймач безконтактного електровоза ” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, С.В.Дибрін // (26.11.2007. Бюл. №19);

16. Патент України №81018 „ Тягова мережа для безконтактного живлення електровозів (варіанти)” // Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко // (26.11.2007, Бюл. №19);

17. Патент на корисну модель 29256 Україна, МПК(2006) H02 J3/18. Тягова мережа в системі електропостачання з безконтактною передачею енергії на електровози / Г.Г.Півняк, М.Г.Поляков, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко, // Промислова власність, 10.01.2008, бюл.№1.

18. Методика розрахунку параметрів тягової мережі струму підвищеної частоти / Рибалко А.Я. // Сб. науч. тр. НГУ. – Дніпропетровск: РВК НГУ. - 2008. - № 31. – С. 182-190

19. Живлення тягової мережі системи електропостачання пересувних споживачів / Рибалко А.Я. // Сб. науч. тр. НГУ. – Дніпропетровск: РВК НГУ. - 2008. - № 30. – С. 223-230.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. А.с. № 770870 СССР, Кл. В60L 5/40, В60M 7/00. Устройство для энергоснабжения бесконтактного транспортного средства / М.В.Чашко, С.В. Кисляков, Ю.Н.Мельников // Бюл. № 38, 1981.
2. А.с. № 1546302 А1 СССР, Кл. В60L 5/00. Устройство бесконтактного энергоснабжения транспортного средства / М.В.Чашко, Н.Н.Следь, К.И.Чабаненко и др. // Бюл. № 8, 1980.
3. Патент № 79862 С2 UA, кл. В60L 5/00. Пристій безконтактного електроживлення транспортного засобу / Г.Г.Півняк, В.І.Панченко, А.Я.Рибалко та ін. // Бюл. № 11, 2007.
4. Конторович И.И. Операционное исчисление и процессы в электрических цепях.- М.: Советское радио.- 1975. - 319 с.
5. А.с. № 854767 СССР, Кл. В60L 5/38. Устройство для бесконтактного энергоснабжения транспортного средства / Ю.П.Швец, В.А.Смахтин, В.И.Агафонов // Бюл. № 30, 1981.
6. А.с. № 1143622 СССР, Кл. В60L 5/00. Устройство для бесконтактного энергоснабжения транспортного средства / М.В.Чашко, Н.Н.Следь, К.И.Чабаненко и др. // Бюл. № 9, 1985.
7. Говорков В.А. Электрические и магнитные поля.- М.: Энергия. - 1968.- 488 с.
8. Калантаров П.А., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей.- Л.: Энергия.- 1970.- 415 с.
9. Немцов М.В. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности.- М.: Энергоатомиздат.- 1989.- 192 с.
10. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Ч.1.- М.-Л.: Энергия, 1966.- 522 с.
11. Никольский В.В. Теория электромагнитного поля.- М.: Высшая школа, 1964.- 384 с.
12. Отчет о НИР «Определение закономерностей пространственного распределения зоны индукции между тяговой сетью и энергоприемником рудничного бесконтактного электровоза». Тема ГП-227, Днепропетровск, 1998.
13. Отчет о НИР «Развитие теории рационального преобразования электроэнергии в системах электроснабжения передвижных

