

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра «Автоматизовані системи електричного транспорту»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для виконання курсового проекту

з дисципліни

«АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ»

і дипломного проектування

для студентів денної та заочної форм навчання

зі спеціальності 7.092201

«Електричні системи та комплекси транспортних засобів»

Харків - 2013

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри «Системи електричної тяги» 22 квітня 2011 р., протокол № 11.

Рекомендуються для студентів спеціальності
«Електричні системи та комплекси транспортних засобів»
усіх форм навчання.

Укладач
доц. С.І. Яцько

Рецензент
доц. О.Д. Супрун

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
для виконання курсового проекту
з дисципліни
«АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ»
і дипломного проектування
для студентів денної та заочної форм навчання
зі спеціальності 7.092201
«Електричні системи та комплекси транспортних засобів»

Відповідальний за випуск Яцько С.І.

Редактор Буранова Н.В.

Підписано до друку 12.05.11 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,5. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

Українська державна академія залізничного транспорту
Механічний факультет

Кафедра «Системи електричної тяги»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

для виконання курсового проектування з дисципліни
«Автоматизація систем електропостачання»
і дипломного проектування
для студентів денної та заочної форм навчання
зі спеціальності 7.092201
«Електричні системи та комплекси транспортних засобів»

Харків 2013

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри «Системи електричної тяги» 22.04.2011 р., протокол № 11.

Рекомендуються для студентів спеціальності «Електричні системи та комплекси транспортних засобів» усіх форм навчання.

Укладач:
доц. С.І. Яцько

Рецензент:
доц. О.Д. Супрун

ЗМІСТ

	Стор
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА	5
1.1 Вступ	5
1.2 Короткий огляд проблеми нерівномірності споживання електричної енергії на тягу електричним рухомим складом	6
1.3 Основні типи накопичувачів електричної енергії та можливість їх застосування в електричній тязі	11
1.3.1 Індуктивні накопичувачі енергії	12
1.3.2 Ємнісні накопичувачі енергії	14
1.3.3 Інерційні механічні енергоакумуючі системи	14
1.3.4 Досвід застосування <i>НЕ</i>	17
1.3.5 Специфіка застосування накопичувачів енергії в електричній тязі	21
1.3.6 Порівняння масогабаритних показників накопичувачів енергії	22
1.4 Особливість побудови систем з механічними накопичувачами електричної енергії та алгоритми їх роботи	25
2 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО КУРСОВОГО ПРОЕКТУ	28
2.1 Вибір принципової схеми інерційного механічного накопичувача енергії (МНЕ)	29
2.2 Вибір ємності МНЕ	30
2.3 Розрахунок маховика	32
2.4 Розроблення структурної схеми підключення механічного накопичувача електричної енергії до контактної мережі	35
2.5 Розроблення структурної схеми системи автоматичного регулювання режимом роботи накопичувача енергії в процесі накопичення та повернення енергії	35
2.6 Розроблення схеми автоматичного регулювання напруги допоміжного генератора	35
2.6.1 Передавальна функція генератора	37
2.6.2 Передавальна функція керованого випрямляча	37
2.6.3 Передавальні функції датчиків струму та напруги	37

2.6.4 Синтез регулятора контуру регулювання струму збудження генератора	38
2.6.5 Синтез регулятора контуру регулювання напруги генератора	39
2.7 Дослідження роботи системи регулювання напруги допоміжного генератора	39
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ	40

1 Загальна частина

1.1 Вступ

За останні 10-12 років практично в усіх країнах світу різко загострилася проблема скорочення енергоспоживання як для економічної системи загалом, так і в електричній тязі на залізничному і міському транспорті.

Специфічна особливість електричного транспорту пов'язана зі значною нерівномірністю споживання електроенергії при русі поїзда, а також з великими втратами електроенергії в системі тягового електропостачання. Особливо велика нерівномірність споживання електроенергії в приміському сполученні і в метро, оскільки в цих видах сполучення електропоїзди мають часті зупинки (в приміському сполученні середня відстань між зупинками звичайно становить 3-5 км, у метрополітенах від 0,6 до 0,7 км, у метрополітенах країн Центральної і Західної Європи від 0,3 до 0,5 км). Тому імпульси споживання електроенергії при пуску і розгоні поїзда чергуються з рухом без струму і з імпульсами повернення енергії в тягову мережу при рекуперативному гальмуванні, так що період енергообміну поїзда з тяговою мережею становить від 4 до 5 хв у приміському сполученні і від 1,2 до 1,5 хв у метрополітені.

Такий несприятливий режим енергоспоживання призводить до вагомих втрат енергії в тяговій мережі постійного струму, в агрегатах тягових підстанцій і в первинній мережі змінного 3-фазного струму. Додаткова складність полягає в тому, що тягові підстанції постійного струму, що є на лініях обслуговування приміського сполучення великих міст і в метрополітенах, обладнані, як правило, тільки випрямними агрегатами, які не забезпечують передачу надмірної енергії рекуперації з тягової мережі в первинну енергосистему.

Для розв'язання цієї проблеми має бути виконана значна реконструкція системи електропостачання, причому можливі технічні рішення зводяться до реалізації одного з двох варіантів:

- встановлення на тягових підстанціях інверторних агрегатів з тиристорними перетворювачами;
- використання на електропоїздах або в системі електропостачання накопичувачів енергії.

Перший варіант технічно найбільш відпрацьовано. Інверторні агрегати для підстанцій випускаються підприємствами електротехнічної промисловості, так що для їх встановлення на підстанціях необхідно лише виконати техніко-економічний розрахунок, щоб визначити, чи окупить повернена в первинну мережу енергія витрати на придбання, монтаж і експлуатацію інверторних агрегатів.

В цьому варіанті вирішується тільки проблема передачі надмірної енергії рекуперації в первинну енергосистему, але залишається невирішеною велика проблема згладжування нерівномірності електроспоживання.

Тому другий варіант, що передбачає установаження накопичувачів енергії, можна вважати більш перспективним, оскільки при цьому вирішуються обидві проблеми, а саме:

- акумулювання при рекуперації електричним рухомим складом надлишкової енергії та подальше її повернення в контактну мережу;
- згладжування нерівномірності електроспоживання.

1.2 Короткий огляд проблеми нерівномірності споживання електричної енергії на тягу електричним рухомим складом

Вдосконалення технічних засобів (електричний рухомий склад, тягові підстанції, контактна мережа), підвищення їх потужності, введення рекуперативного гальмування створює труднощі, зумовлені нерівномірністю споживання електроенергії на тягу. Ця нерівномірність особливо сильно позначається на лініях з інтенсивним приміським рухом і в метрополітенах.

На відміну від умовного режиму ведення електропоїздів приміського руху, в реальних умовах як інтервал між включеннями режиму тяги, так і тривалість самого режиму суттєво різняться. При цьому найбільш ймовірна тривалість включення тяги (до 70%) складає від 10 до 35 с. На рисунку 1.1 та рисунку 1.2, як приклад, наведено статистичні розподіли тривалості режиму тяги за одне включення при русі та безтяговий режим на ділянці ст. Скнилів – ст. Стрий (Львівська залізниця), отримані в

процесі проведення експлуатаційних досліджень електропоїзда ЕПЛ2Т-007.

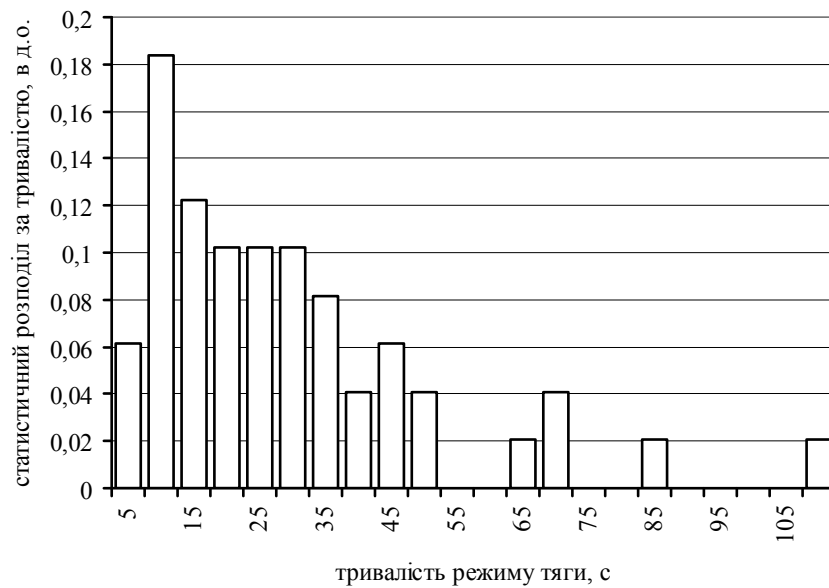


Рисунок 1.1 – Статистичний розподіл тривалості режиму тяги

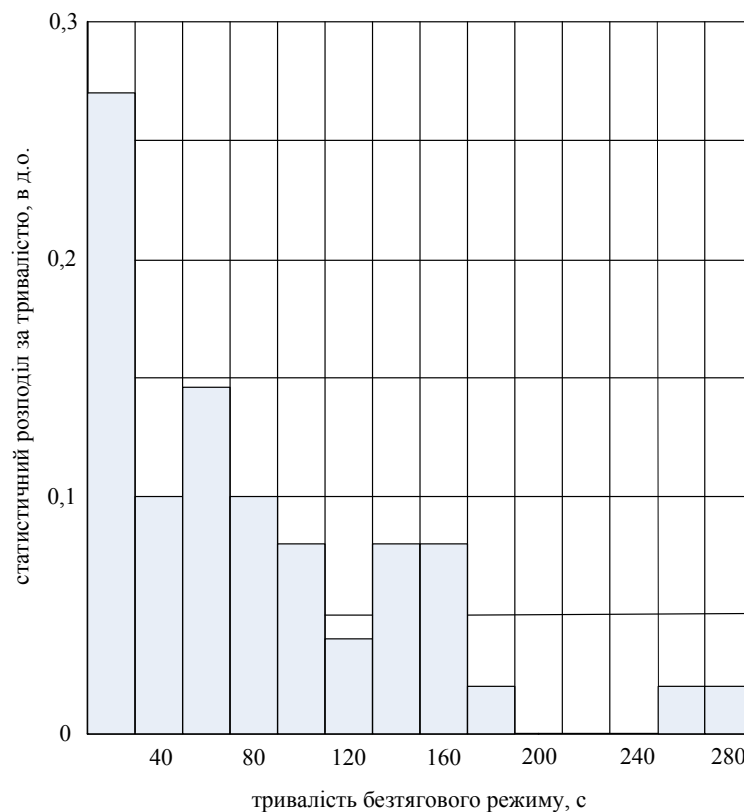


Рисунок 1.2 – Статистичний розподіл тривалості безтягового режиму

Для згладжування нерівномірності можна використати накопичувачі енергії (НЕ). Задача дослідження процесів у си-

стемі електричної тяги постійного струму з різко змінними режимами роботи електропоїздів (приміське сполучення, метрополітен) при установленні НЕ включає дослідження впливу НЕ на енергетичні процеси в системі, визначення функціонального взаємозв'язку параметрів НЕ і показників нерівномірності споживання енергії, обґрунтування методики техніко-економічного розрахунку параметрів НЕ.

Вказана задача на досить високому рівні може бути розв'язана методом імітаційного моделювання на базі математичної моделі електричної залізниці.

Оцінити нерівномірність енергоспоживання можна за допомогою інтегральних показників (таблиця 1.1).

В ідеальному випадку бажано, щоб $\Pi=1$, але звичайно таке рішення недоцільне економічно через підвищення вартості накопичувача.

Місткість накопичувача визначають шляхом техніко-економічного обґрунтування, враховуючи вартість накопичувача і позитивний ефект, що забезпечується ним, який зводиться до таких факторів:

- обмеження граничного значення споживаної потужності на економічно доцільному рівні, оскільки це впливає на величину тарифу з оплати електроенергії;
- зниження втрат електроенергії в лініях електропередачі і в електрообладнаннях підстанцій.

Втрати електроенергії в тяговій мережі (контактна мережа і рейкові ланцюги) в енергоустаткуванні тягових підстанцій і в живильних лініях змінного 3-фазного струму прийнято називати умовними втратами. Для залізниць з контактною мережею постійного струму вони складають 15-25% від споживаної електроенергії на тягу, що майже вдвічі перевищують втрати на залізницях з змінною напругою в контактній мережі. Як ілюстрація зазначеного, на рисунку 1.3 показано значення умовних втрат протягом семи років у часткових одиницях від споживаної електроенергії на тягу та рівень витрат на тягу по залізницях.

Таблиця 1.1 – Інтегральні показники нерівномірності енергоспоживання

1 Коефіцієнт мінімуму (характеризує різницю між потужностями в години пік і в години найменшого енергоспоживання)	$\beta = \frac{P_{\min}}{P_{\max}}$
2 Середньоінтегральний коефіцієнт мінімуму або «пік-фактор» (характеризує відношення максимальної потужності P_{\max} до середньої P_{cp})	$\Pi = \frac{P_{\max}}{P_{cp}} = \frac{P_{\max}}{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T P(t) \cdot dt}$
3 Коефіцієнт заповнення або щільність навантаження (характеризує частку середньої за добу електроенергії по відношенню до середньо-максимальної)	$\gamma = \frac{\int_0^T P(t) \cdot dt}{T \cdot P_{\max}}$
4 Число секунд використання середньомаксимального (найбільшого) навантаження	$T_m = \frac{\int_0^T P(t) \cdot dt}{P_{\max}} = T \cdot \gamma$
5 Діапазон зміни потужностей	$\Delta P = P_{\max} - P_{\min}$
6 Динамічна характеристика графіка енергоспоживання (характеризує швидкість зміни навантаження)	$P_v = \frac{dP}{dt}$
7 Коефіцієнт форми струму або потужності (характеризує відношення діючого значення потужності P_{δ} до її середнього значення P_{cp})	$K_{\phi} = \frac{P_{\delta}}{P_{cp}} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T P^2(t) \cdot dt}}{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T P(t) \cdot dt}$

Мінімум умовних втрат, очевидно, слід очікувати при незмінному (сталому) споживанні струму електричним рухомим складом. Цей режим не є характерним для електричної тяги, для неї характерні різко змінні навантаження, внаслідок чого в реальній ситуації маємо значне перевищення рівня умовних втрат над його мінімальним значенням. Для різних компонентів системи електропостачання це перевищення різне. В таблиці 1.2 за даними [2] наведені деякі дані у вигляді коефіцієнтів перевищення рівня умовних втрат.

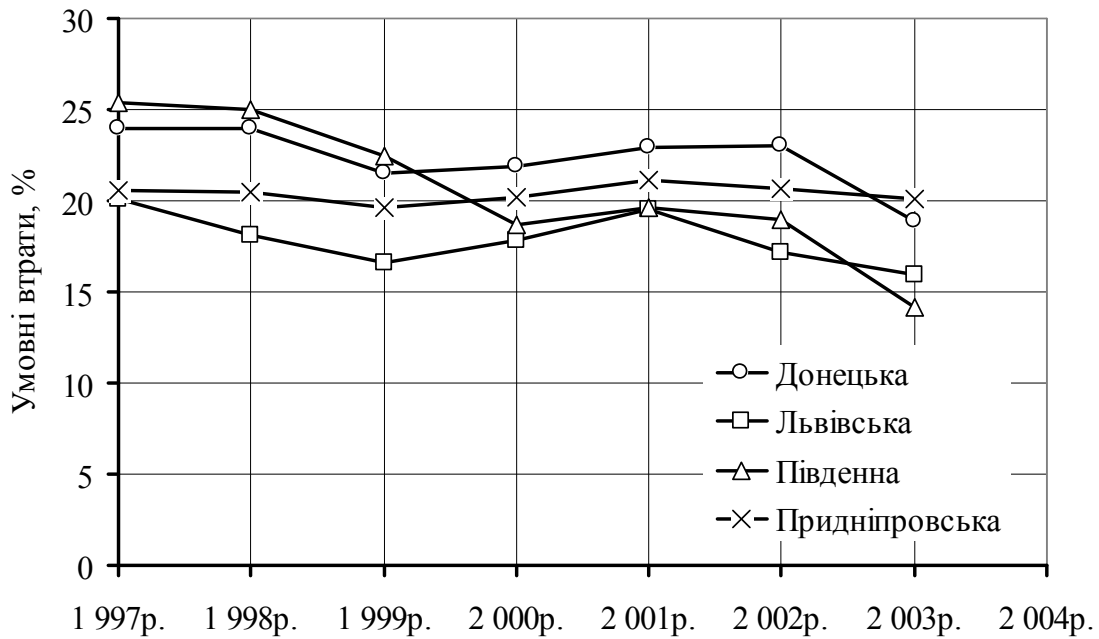


Рисунок 1.3 – Динаміка зміни умовних втрат протягом семи років на залізницях з контактною мережею постійного струму

Таблиця 1.2 – Коефіцієнт збільшення втрат електроенергії в елементах системи електропостачання постійного струму 3 кВ через нерівномірність споживання струму (2-колійна лінія)

Елементи системи електропостачання	Коефіцієнти перевищення рівня умовних втрат в залежності від виду руху		
	Приміське сполучення	Вантажні перевезення	Пасажирські перевезення
Тягова мережа	2,4-3,5	1,5-1,8	1,3-1,6
Тягова підстанція і власні ЛЕП	1,8-2,9	1,25-1,45	1,1-1,35

Умовні втрати утворюються при протіканні сумарного струму, споживаного електричним рухомим складом ЕРС, по стаціонарних пристроях електропостачання.

Якщо на тяговій підстанції живлення контактної мережі і нетягових споживачів здійснюється від загального трансформатора, то для подальшого розрахунку зручно прийняти схему заміщення, в якій схема тягової підстанції представлена дво-

ма послідовно включеними опорами, причому по першому протікає сумарний струм ЕРС і нетягових споживачів НТС, а по другому – тільки струм ЕРС. Контактна мережа і рейки, що входять у контур протікання струму ЕРС, умовно заміщені опором тягової мережі.

Складність розрахунку умовних втрат визначається саме цим опором, тому що він непостійний через зміну положення ЕРС по відношенню до тягової підстанції. Цей опір навіть для певного положення ЕРС складно підрахувати через багатоконтурність живильних ланцюгів, де треба враховувати двостороннє живлення ЕРС від суміжних тягових підстанцій, наявність поперечних з'єднань контактних підвісок, протікання струму живлення даного ЕРС по контактних підвісках сусідніх колій на двоколійних та багатоколійних ділянках.

Для спрощеної методики можна орієнтуватися на деяке середньостатистичне значення опору тягової мережі.

1.3 Основні типи накопичувачів електричної енергії та можливість їх застосування в електричній тязі

Для сучасної енергетики велике значення мають вимоги щодо якісних показників електроенергетичних установок. У цьому плані зростає роль накопичувачів енергії в електричній тязі, оскільки вони дозволяють реалізувати оптимальні за умовою мінімуму втрат режими роботи тягового обладнання. Взаємозв'язок параметрів накопичувача при заряді t_3 та розряді t_p визначається співвідношенням енергобалансу

$$\overline{M_3} \cdot t_3 \cdot \eta = \overline{M_p} \cdot t_p, \quad (1.1)$$

де $\overline{M_3}$, $\overline{M_p}$ – середні значення потужності зарядного і розрядного процесів;

η – коефіцієнт корисної дії накопичувача.

Цей вираз може бути також записаний для миттєвих значень потужності

$$\int_T M_3(t) \cdot \eta_3(t) \cdot dt = \int_T M_p(t) \cdot \eta_p(t) \cdot dt. \quad (1.2)$$

Значення t_3 , t_p , а також енергетичні показники якості η_3 та η_p при заряді і розряді можуть значно різнитись і тому існує

декілька головних напрямів використання накопичувачів. Їх роль зводиться до акумулювання надмірної енергії при відключенні значної частини споживачів і подальшого використання накопиченої енергії в періоди інтенсивного енергоспоживання. Звичайно t_3 і t_p мають приблизно однаковий порядок, енергетичні показники при заряді і розряді близькі.