- электропотребителей с индуктивным подводом электроэнергии». Тема ГП-246, Днепропетровск, 2000.
14. Розенфельд В.Е., Староскольский Н.А. Высокочастотный бесконтактный электрический транспорт. - М.: Транспорт, 1975.- 208 с.
 15. Гулиа Н.В. Маховичные двигатели. М.: Машиностроение, 1976.
 16. Джента Д. Накопление кинетической энергии / Пер. с англ. под ред.
 17. Накопители энергии / Д.А. Бут, Б.Л. Алиевский, С.Р. Мизюрин, П.В. Васюкевич; Под ред. Д.А. Бута. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 400с.
 18. Проблемы создания кинетических аккумуляторов электрической энергии А.Н. Ледовский, П.И. Литвинов, М.Э. Новиков и др // Электричество. 1978. № 3. с. 41-44
 19. А.с. № 542666 СССР. Устройство для передачи электроэнергии транспортному экипажу/ Б.А. Делекторский, В.И. Кривенцов, В.Т. Морозовский// Бюл. № 2, 1977.
 20. А.с. № 1516389 СССР. Локомотив с аккумулятором энергии в виде вращающегося маховика/А.Л. Западинский, С.Е. Старчук, И.А. Карев// Бюл. № 39, 1989.
 21. Патент № 47832 UA. Транспортний засіб/ В.О. Дзензерський, І.І. Соколовський, М.Я. Житник// Дата набуття чинності 15.09.2004.
 22. Куцевалов В.М. Асинхронные и синхронные машины с массивными роторами. – М.: Энергия, 1979. – 160 с.
 23. Вербовой А.П., Вербовой П.Ф. Асинхронные двигатели для интенсивных динамических режимов работы// Электропанорама. 2002. №12. с. 24-28.
 24. Специальные электрические машины/ А.И. Бертинов, Д.А. Бут, С.Р. Мизюрин и др. М.: Энергоиздат, 1982.
 25. Манн Э.Г. Тиунчик В.М. Кольцевые инерционные аккумуляторы// Электричество. 1986. №4. с.19-24.
 26. Электрификация горного производства: Учебник для вузов: В 2-х т./ Г.Г.Пивняка, Л.А.Пучкова, А.В.Ляхомский, Л.А.Плащанский, Н.И.Чеботаев, В.И.Щуцкий, В.П.Шкрабец, В.Т.Заика, Ю.Т.Разумный, А.Я.Рыбалко; Под ред Л.А.Пучкова и Г.Г.Пивняка. - М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2007. - Т. 1. 2. – 511с., 595с.

Національний гірничий університет**ВИТЯГ З ПРОТОКОЛУ № 3**

засідання секції науково-технічної за науковим напрямом "Проблеми гірничої та металургійної електроенергетики, енергозбереження"

м. Дніпропетровськ

9 грудня 2008 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., Рибалко А.Я.

СЛУХАЛИ: інформацію відповідального виконавця теми ГП-397 проф. Рибалко А.Я. про виконання науково-дослідної роботи ГП-397 "ЕНЕРГО-ЗБЕРІГАЮЧА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПЕРЕСУВНИХ СПОЖИВАЧІВ З ІНДУКТИВНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ". Доповідач виклав отримані результати при виконанні етапу «Баланс потужності системи електропостачання пересувних електроспоживачів з індуктивною передачею енергії при використуванні енергозберігаючого обладнання і енергоакумуляторів» 2008 року:

Розроблена методика розрахунку параметрів вузла «тягова мережа – енергоприймач», яка базується на отриманих графічних співвідношеннях, для забезпечення найбільшого значення коефіцієнта корисної дії при зменшенні втрат електричної енергії та витрат провідникових матеріалів.

Досліджено кілька нових конструкцій енергоприймачів, більш ефективних в порівнянні з існуючими. Один з енергоприймачів зроблено з двох пар секцій з магнітопроводами з фериту. Також розроблено дві конструкції енергоприймачів, які забезпечують роботу електровозів як на прямих ділянках тягової мережі, так і на ділянках з розгалуженнями та перетинаннями проводів тягової мережі, що дозволить підвищити ефективність технологічного використання системи електропостачання.

Визначена споживана потужність при роботі електровозів. Дано опис системи електропостачання пересувних електроспоживачів з індуктивною передачею енергії з позиції балансу потужності. Розглянуті складові енергії в живленні системи електропостачання пересувних споживачів: зарядна, обмінна і передавана. Показано, що основний енергетичний процес визначається зарядною і передаванню складовими енергії. Обмінна енергія залежить від початкового розладу стану резонансу напруг в силових електричних контурах. Зарядну енергію в тяговій мережі необхідно обов'язково враховувати в аналізі аварійних ситуацій та режимів.