Накопичувачі поліпшують показники енергосистем при короткочасному включенні споживачів підвищеної потужності, компенсують пікові навантаження, підвищують стійкість роботи енергоустановок і систем електроживлення, будучи демпфівальними елементами між генерувальними установками і споживачами в нестационарних режимах.

Для всіх типів накопичувачів необхідне узгодження їх характеристик з параметрами джерел енергії, навантажувальних елементів, комутаційної апаратури.

1.3.1 Індуктивні накопичувачі енергії

Індуктивний накопичувач електричної енергії (*ИНЕ*) являє собою котушку з індуктивністю L , по якій тече струм i (рисунок 1.4). В результаті створиться магнітне поле з накопиченою енергією

$$E = \frac{L \cdot i^2}{2}, \quad (1.3)$$

ИНЕ, крім індуктивної котушки, містить джерело живлення *ДЖ*, комутатори *K1* і *K2*, навантаження *H*. При підключенні накопичувача до джерела живлення за допомогою *K1* відбудеться заряд *ИНЕ* за час t_3 . При замиканні комутатора *K2* і розмиканні *K1* накопичена енергія передається навантаженню протягом часу t_p . Якщо $t_p < t_3$ (потужність *ИНЕ* при розряді істотно більше потужності заряду), то *ИНЕ* можна використати як трансформатор потужності. З моменту замикання *K2* і розмикання *K1* працює як джерело струму. Тому за допомогою *ИНЕ* можна забезпечити перетворення електричної енергії з підвищенням потужності і напруги.

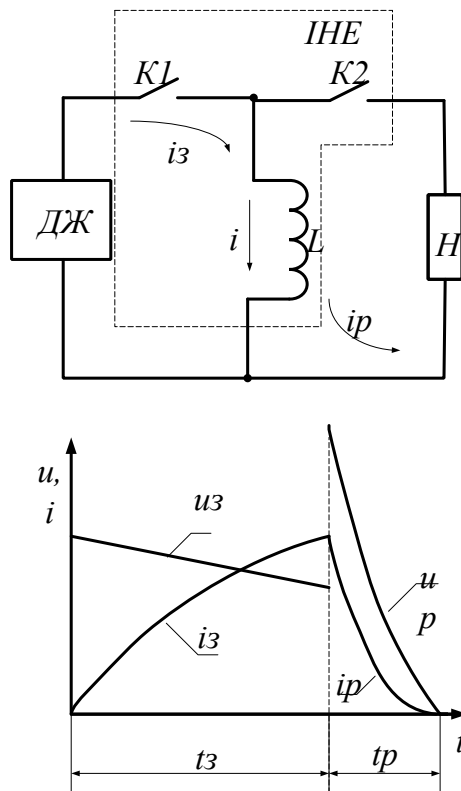


Рисунок 1.4 – Схема установки з індуктивним накопичувачем енергії і характер зміни струмів та напруги

До переваг вищенаведеної схеми можна віднести використання при заряді і розряді тільки одного комутатора, а до її недоліків – замикання розрядного струму при підвищеній нарузі через джерело живлення. Енергію, яку *ИНЕ* передає навантаженню за один цикл, можна за виключенням втрат визначити як $E = 0,5 \cdot L \cdot (I_{\max}^2 - I_{\min}^2)$. Ця схема раціональна при частотах, більших за 1 Гц.

Перспективним напрямком є впровадження надпровідникових індуктивних накопичувачів енергії (*НП ИНЕ*).

У *ИНЕ*, крім надпровідників, використовують гіперпровідники (кріопровідники), одним з яких є надчистий алюміній (99.999 %) з температурою 20-30 К (охолоджують, наприклад, рідким воднем або неоном). Опір гіперпровідника в тисячі разів менший у порівнянні з його опором при нормальній температурі. Це дозволяє отримувати щільність струму того ж порядку, що і в надпровідниках. При великій щільності струму необхідно відводити істотно великі омичні втрати, оскільки гіперпровідник має

кінцевий опір. Кріопроводникові накопичувачі досягають значень питомої енергії порядку 20-50 Дж/г при коефіцієнті корисної дії накопичення енергії приблизно 95 %.

1.3.2 Ємнісні накопичувачі енергії

Ємнісні накопичувачі енергії (*ЄНЕ*) акумулюють енергію електростатичного поля. Їх ефективність тим вище, чим більша місткість конденсатора C_n і напруга U_p перед розрядом. Тому в класичних *ЄНЕ* застосовуються високовольтні конденсатори. В молекулярних конденсаторах значення питомої енергії на один – два порядки вище, ніж в інших конденсаторах. У зв'язку з цим на основі цих конденсаторів розроблені ефективні схеми *ЄНЕ*.

Перевагою *ЄНЕ* є їх високий коефіцієнт корисної дії, значення якого для зарядно-розрядного циклу 88-90 %. Час зберігання енергії – до 100 годин. Ємнісні накопичувачі характеризуються малим внутрішнім опором, що дозволяє досягати питомої потужності імпульсного розряду порядку 100 Вт/см³. *ЄНЕ* не мають негативного екологічного впливу, пожежо- і вибухобезпечні. Недоліком *ЄНЕ* є їх багатомодульна конструкція (контактні з'єднання обмежують надійність усього пристрою), складність додаткових пристроїв для регулювання процесів заряду і розряду накопичувача і зміни полярності батарей при перемиканні із заряду в розряд.

1.3.3 Інерційні механічні енергоакумулюючі системи

Інерційні механічні енергоакумулюючі системи, до яких належать маховичнікові накопичувачі енергії (*МНЕ*), нагромаджують механічну енергію в маховику (системі маховиків). При дослідженні *МНЕ* необхідний комплексний підхід до оцінки характеристик основних елементів, у зв'язку з динамічним характером їх робочого процесу, впливу експлуатаційних умов і характеристик систем накопичення загалом, призначення, невизначеності в послідовності виконання задач того або іншого призначення тощо. Результатом є рекомендації щодо вибору раціонального складу енергоакумулюючої системи і оптимальних параметрів її основних елементів. Конструктивна форма конкретного *МНЕ* визначається його при-

значенням і умовами функціонування. Всі маховичні накопичувачі мають загальні структурні і системні особливості – сукупність основних елементів і зв'язки між ними. Основний, найбільш характерний елемент системи – маховик, що виконує функції акумулятора енергії і джерела потужності. Маховик має такі потенційно позитивні якості:

- висока питома потужність зарядно-розрядних режимів;
- можливість реалізації автоматичного переходу з режиму акумуляування (заряду) на режим генерування (розряду) енергії, що забезпечує можливість ефективної рекуперації енергії;
- високий коефіцієнт корисної дії і стабільність характеристик у широкому діапазоні змін умов експлуатації (тиск, температура та ін.) при невеликому часі зберігання енергії;
- відсутність забруднень навколишнього середовища.

Механічну енергію, яку нагромаджують і віддають маховики, порівняно просто і з високим коефіцієнтом корисної дії можна перетворювати в інші види енергії. Крім того, маховик – єдиний накопичувач, що акумулює одночасно з енергією і кінетичний момент, що створює ряд додаткових можливостей при застосуванні *МНЕ* в різних технічних пристроях.

Сфера практичного використання *МНЕ* поки обмежена через малі енергоємнісні показники монолітних маховиків, що зумовлено вимогами безпеки. Розвиток матеріалознавства і технології композиційних матеріалів дозволив створити на основі анізотропних матеріалів (з високою міцністю) безпечні маховики, що не поступаються за енергоємністю іншим накопичувачам енергії.

Як правило, при акумуляції електричної енергії, структура *МНЕ* така, що електричні машини можуть працювати як у режимі двигуна, так і в режимі генератора. Тому накопичену у фазі розгону енергію маховик через генератор, який до цього працював у режимі двигуна, віддає споживачу.

Маховичні накопичувачі можна поділити на дві групи:

- динамічні накопичувачі енергії, які акумулюють кінетичну енергію обертання твердих тіл;
- комбіновані накопичувачі енергії, які запасують одночасно кінетичну енергію тіл, що обертаються, і потенційну енергію пружності тіл.

Схеми маховиків можна поділити на три групи:

- монолітні маховики з ізотропних матеріалів (*ізотропія – однаковість фізичних властивостей у різних напрямках*);

- маховики з високоміцних анізотропних матеріалів (*анізотропія – неоднаковість фізичних властивостей у різних напрямках*);

- маховики з високоеластичних матеріалів.

Для акумулювання енергії перспективні два типи першої групи: маховики-диски і маховики-стержні (що обертаються навколо поперечної осі). Звичайно диски значно перевершують стержні за об'ємною ефективністю. Їх енергоємнісні можливості визначаються міцнісними характеристиками матеріалу.

Маховики другої групи мають схему, засновану на використанні високоміцних анізотропних матеріалів. Сучасні технології дозволяють досягати в подібних виробках (у вигляді волокон, дротів, джгутів, стержнів, стрічок, пластин тощо) більш високих значень питомої міцності, ніж у монолітних елементів з аналогічних матеріалів. Існують гібридні конструкції, де застосовуються як монолітні, так і анізотропні матеріали. Звичайно внутрішня, менш напружена частина таких маховиків, як правило, є монолітною, а зовнішня – з анізотропних матеріалів.

Маховики з високоеластичних матеріалів типу гуми, дозволяють нагромаджувати кінетичну енергію обертання, потенційну енергію розтягнення і енергію пружних резонансних коливань, що сприяє значному підвищенню енергоємності. І хоча ці маховики можна віднести до ізотропних, але за характером робочих процесів вони складають нову групу.

Сфери застосування варіантів маховиків визначаються на основі порівняння їх показників: питомої енергоємності E_H / m і об'ємної ефективності E_H / V_M .