Виконано оцінку енергетичних показників накопичувача енергії на ультраконденсаторах (випускаються промисловістю). Розраховано час зарядки й розрядки, маса габаритні параметри. Визначено припустиму кількість батарей у зборці залежно від часу зарядки й припустимої потужності, яку видасть на електроспоживач. Розглянуто дві

структурні схеми відбору потужності із двигунів електровоза для зарядки накопичувача енергії на ультраконденсаторах.

Проаналізовано різні технічні рішення й застосування електромеханічного накопичувача енергії на високочастотних електровозах для шахт. Проведено аналіз енергетичних можливостей електромеханічних накопичувачів. Розглянуто варіант із включення накопичувача енергії в ланцюг ротора й статора електродвигуна електровоза з використання енергії гальмування.

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

За матеріалами теми отримано 1 патент та 8 позитивних рішень на видачу патентів і надруковано 2 статті.

План роботи поточного року виконаний повністю.

ВИСТУПИЛИ: Проф. Казачковський М.М., який дав позитивну оцінку результатам виконаної роботи. Відзначив, що отримані результати відповідають етапам календарного плану і технічному завданню на НДР. В роботі досягнута поставлена ціль.

Професор Казачковський М.М. рекомендував звіт по НДР затвердити.

УХВАЛИЛИ:

1. Виконаний етап теми за 2008 р. відповідає календарному плану, програмі і 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.

Голова секції,
професор

О.Б. Іванов

Вчений секретар секції,
доцент

А.В. Рухлов

ВИТЯГ З ПРОТОКОЛУ № 12

засідання кафедри систем електропостачання

м. Дніпропетровськ**23 грудня 2008 р.**

ПРИСУТНІ: Заст. зав. кафедрою професор Випанасенко С.І., професори : Разумний Ю.Т., Трифонов В.Д.; доценти: Корольов А.М., Хованська О.І., Ольшевський Г.С., Бажин Г.М.; асистенти: Лисенко О.Г., Рухлова Н.Ю., Хацкевич Ю.В., Дибрін С.В., Прокуда В.М., Румянцев А.С.,

СЛУХАЛИ: Інформацію виконавця теми ГП-397 ас. Дибріна С.В. про виконання науково-дослідної роботи ГП-397 ” ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ПЕРЕСУВНИХ СПОЖИВАЧІВ З ІНДУКТИВНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ”. Доповідач виклав отримані результати при виконанні етапу :”Баланс потужності системи електропостачання пересувних електроспоживачів з індуктивною передачею енергії при використуванні енергозберігаючого обладнання і енергоакумуляторів” 2008 року:

Розроблена методика розрахунку параметрів вузла «тягова мережа – енергоприймач», яка базується на отриманих графічних співвідношеннях, для забезпечення найбільшого значення коефіцієнта корисної дії при зменшенні втрат електричної енергії та витрат провідникових матеріалів.

Досліджено кілька нових конструкцій енергоприймачів, більш ефективних в порівнянні з існуючими. Один з енергоприймачів зроблено з двох пар секцій з магнітопроводами з фериту. Також розроблено дві конструкції енергоприймачів, які забезпечують роботу електровозів як на прямих ділянках тягової мережі, так і на ділянках з розгалуженнями та перетинаннями проводів тягової мережі, що дозволить підвищити ефективність технологічного використання системи електропостачання.

Визначена споживана потужність при роботі електровозів. Дано опис системи електропостачання пересувних електроспоживачів з індуктивною передачею енергії з позиції балансу потужності. Розглянуті складові енергії в живленні системи електропостачання пересувних споживачів: зарядна, обмінна і передавана. Показано, що основний енергетичний процес визначається зарядною і передаванню складовими енергії. Обмінна енергія залежить від початкового розладу стану резонансу напруг в силових електричних контурах. Зарядну енергію в тяговій мережі необхідно обов’язково враховувати в аналізі аварійних ситуацій та режимів.