Застосування анізотропних матеріалів є найефективнішим способом досягнення високих енергоємностей. Використання різнорідних волокон як армуючих елементів при виготовленні квазіізотропних дисків забезпечує необхідну згинальну жорсткість. Найкраще поєднання питомої енергоємності і об'ємної ефективності має маховик обідного типу. Оскільки втрати потужності в опорах пропорційні ω , а аеродинамічні втрати пропорційні ω^3 , маховики обідного типу мають ключову перевагу, оскільки їх ω_{\max} , внаслідок розміщення маси на пери-

ферії, становить приблизно 65 % ω_{\max} маховиків радіально-віялової схеми і майже вдвічі менше, ніж у квазіізотропного диска.

Розрив монолітних маховиків пов'язаний з виникненням важких осколків. Це вимагає вводити при їх проектуванні високі запаси міцності і передбачати відповідні огорожі, що призводить до істотного зниження енергоємних показників. Ниткоподібні матеріали при перенарузі перетворюються в порошок або дрібні частки, а їх енергія розсіюється тертям так, що лише декілька її процентів передається корпусу. Імовірність руйнування через місцевий дефект матеріалу волокна для маховика стержневого типу менше, тому що максимальне напруження в ньому досягається в перетинах елементів, які розташовані ближче до центру обертання, а напруження на його зовнішньому кінці дорівнює нулю. В обідному маховику його волокна працюють при максимальних напруженнях по всій периферії обода.

Основною перевагою маховиків квазіізотропної конфігурації є високий рівень об'ємної ефективності, що дозволяє створювати компактні системи. З іншого боку, при його руйнуванні утворюються високоенергетичні осколки, вся енергія виділяється одночасно і її розсіяння ускладнено.

Для електричної тяги потрібні накопичувачі енергії великої енергоємності. Дослідження і розробки енергоакумуючих систем направлені на розв'язання двох проблем: забезпечення раціонального використання енергетичних ресурсів шляхом підвищення економічності енергосистем і створення транспортних засобів, що не забруднюють атмосферу. Оцінка раціональності застосування системи виконується на основі узагальнених критеріїв (питома енергоємність і потужність, кількість циклів заряду і розряду, коефіцієнт корисної дії циклу, час зберігання енергії тощо).

1.3.4 Досвід застосування *HE*

Механічні інерційні накопичувачі енергії застосовують у системах електропостачання електричної тяги. Перша дослідна установка такого типу з'явилася в Японії в 1981 р. на приміській залізниці. Монолітний сталевий маховик розташовано у вакуумі під кожухом. Розкручується маховик від частоти обертання 800 до 1600 об/хв, нагромаджуючи 15 кВт·год (54 МДж) енергії. Його момент інерції дорівнює 5130 кг·м², маса – 14,6 т. Тиск повітря

всередині кожуха підтримується на рівні 1 кПа (1/100 атмосферного тиску). Мотор-генератор – машина постійного струму з незалежним збудженням потужністю 750 кВт і напругою 1500 В підключена до тягової мережі. Коефіцієнт повернення дорівнює 70 % (30 % складають аеродинамічні втрати, потреби на живлення вакуумного насоса, втрати в магнітних опорах тощо).

На основі отриманого досвіду в 1988 р. в Японії змонтована ще одна установка з *MHE* ємністю 30 кВт·год (108 МДж) з асинхронним мотор-генератором змінного струму. За останні декілька років з'явилися перші комерційні конструкції маховичних накопичувачів енергії. В установці фірми Піллер (*Piller GmbH*) для попереднього розгону до 900 об/хв застосовується пусковий мотор. Діапазон експлуатаційних частот обертання становить 1800-3600 об/хв. Монолітний сталевий маховик масою 2,7 т розміщений в масивному кожусі в атмосфері гелію. Магнітна опора приймає навантаження 27 кН (89 % ваги ротора), іншу частину навантаження приймає підп'ятник з ресурсом 70 000 годин. Енергоємність накопичувача – 17 МДж, номінальна потужність розряду 1100 кВт за 16 с, максимальна – 1650 кВт за 10 с, напруга стабілізована на рівні 405 – 550 В. Потужність втрат для максимальної частоти обертання – 11 кВт.

Цікаві технічні рішення має *MHE* фірми *Active Power*. Основним елементом накопичувача є ротор-маховик у вигляді зубчатого диска з легованої високоміцної сталі, що обертається всередині кожуха у вакуумі з $\omega_{\max} = 10\,000$ об/хв. Котушка (зверху), яка створює магнітне поле, одночасно забезпечує намагнічення зубців диска і його магнітне підвішування. При розгоні обмотка якоря створює магнітне поле, що обертається, яке взаємодіє з магнітним полем зубців, внаслідок чого збільшується швидкість обертання маховика і він накопичує енергію. При розряді накопичувача, внаслідок руху намагнічених зубців всередині якоря, в його обмотці створюється електричний струм. Коли швидкість ротора знижується, у верхній котушці струм збільшується, а з ним намагнічення ротора, що дозволяє підтримувати значення струму на постійному рівні. Можливий розряд – до 80 % енергії, накопиченої в роторі. Максимальна потужність розряду – 480 кВт за 12 с; енергоємність – 5,8 МДж. При мінімальній потужності розряду – 40 кВт, тривалість його 120 с. Звідси середня потуж-

ність втрат на рівні 8 кВт. Потужність установки можна збільшити в 2 рази, використовуючи два накопичувачі в одній шафі 1042 x 864 x 2058 мм, в якій, крім накопичувачів, розташовано енергоустаткування агрегата.

Дуже цікавою конструкцією є *MHE* фірми «*Trinity Flywheel Power*» (США) з композитним маховиком на $\omega_{\max} = 44\,000$ об/хв. Зовнішня частина ротора накопичувача зроблена з вуглепластика на епоксидній основі з вуглецевим волокном міцністю 8,27 ГПа. Ефективна міцність композитного матеріалу знижена до значення 3,2 ГПа. Діаметр ротора 229 мм, довжина 305 мм, маса – 29,5 кг. Отвір у роторі заповнений сегментами постійних магнітів (NdFeB), які утворюють сильне магнітне поле і, крім цього, вплив відцентрових сил компенсують стискальні сили в матеріалі маховика, що виникають у процесі обертання. Таким чином, ротор одночасно виконує функцію маховика і конструктивного елемента електричної машини. Статор розміщений поза вакуумного об'єму, що спрощує охолодження обмоток.

Найбільша установка, побудована за даним принципом, має два маховики, що обертаються в протилежному напрямі для виключення гіроскопічного моменту. Її маса – 227 кг, зовнішні розміри 813 x 660 x 584 мм. Енергоємність – 3,2 МДж, максимальна потужність розряду – 750 кВт за 3 або 200 кВт за 15 с. Ресурс дорівнює 50 000 годин або 100 000 циклів заряду-розряду. Компактність конструкції і невелика вага дозволяють застосовувати її в транспортних засобах. Розроблені також стаціонарні версії установки енергоємністю 1 МДж, потужністю 50 кВт протягом 20 с і вагою 138 кг. Накопичувач разом з допоміжними пристроями, вміщений у шафі розмірами 1702 мм (висота), 560 мм (ширина), 635 мм (довжина).

Маховичний накопичувач енергії російського виробництва має такі особливості. До металевого (вуглецева сталь або титан) осердя прикріплений композитний диск у вигляді обмотки з металевого проводу з того ж матеріалу, що і осердя, зі зв'язувальною речовиною у вигляді склопластика або спеціальної вуглецевої пластмаси. Міцність ниток зі сполученою речовиною набагато вища за міцність повністю металевого маховика. Маховик виконаний спеціально складної форми з

метою створення керованих повітряних завихрень для зменшення аеродинамічних втрат. Поверхня маховика покривається спеціальною речовиною і ретельно шліфується. Енергоємність маховика 90 МДж при $\omega_{\max}=15\ 000$ об/хв, $\omega_{\min}=7\ 500$ об/хв, зовнішньому діаметрі маховика 1000 мм і його масі 667 кг. Момент інерції дорівнює $97,3\ \text{кг}\cdot\text{м}^2$.

Мотор-генератор виконано або традиційного аксіального (у внутрішній частині маховика), або радіального типу із збудженням від постійних магнітів на зовнішньому роторі маховика, що обертається. У цьому випадку відсутні витрати енергії на збудження, а також знижуються аеродинамічні втрати, пов'язані з опором обмотки при високій швидкості. Але при збудженні від постійних магнітів на основі NdFeB виникають втрати в сталі статора. Це особливо виявляється в режимі вибігу. Ці втрати мають бути мінімізовані.

Магнітна система мотор-генератора виконана із збільшеною кількістю пар полюсів (до 12 p). Обмотка статора намотана мідним або алюмінієвим проводом, залежно від потужності, розмірів установки. Коефіцієнт корисної дії мотор-генератора становить 98 %.

На основі проведеного дослідження можна зробити висновки, що застосування накопичувачів в електричній тязі дозволить розв'язати такі задачі:

- поглинання надмірної енергії при рекуперації;
- згладжування піків споживання енергії шляхом підживлення тягової мережі від накопичувача, якщо величина тягового навантаження перевищує деяке граничне значення.

Вибір типу накопичувача пов'язаний з необхідністю врахування багатьох обставин:

- варіант застосування (стаціонарний / пересувний);
- загальна вартість накопичувача;
- вартість 1 кВт встановленої потужності;
- вартість 1 кВт·год (1МДж) енергоємності (для одного циклу роботи накопичувача);
- зовнішні габарити накопичувача і площа, що займається установкою;
- маса накопичувача, включаючи допоміжні пристрої;
- коефіцієнт корисної дії і інтенсивність саморозряду;

- прийнятний, з технічної точки зору, час зберігання енергії для одного циклу роботи;
- доступність матеріалів і агрегатів;
- рівень технічного розвитку конструкції;
- ресурс роботи і надійність;
- вплив на навколишнє середовище;
- пожежо- та вибухонебезпека, наслідки аварії.

Важливість наведених вище чинників залежить від конкретних обставин застосування накопичувача енергії і пов'язаних з ними обмежень.

Накопичувач може бути встановлений:

- безпосередньо на поїзді;
- на фідерах підстанції;
- приблизно в середині фідерної зони.

1.3.5 Специфіка застосування накопичувачів енергії в електричній тязі

Бортові накопичувачі. У бортових накопичувачів найкраща якість згладжування піків енергії, але це складно реалізувати через масогабаритні обмеження. Накопичувач має бути нечутливим до вібрації і сили інерції, що виникають під час поїздки. Час зберігання енергії порядку декількох десятків секунд – дорівнює часу стоянки поїзда на зупинці. Накопичувач не повинен впливати негативно на навколишнє середовище: виключене виникнення сильних зовнішніх електромагнітних полів, отруйних відходів. Наслідки виходу накопичувача з ладу не повинні загрожувати людям, що перебувають поблизу.

Стаціонарні накопичувачі. Застосування стаціонарних накопичувачів характеризується питомою енергією і питомою потужністю трохи менше, оскільки їх масогабаритні параметри вже не впливають на поїзди. Енергоємність накопичувача має забезпечити прийом енергії рекуперації від декількох поїздів, що перебувають поблизу нього, і вона пов'язана з відстанню між суміжними тяговими підстанціями і відстанню між місцями підключення накопичувачів до тягової мережі. Час зберігання енергії не більше, ніж час стоянки одного поїзда на зупинці, тривалість інтервалу між черговими режимами заряду залежить від характеру руху поїздів на лінії. Вплив на навколишнє середовище в цьому

випадку має менше значення, оскільки електромагнітні поля можна екранувати, а вплив шкідливих речовин можна мінімізувати застосуванням фільтрів і інших поглинальних засобів, маса і об'єм яких відіграють другорядну роль.

Зі стаціонарних варіантів більш доцільно встановлювати накопичувачі в середині фідерної зони. При цьому ніби з'являється додаткова підстанція, поліпшується рівень напруги в мережі, знижуються втрати енергії. Однак технічно простіше поставити накопичувач безпосередньо на підстанції, де для цього є приміщення. В умовах метро стаціонарний накопичувач доцільно розміщувати саме на фідерах підстанції, оскільки пуск-гальмування поїзда здійснюється завжди біля підстанції.

1.3.6 Порівняння масогабаритних показників накопичувачів енергії

Порівняння масогабаритних показників накопичувачів енергії наведено для чотирьох типів: *електрохімічних, ємнісних, індуктивних і механічних маховичних*, при енергоємності 90 МДж (25 кВт·год), потужності заряду – розряду 2 МВт, напрузі на виході установки 825 В.

Використовуючи в накопичувачі енергії акумуляторні батареї, треба з'єднати послідовно близько 68 штук для отримання заданої напруги. Номінальна енергоємність 1 батареї (для часу розряду 10 годин) за даними виробника фірми «*Hawker Energy*») – 42 А·год = 1,835 МДж = 0,51 кВт·год. Приймаючи струм батареї 104,1 А (для часу розряду 15 хв) для заданої потужності, треба застосувати 24 паралельно з'єднаних батарей з 68 акумуляторами в кожній. Енергоємність акумулятора, що відповідає струму 104,1 А, дорівнює 26 А·год і тому загальна енергоємність накопичувача 1833 МДж = 509 кВт·год. Загальна маса батареї – понад 26 т, загальний об'єм – 19 м³. Для заданого рівня струму розряду максимальна кількість циклів 80 % розряду дорівнює 350. Коефіцієнт корисної дії робочого циклу оцінюють близько 70 %. Вартість накопичувача – понад 100 000 умов. од.

У випадку ємнісного накопичувача перспективне застосування молекулярних конденсаторів, які характеризуються найвищими енергетичними показниками. На основі даних прийнятий конденсатор напругою 28 В, ємністю 205 Ф, вагою 30 кг з макси-

мальним значенням накопиченої енергії 80 кДж. Для забезпечення максимальної напруги 900 В необхідно сформувавши секцію, з'єднуючи послідовно 32 конденсатори. Тоді ємність однієї секції буде становити $205/32 = 6,41$ Ф. Необхідна ємність батареї конденсаторів пов'язана з максимальним діапазоном змін напруги на її затискачах. Якщо прийняти діапазон допустимих змін напруги в тяговій мережі 675-900 В, то для прийнятої енергоемності установки, що дорівнює 90 МДж (25 кВт·год),

$$C_y = \frac{2 \cdot E_y}{U_{mc \max}^2 - U_{mc \min}^2} = 508 \text{ Ф} . \quad (1.4)$$

Для створення батареї ємністю 508 Ф треба з'єднати паралельно 80 секцій. Тоді загальна кількість використаних конденсаторів складає 2560 загальної маси 76,8 т і об'єму 41 м³. Приблизна ціна одного конденсатора близько 160 умов. од., тому вартість накопичувача із заданими параметрами можна приблизно оцінити 420000 умов. од. Ємнісні накопичувачі характеризуються найвищим значенням кількості робочих циклів – 10⁸. Коефіцієнт повернення залежить, передусім, від коефіцієнта корисної дії зарядно-розрядного пристрою і для відомих рішень він дорівнює 0,8 – 0,95.

Визначення параметрів індуктивного накопичувача енергії складніше, оскільки вони взаємно пов'язані і залежать від форми надпровідної котушки, матеріалу надпровідника, ефективного коефіцієнта заповнення котушки тощо. Як приклад визначимо параметри надпровідної котушки Брукса із заданими раніше параметрами. Передбачимо, що котушка зроблена із надпровідника II роду, у формі комбінованого, повністю стабілізованого провідника. Надпровідні жили укріплені в несучий провід з коефіцієнтом заповнення несучого дроту $k_{сп} = 0,4$. Коефіцієнт заповнення котушки несучим дротом (що враховує наявність каналів охолодження, бандажів, ізоляції тощо) $k_{п} = 0,375$. Результуючий коефіцієнт заповнення котушки тоді $k_3 = 0,4 \times 0,375 = 0,15$.

Прийняте типове значення щільності струму в провідниках $J_{ц} = 4 \times 10^2$ А/м². Параметри котушки Брукса: $l = h = 0,3367$, $k_{ф} = 8,497$.

За даними [2] на базі котушки Брукса діаметром $d = 2,08$ м можна реалізувати *IHE* енергоємністю 90 МДж. Тоді параметри перетину котушки $l = h = 0,3367 d = 0,70$ м. Об'єм котушки складає $3,2$ м³, об'єм несучого дроту $3,2 \times 0,375 = 1,2$ м³. Приймаючи діаметр дроту $d_{\text{п}} = 5$ мм, отримаємо довжину дроту понад 61 км. Якщо прийняти ціну 1 м дроту на рівні 2 умов.од., то вартість надпровідникового матеріалу складатиме близько 122 000 умов.од. Вартість безперервно діючого охолоджувача з рідким гелієм – 50-100 тис. умов.од., при цьому, як вже було зазначено, на 1 Вт втрат у надпровідній котушці, виникаючих особливо в нестационарних режимах, потрібен приблизно 1 кВт потужності системи охолодження. До того ж треба врахувати вартість кріостата і гелію, а також вартість системи управління, комутуючих апаратів і системи екранування магнітних полів.

Подані оцінки показують, що надпровідний накопичувач енергії – це складна конструкція і значна вартість, а тому його застосування ефективно, коли його енергоємність велика, в такому випадку вартість обладнання не має особливого значення. Переваги надпровідного накопичувача енергії – високий коефіцієнт корисної дії (вище за 99 %) і коефіцієнт повернення, а також висока потужність установки, обмежена головним чином властивостями комутаційних пристроїв. З іншого боку, надпровідні накопичувачі енергії дорогі, в їх роботі необхідні допоміжні пристрої, в захисті перед зовнішніми магнітними полями треба використовувати системи екранування або спеціальні конструкції котушок. Перспективне застосування високо-температурних надпровідних накопичувачів енергії із системами охолодження, що використовують рідкий азот протягом найближчих 2-3 років дозволить навіть у декілька разів знизити вартість таких накопичувачів у порівнянні із системами, що використовують рідкий гелій.

Вище були зазначені основні параметри маховичного накопичувача енергії енергоємністю 90 МДж. Вся установка з допоміжними апаратами оцінюється у 25 000 умов.од. Вартість перетворювального агрегата потужністю 2 МВт складає близько 10000 умов.од. За поданими даними коефіцієнт повернення такого накопичувача можна оцінити в 92 %, причому існують можливості його поліпшення шляхом усунення втрат, які виникають

у підшипниках маховика, об'єднанням маховика з ротором мотор-генератора, застосуванням високоміцних композитних матеріалів для підвищення частоти обертання і зменшення ваги установки.

Порівняння описаних вище варіантів приводить до висновку, що поки що найкращі властивості мають маховичні накопичувачі енергії, які досить прості і дешеві, характеризуються прийнятними масогабаритними параметрами. Застосування композитних матеріалів ліквідує небезпеку розриву з виникненням важких фрагментів маховика. Потужність прийому-віддачі енергії обмежується тільки потужністю використаного мотор-генератора, ротор якого може одночасно виконувати функцію маховика, а обмотки статора можуть розміщуватися поза вакуумною зоною.

1.4 Особливість побудови систем з механічними накопичувачами електричної енергії та алгоритми їх роботи

Основними цілями застосування накопичувачів у системах електричного транспорту є :

- поглинання надмірної енергії рекуперації;
- згладжування піків споживання енергії з первинної енергосистеми шляхом підживлення тягової мережі від накопичувача, якщо величина тягового навантаження перевищує деяке граничне значення.

Нерівномірність споживання оцінюють за допомогою спеціальних показників, з яких найпростішим є «пік-фактор». Значення зниження «пік-фактора» полягає в тому, щоб:

- гарантовано обмежити граничне значення потужності джерела, оскільки це значення впливає на величину тарифу з оплати електроенергії;
- знизити втрати електроенергії.

Накопичувач може бути встановлений на поїзді, на фідерах підстанції, в середині фідерної зони.