Виконано оцінку енергетичних показників накопичувача енергії на ультраконденсаторах (випускаються промисловістю). Розраховано час зарядки й розрядки, маса габаритні параметри. Визначено припустиму кількість батарей у зборці залежно від часу зарядки й припустимої потужності, яку видасть на електроспоживач. Розглянуто дві структурні схеми відбору потужності із двигунів електровоза для зарядки накопичувача енергії на ультраконденсаторах.

Проаналізовано різні технічні рішення й застосування електромеханічного накопичувача енергії на високочастотних електровозах для шахт. Проведено аналіз енергетичних можливостей електромеханічних накопичувачів. Розглянуто варіант із

включення накопичувача енергії в ланцюг ротора й статора електродвигуна електровоза з використання енергії гальмування.

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

За матеріалами теми отримано 1 патент та 8 позитивних рішень на видачу патентів і надруковано 2 статті.

План роботи поточного року виконаний повністю.

ВИСТУПИЛИ: Доц. Хованська О.І. та проф. Разумний Ю.Т. 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 Разумний Ю.Т. рекомендував звіт по НДР затвердити, а також продовжити фінансування роботи в 2009 р.

УХВАЛИЛИ:

1. Виконані етапи теми за 2008 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. кафедрою,
професор

С.І. Випанасенко

Вчений секретар,
асистент

Ю.В. Хацкевич

НАЦІОНАЛЬНИЙ ГІРНИЧИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ЗАТВЕРДЖУЮПроректор з наукової роботи
д-р техн. наук, проф.

_____ О. С. Бешта

" ___ " _____ 2008 р.

**ЗВІТ
про патентні дослідження**

19.12.2008 р. № 1

(дата)

Тема ГП-397 „Енергозберігаюча система електропостачання пересувних (найменування, шифр
теми)споживачів з індуктивною передачею енергії,Етап „Баланс потужності системи електропостачання пересувних електроспоживачів з
індуктивною передачею енергії при використуванні енергозберігаючого обладнання і
енергоакумуляторів”**Начальник НДЧ**

канд. техн. наук, доц.

О. Є. Хоменко**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

Відповідальний виконавець теми,
пров.наук.співробітник, канд.техн.наук,
професор

А.Я.Рибалко
(всі розділи)

Науковий співробітник,
доцент

В.І.Панченко
(всі розділи)

Науковий співробітник,
асистент

І.Б.Кольцов
(всі розділи)

ЗАГАЛЬНІ ДАНІ ПРО ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Організація (підприємство) - виконавець розробки

Національний гірничий університет

Термін виконання 2007 - 2008 рр.

Призначення, область користування, короткий опис об'єкта.

Об'єкт дослідження відноситься до системи транспорту корисних копалин на 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. Технично - 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	10
Додаток:	
Завдання на проведення патентних досліджень	11
Регламент пошуку	12
Довідка про пошук	13
Довідка про оцінку науково - технічного рівня НДР	14

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 розкручування маховика.	Устройство для передачи электроэнергии транспортному экипажу. Авт.свид.СССР, №542666, авт. Б.А. Делекторский, В.И. Кривенцов, В.Т. Морозовский, Б.И. №2, 1977 г.	Відомостей немає
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. Западинский, С.Е. Старчук, И.А. Карев, Б.И. №39, 1989 г.	Відомостей немає
Ємнісний накопичувач енергії, система заряду конденсатора.	Тяговый электрический привод. Авт.свид.СССР, №564792, авт. Фукуо Шибата, Б.И. №25, 1977 г.	Відомостей немає
Ємнісний накопичувач енергії, система використання енергії гальмування транспорту.	Электропривод транспортного средства. Авт.свид.СССР, №981032, авт. Е.В. Преображенский, Б.И. №46, 1982 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
Система використання енергії гальмування транспорту.	Система електроустаткування транспортного засобу. Патент UA, №2711, авт. Дітяткін І.В., Сидоренко М.Ф., «Промислова власність», Бюл. №7, 2004 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

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		<i>Прототип</i>		Очікуваний результат	Можливість користування в промисловості або іншій сфері діяльності	Номер поданої заявки, дата подачі заявки
Назва	Сукупність ознак	Бібліографічні дані	Сукупність ознак			
Система електропостачання безконтактних електровозів для двоколійної схеми транспортування вантажів.	Тягова мережа з двох кабелів – прямого та зворотного, сполучених між собою в кінці мережі. Обидва кабелі, через проміжні, по довжині мережі в межах кроку транспозиції поперемінно зміщено в горизонтальній площині відносно початкового їх положення. Енергоприймач з магнітопроводом та обмоткою, з'єднаною посередництвом випрямляча з ємнісним накопичувачем енергії і далі з двигунами електровоза.	Кн. Транспорт с индуктивной передачей энергии для угольных шахт. Под ред. Г.Г. Пивняка. – М.: Недра, 1990 г.	Тягова мережа з двох кабелів – прямого та зворотного, сполучених між собою в кінці мережі. По довжині мережі зроблено транспозиції кабелів. Енергоприймач з магнітопроводом та обмоткою, з'єднаною посередництвом випрямляча з двигунами електровозу.	Зменшення майже у два рази витрат провідникового матеріалу на кабелі. Зменшення у два рази ємності конденсаторів у мережі.	В транспортних системах з безконтактною передачею енергії на електровоз, як приклад, в шахтах небезпечних по газу та пилу.	№ А 2008 12065 від 13.10.2008 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
Система електропостачання безконтактних електровозів для двоколісної схеми транспортування вантажів.	Заявка № А 2008 12065 від 13.10.2008 р.	Тягова мережа з двох кабелів – прямого та зворотного, сполучених між собою в кінці мережі. Обидва кабелі, через проміжні, по довжині мережі в межах кроку таранспозиції поперемінно зміщено в горизонтальній площині. Енергоприймач з магнітопроводом та обмоткою, з'єднаною посередництвом випрямляча з ємнісним накопичувачем енергії і далі з двигунами електровоза.	Зменшення майже у два рази витрат провідникового матеріалу на кабелі. Зменшення у два рази ємності конденсаторів у мережі.

ВИСНОВКИ

Патентні дослідження стосовно системи електропостачання рухомих об'єктів з індуктивною передачею енергії на них дають привід стверджувати:

1. Результатом науково – дослідницької роботи стали нові технічні рішення, які стосуються збільшення ефективності роботи системи електропостачання безконтактних електровозів для двоколіїної системи транспортування вантажів (заявки № а 2008 12065 від 13.10.2008 р. на конструктивну схему системи електропостачання).
2. ОГД має НОУ – ХАУ що до вибору параметрів системи електропостачання рухомих об'єктів з індуктивною передачею енергії, яка забезпечує зменшення витрат провідникового матеріалу та зменшення ємності конденсаторів у тяговій мережі.
3. ОГД включає нові технічні рішення, НОУ – ХАУ і по основних показниках не має аналогів в Україні та у світі.
4. Результати НДР по основних показниках перевищують світовий рівень науки та техніки.

ЗАТВЕРДЖУЮ
Проректор з наукової роботи
д-р техн. наук, проф.

_____ О. С. Бешта

" ____ " _____ 2008 р.

Завдання
на проведення патентних досліджень

по темі: ГП-397 „Енергозберігаюча система електропостачання пересувних споживачів з індуктивною передачею енергії.”

Етап „Баланс потужності системи електропостачання пересувних електроспоживачів з індуктивною передачею енергії при використуванні енергозберігаючого обладнання і енергоакумуляторів”

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	Рибалко А.Я., Панченко В.І., Кольцов І.Б.	4 квартал 2008 р.	Довідка про пошук Форма Г1.1
1.1. ТЕПО НДР	Кафедра СЕП	Рибалко А.Я., Панченко В.І., Кольцов І.Б.	4 квартал 2008 р.	Форма Г.1.4
1.2. Аналіз новизни, рівня винахідництва і промислової придатності	Кафедра СЕП	Рибалко А.Я., Панченко В.І., Кольцов І.Б.	4 квартал 2008 р.	Форма Г.1.5
2. Аналіз можливості застосування в ОГД відомих об'єктів промислової власності	Кафедра СЕП	Рибалко А.Я., Панченко В.І., Кольцов І.Б.	4 квартал 2008 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 :”Енергозберігаюча система електропостачання пересувних споживачів з індуктивною передачею енергії ”

Шифр теми: ГП-397

Етап : ”Баланс потужності системи електропостачання пересувних електроспоживачів з індуктивною передачею енергії при використуванні енергозберігаючого обладнання і енергоакумуляторів”

Номер, дата завдання на проведення патентних досліджень № 1

Обґрунтування регламенту пошуку:

1. Визначення патентної ситуації.