В умовах залізничного транспорту розміщення тягових підстанцій не пов'язане з пунктами зупинок. У фідерній зоні підстанції може перебувати декілька одночасно гальмуючих поїздів. Тому тут задача вибору ємності накопичувача має вирі-

шуватися методом статистичного моделювання.

В електричній тязі при наявності рекуперативного гальмування алгоритми можуть бути різними. Найпростіший алгоритм управління накопичувачем: накопичувач має поглинути всю надмірну енергію, його параметри мають бути вибрані за цим режимом. Інші можна виділити у два крайніх випадки:

- реалізують алгоритм максимально швидкої віддачі накопиченої енергії, щоб швидше звільнити накопичувач для прийому наступної порції енергії рекуперації;

- процес віддачі енергії регулюють за принципом підтримки заданого рівня споживаної від енергосистеми потужності або мінімально допустимого рівня напруги на фідерах.

Побудова системи управління визначається також наявністю датчиків зворотних зв'язків, тобто датчиків потужності (або струму) і напруги. Можливе регулювання тільки за сигналами датчика напруги на фідерах підстанції, тобто при підвищенні напруги вище за напругу холостого ходу повинен вмикатися накопичувач, стабілізуючи напругу в деяких межах напруги; в цьому випадку алгоритм управління накопичувачем еквівалентний алгоритму управління інвертором. Цей алгоритм може бути вдосконалений застосуванням зворотних зв'язків по струму фідерів і по струму (потужності) самого накопичувача.

Дві основні задачі (поглинання надмірної енергії рекуперації і згладжування піків споживання) можуть вирішуватися одночасно одним і тим самим накопичувачем, але алгоритми управління будуть дещо різнитися, хоча загальний принцип вмикання накопичувача на поглинання або віддачу енергії залишається.

Ефективність тієї або іншої стратегії управління визначається шляхом моделювання. Причому, в режимі реального часу цей процес може поєднуватися з оперативним управлінням, для чого в системі управління накопичувачем має бути передбачено мікропроцесорний пристрій, а відповідна система повинна реалізувати принципи самонавчання та адаптації. Ця задача перетворюється в класичну задачу загальної теорії управління, що вирішується в умовах невизначеності з поступовим накопиченням і осмисленням інформації про об'єкт управління.

На рисунку 1.5 показано один з варіантів підключення

механічного накопичувача електричної енергії до контактної мережі.

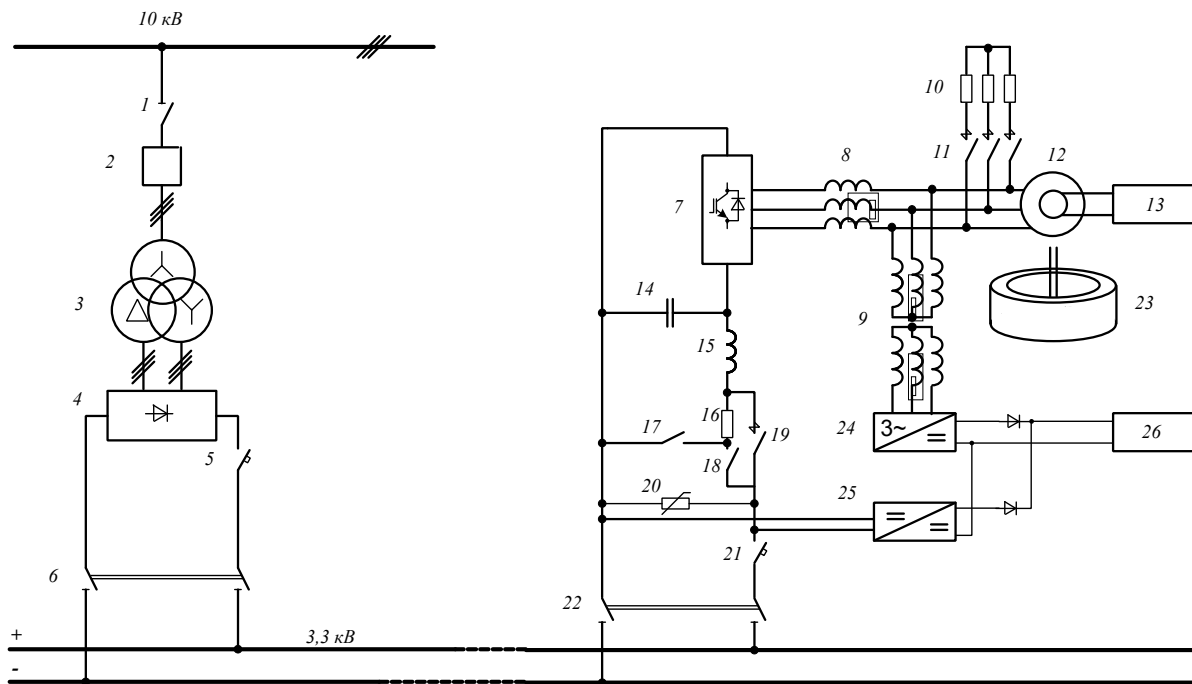


Рисунок 1.5 – Схема підключення механічного накопичувача електричної енергії до контактної мережі

При розробленні схеми передбачено використання такого обладнання:

- 1, 6, 22 – роз'єднувачі;
- 2, 5, 21 – високовольтні вимакачі на напругу 10 та 3,3 кВ;
- 3 – перетворювальний трансформатор;
- 4 – дванадцятипульсний випрямляч;
- 7 – перетворювач на транзисторах IGBT;
- 8 – дроселі;
- 9 – трифазний трансформатор;
- 10 – гальмівні резистори;
- 11 – гальмівні контактори;
- 12 – електрична машина механічного накопичувача (мотор-генератор);
- 13 – система управління збудженням електричної машини 12, перетворювача 7 та іншого обладнання системи накопичення та повернення енергії;
- 14 – конденсатор фільтра мережі;

- 15 – дросель фільтра мережі;
- 16 – зарядний резистор;
- 17 – контактор розряду;
- 18 – контактор заряду;
- 19 – вхідний вимикач;
- 20 – захист від перенапруги;
- 23 – маховик накопичувача;
- 24 - трифазний інвертор;
- 25 – перетворювач постійного в постійний струм;
- 26 – блок живлення систем управління.

2 Методичні вказівки до курсового проекту

Метою курсового проекту є розроблення системи електропостачання електричного транспорту з накопичувачами енергії.

Загальні вихідні дані:

- призначення – поглинання надмірної енергії рекуперації і віддача при наявності споживачів;
- розміщення накопичувача енергії – на фідерах тягової підстанції;
- тип накопичувача – інерційний механічний (МНЕ);
- тип електричної машини – синхронний генератор (двигун);
- матеріал, з якого виготовлено маховик – сталь;
- режим роботи – короткочасний, «заряд – розряд -очікування».

Курсовий проект має містити такі розділи:

- короткий огляд призначення накопичувачів енергії та перспектива їх застосування на залізничному транспорті;
- обґрунтування та вибір принципової схеми інерційного механічного накопичувача енергії (МНЕ);
- вибір ємності МНЕ;
- визначення характеристик маховика;
- розроблення структурної схеми підключення механічного накопичувача електричної енергії до контактної мережі;
- розроблення структурної схеми системи автоматичного

регулювання режимом роботи накопичувача енергії в процесі накопичення та повернення енергії;

- розроблення схеми автоматичного регулювання напруги допоміжного генератора та визначення параметрів регуляторів;

- дослідження роботи системи регулювання напруги допоміжного генератора шляхом моделювання. Розрахунок перехідного процесу напруги на виході допоміжного генератора при мінімальній ω_{\min} та максимальній ω_{\max} швидкості обертання маховика. Перехідний процес побудувати при ступінчатій зміні вхідного сигналу від 0 до 8 В (220 В фазної напруги на виході генератора);

- висновок;

- список використаної літератури.

2.1 Вибір принципової схеми інерційного механічного накопичувача енергії (МНЕ)

В першу чергу необхідно розглянути варіанти розміщення осі МНЕ, компонування, переваги та недоліки (вертикальне положення – рисунок 2.1; горизонтальне – рисунок 2.2). Обґрунтувати прийняте рішення.

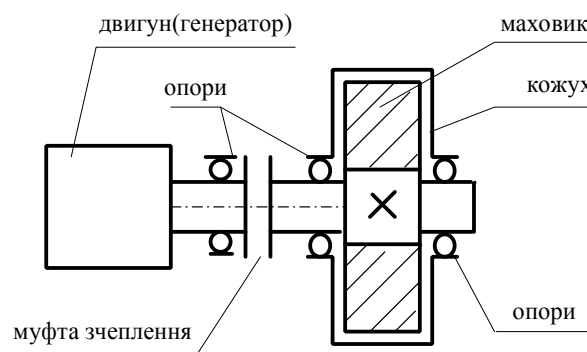


Рисунок 2.1 – Приклад структурної схеми МНЕ з горизонтальним положенням осі

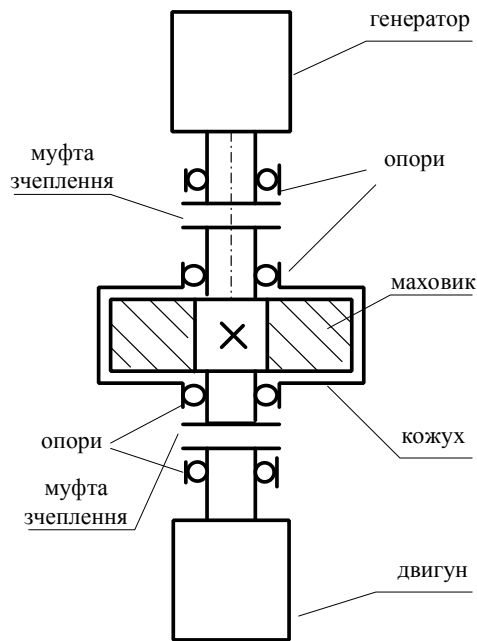


Рисунок 2.2 – Приклад структурної схеми МНЕ з вертикальним положенням осі

2.2 Вибір ємності МНЕ

Для використання МНЕ в мережі необхідно розрахувати ємність МНЕ. Відомо, що режим рекуперації супроводжується підвищенням напруги в контактній мережі. При відсутності споживача і підвищенні напруги понад 4 000 В режим рекуперації припиняється і відбувається заміщення рекуперативного гальмування на інший вид. На рисунку 2.3 показано спрощений графік зміни струму в контактній мережі в режимі споживання його електричним рухомих складом та рекуперації.