Початок пошуку 01.06.2008 р. Закінчення пошуку 29.12.2008 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
Система електропостачання рухомих об'єктів з індуктивною передачею енергії та використанням енергоакумуляторів.	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.	1970 - 2008	„Бюллетень изобретений”, „Изобретения в СССР и за рубежом”, „Промислова власність”.

Керівник підрозділу – виконавця робіт
д-р техн. наук,
академік НАН України

Г.Г. Півняк

(дата)

Керівник ПЛВ

О.О. Філонова

(дата)

ДОВІДКА ПРО ПОШУК

Завдання на проведення патентних досліджень (пошуку): № 1
(номер)

Етап: Баланс потужності системи електропостачання пересувних електроспоживачів з індуктивною передачею енергії при використуванні енергозберігаючого обладнання і енергоакумуляторів.

Початок пошуку 01.06.2008 р. Закінчення пошуку 29.12.2008 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
Система електропостачання рухомих об'єктів з індуктивною передачею енергії.	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.	„Бюлетень изобретений”, „Изобретения в СССР и за рубежом”, „Промислова власність”.	„Бюллетень изобретений” 1977 №2; „Промислова власність” 2008, №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

_____ (дата)

Керівник ПЛВ

О.О. Філонова

_____ (дата)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Голова секції НТР за науковим
напрямком,
 канд техн. наук, проф.
 _____ О.Б.Іванов
 «__» _____ 2008 р

Д О В І Д К А

про оцінку науково - технічного рівня НДР

Тема ГП-397:” Енергозберігаюча система електропостачання пересувних споживачів з індуктивною передачею 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):

Система електропостачання безконтактних електровозів для двоколісної схеми транспортування вантажів. № а 2008 12065 від 13.10.2008 р., авт. Півняк Г.Г., Панченко В.І., Рибалко А.Я., Кольцов І.Б.

Відомості НОУ - ХАУ: Вибір параметрів системи електропостачання рухомих об'єктів з безконтактною передачею електроенергії та використанням енергоакумуляторів при яких забезпечується зменшення витрат електроенергії.

ЗАГАЛЬНА ОЦІНКА НАУКОВО - ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ НДР

Перевищує сучасний рівень науки та техніки

Керівник ПЛВ

Керівник НДР

_____ О.О. Філонова
 «__» _____ 2008 р.

_____ Г.Г. Півняк
 «__» _____ 2008 р.

РЕЦЕНЗІЯ

на звіт 2007 - 2008 рр. по НДР ГП-397

«Енергозберігаюча система електропостачання пересувних споживачів з індуктивною передачею енергії».

Представлена на рецензію робота - це дослідження з вдосконалювання й розробки елементів системи електропостачання підземного транспорту з безконтактною передачею енергії на пересувний об'єкт через індуктивний зв'язок. Напрямок дослідницької роботи - включення в систему електропостачання комплексу транспорту нових елементів з позиції зменшення втрат електричної енергії й витрат провідникових матеріалів.

Отримані наукові результати відбивають спрямованість науково-дослідної роботи. Основні підсумки такі:

1. Запропоновано, як комплексне рішення, застосувати лінійний двигун. З цією метою проведений аналіз відомих конструктивних рішень по лінійних двигунах і теоретично обґрунтована конструкція двигуна, суміщеного з енергоприймачем, що підвищить к.к.д. і зменшить втрати потужності в електродвигуна.