Мінімальну енергоємність накопичувача можна визначити як

$$E_{\min} = \int_{t_2}^{t_5} I(t) \cdot U(t) \cdot dt, \quad (2.1)$$

де $I(t)$, $U(t)$ – відповідно струм та напруга в контактній мережі при рекуперації.

В таблиці 2.1 наведено поваріантно значення параметрів I_{ti} , U і t_i

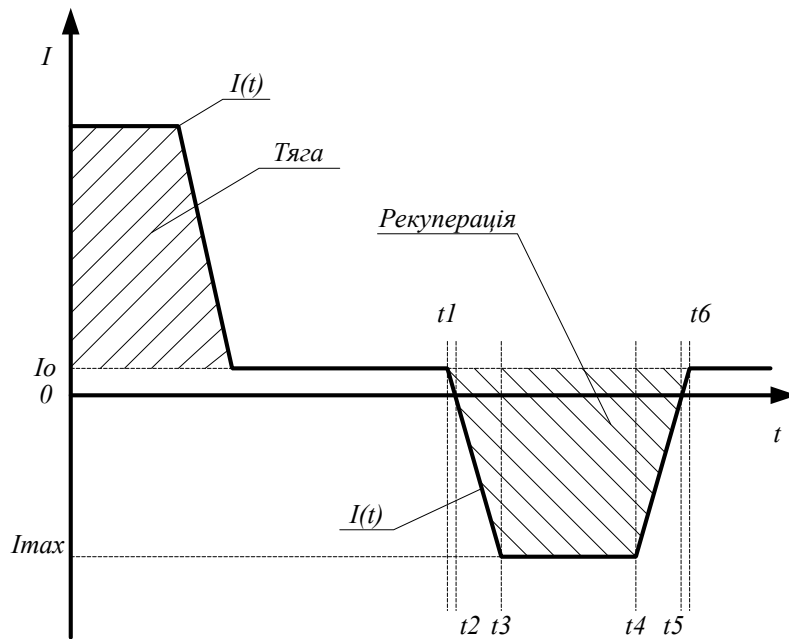


Рисунок 2.3 – Графік зміни струму в контактній мережі

Таблиця 2.1 – Значення параметрів I_{ti} , U і t_i при рекуперації

Варіанти	I_{max}, A	t_2, c	t_3, c	t_4, c	t_5, c	U, B
1	1 000	0	1	20	21	3 600
2	1 000	0	1	30	31	3 600
3	1 000	0	2	20	22	3 600
4	1 000	0	2	30	32	3 600
5	1 000	0	2	10	12	3 600
6	2 000	0	1	20	21	3 600
7	2 000	0	1	30	31	3 600
8	2 000	0	2	20	22	3 600
9	2 000	0	2	30	32	3 600
10	2 000	0	1	10	12	3 600

За спрощеним графіком (див. рисунок 2.3) та даними з таблиці 2.1 E_{min} можна визначити як, Вт·с,

$$E_{min} = \frac{1}{2} \cdot I_{max} \cdot U \cdot (t_3 - t_2) + I_{max} \cdot U \cdot (t_4 - t_3) + \frac{1}{2} \cdot I_{max} \cdot U \cdot (t_5 - t_4) \cdot \quad (2.2)$$

2.3 Розрахунок маховика

Відомо, що ємність маховика визначається частотою обертання, масою та його геометричними розмірами.

Енергія («корисна»), яка запасасться маховиком, визначається за формулою, Дж,

$$E = J \cdot \frac{(\omega_1^2 - \omega_2^2)}{2}, \quad (2.3)$$

де ω_1 – максимальна кутова швидкість обертання маховика, рад/с;

ω_2 – мінімальна кутова швидкість обертання маховика, рад/с;

J – момент інерції, кг/м².

Для синхронної електричної машини, у межах даного розрахунку, прийємо такі значення ω_1 та ω_2 :

$$\omega_1 = \omega_{max} = 314 \text{ рад/с};$$

$$\omega_2 = \omega_{min} = 100 \text{ рад/с}.$$

При виборі маховика циліндричної форми з однорідного матеріалу момент інерції визначається як

$$J = \frac{m \cdot r^2}{2}, \quad (2.4)$$

де m – маса маховика, кг;

r – радіус маховика, м.

Масу маховика можна визначити за формулою

$$m = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot h}{g} \cdot \gamma, \quad (2.5)$$

де h – висота циліндра, м;

γ – питома вага матеріалу, Н/м³;

$g = 9,8 \text{ м/с}^2$.

Враховуючи вираз (2.4), момент інерції визначатиметься за формулою

$$J = \frac{\pi \cdot r^4 \cdot h}{2 \cdot g} \cdot \gamma. \quad (2.6)$$

Величина радіуса диска залежить від швидкості його обертання та величини допустимого напруження в матеріалі. Відомо, що високі швидкості обертання обумовлюють появу значних відцентрових зусиль. Для диска сталої товщини величина максимального напруження визначається за формулою [4]

$$(\sigma)_{\max} = \frac{3+\mu}{8 \cdot g} \cdot \gamma \cdot \omega^2 \cdot r_1^2 \cdot [2+(1-k) \cdot \alpha^2] \leq [\sigma_0], \quad (2.7)$$

де μ – коефіцієнт Пуассона¹⁾ (див. таблицю 2.2);

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2;$$

γ – питома вага матеріалу, Н/м³; для сталі приймаємо $\gamma \approx 70 \text{ кН/м}^3$;

ω – швидкість обертання, рад/с;

σ_0 – механічна характеристика матеріалу (див. таблицю 2.2) – межа текучості матеріалу (напруження в матеріалі), в МПа, (див. дані σ_0 за варіантами в таблиці 2.2);

$$\alpha = \frac{r_2}{r_1},$$

де r_1 – зовнішній радіус диска, м;

r_2 – радіус внутрішнього отвору, м.

$$k = \frac{1+3 \cdot \mu}{3+\mu}.$$

¹⁾ Коефіцієнт Пуассона – це одна з фізичних характеристик матеріалу пружного тіла, що дорівнює відношенню абсолютних значень відносної поперечної деформації елемента тіла до його відносної подовжньої деформації. Дана характеристика введена Пуассоном. При розтяганні прямокутного паралелепіпеда в напрямку осі x наявне видовження паралелепіпеда вздовж цієї осі, а вздовж перпендикулярних осей y, z – звуження, тобто звуження його поперечного перетину. Для ізотропних тіл величина коефіцієнта Пуассона не змінюється при зміні розтягу стисканням та зміні напрямків деформації. В анізотропних тілах величина коефіцієнта Пуассона залежить від напрямку. Коефіцієнт Пуассона разом з одним з модулів пружності визначає всі пружні властивості ізотропного тіла. Величина коефіцієнта Пуассона для більшості металевих матеріалів близька до 0,3.

При $r_2=0$ формула (2.7) набуде вигляду

$$(\sigma)_{\max} = \frac{3+\mu}{8 \cdot g} \cdot \gamma \cdot \omega^2 \cdot r_1^2 \cdot 2 \leq [\sigma_0]. \quad (2.8)$$

Таблиця 2.2 – Механічні характеристики матеріалів

Варианти	Матеріал	σ_0 , МПа
1	Сталь Ст.3	240
2	Сталь 15	210
3	Сталь 45	340
4	Сталь 30ХГСА	950
5	Сталь Ст.3	240
6	Сталь 15	210
7	Сталь 45	340
8	Сталь 30ХГСА	950
9	Сталь Ст.3	240
10	Сталь 15	210

Прийнявши коефіцієнт запасу рівним 2, отримаємо $(\sigma)_{\max} = \sigma_0/2$. При цьому радіус диска можна визначити як

$$r_1 = \sqrt{\frac{\sigma_0}{2 \cdot 2 \cdot \frac{3+\mu}{8 \cdot g} \cdot \gamma \cdot \omega^2}} = \sqrt{\frac{4 \cdot \sigma_0 \cdot g}{(3+\mu) \cdot \gamma \cdot \omega^2}} = \frac{1}{\omega} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \sigma_0 \cdot g}{(3+\mu) \cdot \gamma}} \quad (2.9)$$

При відомих значеннях ω_1 , ω_2 та залежності (2.3) визначаємо J як

$$J = \frac{2 \cdot E}{(\omega_1^2 - \omega_2^2)} \quad (2.10)$$

Радіус r_1 диска визначаємо за формулою (2.9) при $\omega = \omega_1$.
Висоту диска h визначаємо з формули (2.6)

$$h = \frac{2 \cdot g \cdot J}{\pi \cdot r^4 \cdot \gamma} \quad (2.11)$$

Параметри маховика занести в таблицю 2.3.

Таблиця 2.3 – Розрахункові параметри маховика МНЕ

Розрахункова енергоємність накопичувача, Дж	Матеріал	Форма	r , м	h , м	J , кг/м ²
		Диск			

		рівної товщини			
--	--	----------------	--	--	--

2.4 Розроблення структурної схеми підключення механічного накопичувача електричної енергії до контактної мережі

Розробити:

- схему системи електропостачання електричного транспорту з інерційним накопичувачем енергії, де передбачено також допоміжний генератор як джерело живлення власних потреб системи;
- специфікацію обладнання системи електропостачання електричного транспорту з інерційним накопичувачем енергії.

2.5 Розроблення структурної схеми системи автоматичного регулювання режимом роботи накопичувача енергії в процесі накопичення та повернення енергії

Розробити алгоритм та структурну схему системи автоматичного регулювання режимом роботи накопичувача енергії в процесі накопичення та повернення енергії. Вказати місце підключення датчиків параметрів, задіяних у системі управління.

2.6 Розробка схеми автоматичного регулювання напруги допоміжного генератора

Функціональну схему системи регулювання напруги на виході допоміжного генератора показано на рисунку 2.4. Привідним механізмом допоміжного генератора служить інерційний накопичувач, швидкість обертання якого змінюється в широких межах від ω_{max} до ω_{min} , і навпаки. Збудження генератор отримує від керованого випрямляча. Сигнал управління на випрямляч надходить з регулятора. Вхідними сигналами блока регулятора є сигнали з блока задання і датчиків струму та напруги.

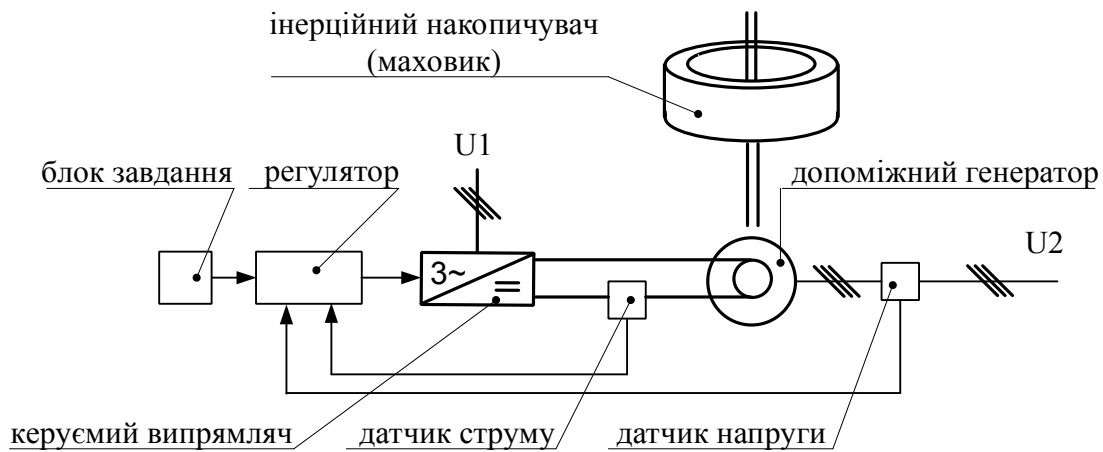


Рисунок 2.4 – Функціональна схема системи регулювання напруги на виході допоміжного генератора

Система регулювання будується з підлеглими контурами регулювання. В даному випадку сигналом задання буде сигнал задання напруги на виході генератора. Система матиме два контури регулювання по струму збудження та напрузі на виході генератора. Структурна схема системи регулювання показана на рисунку 2.5. (Вимоги до якості регулювання та параметри об'єкта наведені в таблиці 2.4.)

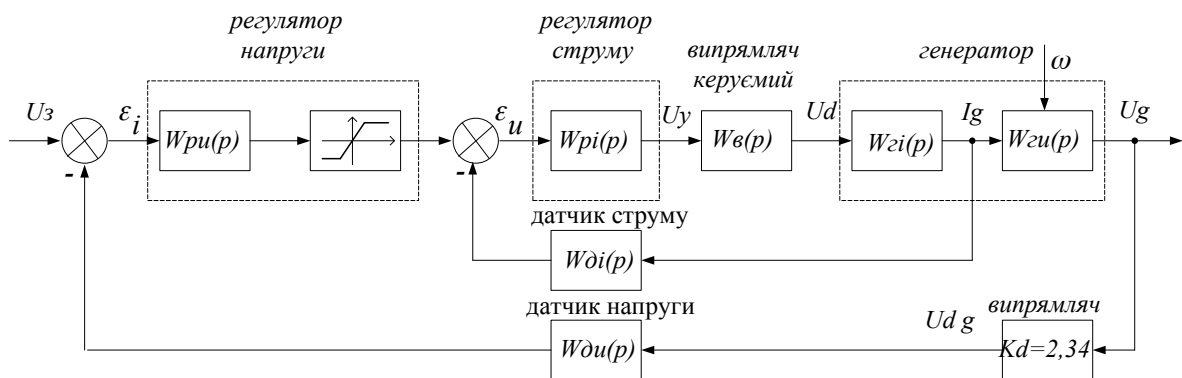


Рисунок 2.5 – Структурна схема системи регулювання напруги на виході допоміжного генератора

2.6.1 Передавальна функція генератора

Передавальна функція генератора подана у спрощеному вигляді:

$$W_{zi}(p) = \frac{I_g(p)}{U_d(p)} = \frac{1/R_{ozg}}{T_{ozg} \cdot p + 1}, \quad (2.12)$$

$$W_{zi}(p) = \frac{U_g(p)}{I_g(p)} = \frac{k}{T_{ug} \cdot p + 1} ,$$

де R_{ozg} – опір обмотки збудження, Ом;

T_{ozg} – стала часу обмотки збудження, с;

$k = k_g \cdot \omega$; $k_g = 0,1$;

T_{ug} – стала часу, с;

U_g – дійсне значення фазної електричної рушійної сили (ЕРС);

$U_{dg} = 2,34 \cdot U_g$ – максимальна величина випрямленої ЕРС при відсутності запізнення при відкриванні діодів і трифазній мостовій схемі випрямлення.

2.6.2 Передавальна функція керованого випрямляча

Передавальну функцію випрямляча без урахування запізнення можна записати у вигляді:

$$W_{\epsilon}(p) = \frac{U_d(p)}{U_y(p)} = \frac{k_{\epsilon}}{T_{\epsilon} \cdot p + 1} , \quad (2.13)$$

де k_{ϵ} – коефіцієнт передачі, $k_{\epsilon} = 10$;

T_{ϵ} – стала часу, с.

2.6.3 Передавальні функції датчиків струму та напруги

Датчика струму –
$$W_{di}(p) = \frac{k_i}{T_i \cdot p + 1}; \quad (2.14)$$

датчика напруги –
$$W_{du}(p) = \frac{k_u}{T_u \cdot p + 1} .$$

Коефіцієнт k_i прийнято рівним 1. Коефіцієнт $k_u = 0,0155$ вибрано за умови, щоб при 220 В діючого значення фазної напруги генератора на виході датчика напруги було 8 В.

Таблиця 2.4 – Вимоги до якості регулювання та параметри

об'єкта

Варіант	R_{ozg} , Ом	T_{ozg} , с	T_{ug} , с	T_{ϵ} , с	T_i , с	T_u , с	ϵ , %	δ , %	t_n , с

1	1	0,5	0,1	0,001	0,0001	0,0001	1	20	0,1
2	2	0,5	0,1	0,001	0,0001	0,0001	1	20	0,1
3	3	0,5	0,1	0,001	0,0001	0,0001	1	20	0,1
4	4	0,5	0,1	0,001	0,0001	0,0001	1	20	0,1
5	5	0,5	0,1	0,001	0,0001	0,0001	1	20	0,1
6	1	1	0,1	0,002	0,0002	0,0002	2	10	0,1
7	2	1	0,1	0,002	0,0002	0,0002	2	10	0,1
8	3	1	0,1	0,002	0,0002	0,0002	2	10	0,1
9	4	1	0,1	0,002	0,0002	0,0002	2	10	0,1
10	5	1	0,1	0,002	0,0002	0,0002	2	10	0,1

2.6.4 Синтез регулятора контуру регулювання струму збудження генератора

Застосуємо в якості регулятора ІІІ-регулятор, передавальна функція якого визначатиметься як:

$$W_{pi}(p) = \frac{(T_{ozg} \cdot p + 1)}{4 \cdot k_{\epsilon} \cdot \frac{1}{R_{ozg}} \cdot k_i \cdot (T_{\epsilon} + T_i) \cdot p} = \frac{T_{ozg}}{4 \cdot k_{\epsilon} \cdot \frac{1}{R_{ozg}} \cdot k_i \cdot (T_{\epsilon} + T_i)} + \frac{1}{4 \cdot k_{\epsilon} \cdot \frac{1}{R_{ozg}} \cdot k_i \cdot (T_{\epsilon} + T_i) \cdot p} = K_{III} + \frac{1}{T_{III} \cdot p}, \quad (2.15)$$

де $T_{ozg} \gg T_{\epsilon}; T_i$.

2.6.5 Синтез регулятора контуру регулювання напруги генератора

Для синтезу регулятора зовнішнього контуру регулювання визначаємо передавальну функцію внутрішнього контуру. Приймаючи до уваги, що $k_i=1$, а $T_b \gg T_i$, передавальну функцію внутрішнього замкнутого контуру можна записати як

$$W(p) = \frac{1}{(2 \cdot T_b \cdot p + 1)^2}.$$

В якості регулятора пропонується вибрати ПІ-регулятор.
Враховуючи, що $T_{ug} \gg 2 \cdot T_b; T_u$, коефіцієнти ПІ-регулятора можна визначити як:

$$K_{PI} = T_{ug} / [4 \cdot (kg \cdot \omega) \cdot kd \cdot ku \cdot (2 \cdot T_b + T_u)];$$

$$1/T_{PI} = 1 / [4 \cdot (kg \cdot \omega) \cdot kd \cdot ku \cdot (2 \cdot T_b + T_u)]$$

2.7 Дослідження роботи системи регулювання напруги допоміжного генератора

Дослідження можна виконати шляхом моделювання в Simulink (MATLAB).

З врахуванням вихідних даних та параметрів регуляторів розробити модель. Навести перехідний процес у системі автоматичного регулювання напруги на виході допоміжного генератора при ступінчатій зміні завдання від нульового значення до номінального при $\omega = 100$ рад/с та 314 рад/с.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Розенфельд В.Е., Исаев И.П., Сидоров Н.Н. Теория электрической тяги: Учеб. для вузов ж.-д. трансп. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1983. – 328 с.

2 D. Habel et al. Elektrische Bahnen. – 2003. – №7. – S 310-314.

3 Феоктистов В.П., Павелчик М. Повышение тягово-энергетической эффективности транспортных систем при помощи накопителей энергии // Транспорт: наук, техника, управление. – Изд. ВИНТИ РАН. – 1999. – №12. – С.21-26.

4 <http://elib.ispu.ru/library/lessons/shapin2/index..html>.