2. В розробці нових конструкцій виконання тягової мережі як найбільш ефективний використаний принцип коаксіального розміщення проводів. Це дозволяє за пропонуваного рішення відмовитись від поздовжньої ємнісної компенсації реактивного опору кола з використанням дорогих конденсаторів, що включаються в ланцюг обмоток для забезпечення в них режиму резонансу напруги.

3. Розглянута зміна конструкції провідників тягової мережі на стрічкові, що посилює ємнісну складову її опору і за цієї умови дає змогу частково усунути використання конденсаторів ємнісної компенсації, змінити параметри перетворення електроенергії живлячої мережі і досягти ефекту електрозбереження.

4. Проаналізовані складові енергії в живленні системи електропостачання пересувних споживачів: зарядна, обмінна і передавана. Показано, що основний енергетичний процес живлення електровозів визначається зарядною для тягової мережі і передаваною електровозам складовими енергії.

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

Розроблені нові пропонувані елементи системи електропостачання захищені патентами.

Матеріал, викладений у звіті, дає можливість використовувати його у виборі нових параметрів для енергозберігаючої системи електропостачання транспорту з індуктивною передачею енергії електровозам. Дані рекомендації з використання результатів у нормативній і проектній документації.

Результати, викладені у звіті, мають наукове й практичне значення й рекомендуватися до використання в обґрунтуванні нових рішень в проектних робіт. Рекомендується схвалити звіт за 2007- 2008 рр. і продовжити дослідження у даному напрямку.

Завідувач кафедри
метрології та інформаційно -
вимірювальних технологій, НГУ України,
д.т.н., професор

В.І. Корсун

РЕЦЕНЗІЯ**на звіт 2007 - 2008 рр. по НДР ГП-397
«ЕНЕРГОЗБЕРІГАЮЧА СИСТЕМА ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
ПЕРЕСУВНИХ СПОЖИВАЧІВ З ІНДУКТИВНОЮ
ПЕРЕДАЧЕЮ ЕНЕРГІЇ».**

Представлена на рецензію робота - це розробка з вдосконалювання підземного транспорту з безконтактною передачею енергії на пересувний об'єкт через індуктивний зв'язок. Проведені дослідження актуальні 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 підсумки цікаві з інженерної й наукової сторін розглянутого завдання. Хочеться відзначити такі результати роботи: отримані графічні співвідношення, для забезпечення найбільшого значення коефіцієнта корисної дії при зменшенні втрат електричної енергії й витрат провідникових матеріалів у вузлі "тягова лінія - електроприймач"; розроблені кілька нових конструкцій енергоприймачів більше ефективних щодо існуючих (один з енергоприймачів зроблений із двох пар секцій з магнітопроводами з ферриту, що дає можливість працювати електровозу на прямих ділянках тягової мережі й на ділянках з розгалуженнями); описана система електропостачання пересувних електроспоживачів з індуктивною передачею енергії з позиції балансу потужності; розглянуті складові енергії в живленні системи електропостачання пересувних споживачів: зарядна, обмінна й передана; виконана оцінка енергетичних показників накопичувача енергії на ультраконденсаторах і розглянуто дві схеми відбору потужності для зарядки ультраконденсаторів; проаналізовано різні технічні рішення в застосуванні електромеханічного накопичувача енергії на електровозі. Нові результати захищені патентами.

Матеріал, викладений у звіті, дає можливість щодо вдосконалювання комплексу обладнання підземного транспорту з позиції енергозберігаючих елементів у системі електропостачання. Рекомендується використовувати результати у розробці проектної й нормативної документації.

Результати, викладені у звіті, мають наукове й практичне значення й можуть бути використані для вдосконалювання комплексу електрообладнання транспорту. Рекомендується схвалити звіт за 2007 - 2008 рр. і продовжити дослідження в даному напрямку.

Директор "Дніпровського гірничого
наукового центра" Академії гірничих
наук України,
д-р тех. наук, професор

Ю.Т.Разумний

УТВЕРЖДАЮ
Главный инженер
ГООА институт «Днепрогипрошахт»

_____ Недолужко В.Н.

«__» _____ 2008 г.

АКТ

о внедрении результатов научно-исследовательской работы НГУ, № ГП-397
«ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
ПЕРЕДВИЖНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ С ИНДУКТИВНОЙ ПЕРЕДАЧЕЙ
ЭНЕРГИИ» (№ г.р. 0107U000379, научный руководитель академик НАН
Украины, д-р техн. наук, профессор Пивняк Г.Г., отв. исп. канд. техн. таук,
профессор Рыбалко А.Я.)

Научно-исследовательская работа ГП-397 – это продолжение развития 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 совершенствование элементов системы электроснабжения с позиции энергосбережения и материалоемкости.

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.

Несколько новых конструкций энергоприемников, более эффективных в сравнении с эксплуатировавшимся. Один из энергоприемников сделан с двух пар секций с магнитопроводами из феррита. Витки обмоток соседних секций соединены между собой встречно. Магнитопровода оборудованы полюсными наконечниками. Энергоприемник обеспечивает увеличение взаимоиндуктивности с тяговой сетью и повышает уровень безопасности при эксплуатации бесконтактного электровоза. Также разработано две конструкции энергоприемника, которые обеспечивают работу электровозов как на прямых участках тяговой сети, так и на участках с разветвлениями и пересечениями проводов тяговой сети, которая разрешит повысить эффективность системы электроснабжения. При работе на прямых участках тяговой сети конструкции энергоприемников обеспечивают значительный уровень взаимоиндуктивности с тяговой сетью, что позволяет, или уменьшить ток в сети, или изменением схемы включения витков обмотки энергоприемника уменьшить потери мощности в обмотке.

Предложено, как комплексное решение, применить линейный двигатель. С этой целью проведенный анализ известных конструктивных решений по линейным двигателям и теоретически обоснована конструкция двигателя,

совмещенного с энергоприемником. Обмотки двигателя и энергоприемника отдельные, а магнитопровод общий. Для эффективной работы двигателя необходимо усилить магнитный поток тяговой сети, которая вынуждает использовать в ее конструкции магнитопровод, например, из феррита. Использование линейного тягового двигателя разрешит упростить конструкцию электровоза и повысить коэффициент полезного действия системы электроснабжения.

Предлагаемая также новая конструкция сети, в которой прямой и обратный проводы взаимно пересекаясь, образуют катушки прямоугольной формы. Магнитные поля соседних катушек взаимно противоположные, поэтому суммарная э.д.с., что наводится в "постороннем" контуре будет близка к нулю. Конструкция энергоприемника состоит из отдельных секций, каждая из которых имеет открытый магнитопровод с вложенной обмоткой. Обмотки соседних секций, число которых выбрано парным, соединены между собой последовательно - встречно. По этой причине, э.д.с. от магнитного поля энергоприемника в "посторонних" кругах также приближается к нулю.

Разработана новая конструкция ленточной тяговой сети. Которая имеет прямой и обратный проводы, составленные с отдельных, последовательно соединенных между собой участков длиной l , причем каждый участок сделан из ведущих лент: первой длиной $l_1 < l$ и второй, с двух отрезков общей длиной $l_2 < l$, разделенных между собой пластом диэлектрика на промежутках длиной $l_3 < 0,5l_1$. Она отличается тем, что в линию введен первый и второй источники переменного тока, а в каждый участок прямого и обратного провода введена третья ведущая лента отделена от первой ленты пластинами диэлектрика. Ведущие ленты соответствующих участков прямого и обратного проводов соединены между собой ведущей перемычкой, причем, вторые ведущие ленты первых с начала сети участков прямого и обратного провода включены к первому источнику переменного тока, а последних по длине сети участков - оставлено разомкнутыми, а третьи ведущие ленты первых с начала сети участков прямого и обратного проводов включены к второму источнику переменного тока, а последних по длине сети участков - соединены между собой ведущей перемычкой. Введение новых элементов в сравнении с действующими образцами экономит материалы, и потери мощности за счет этого обеспечивается более эффективная работа бесконтактного транспорта.

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.