

**Міністерство освіти і науки України**

**Криворізький національний університет**

**Електротехнічний факультет**

# **Пояснювальна записка**

**до кваліфікаційної роботи бакалавра  
за спеціальністю 141 - Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка**

**ТЕМА РОБОТИ:**

**Розрахунок параметрів структури гібридного фільтру для  
електромеханічного рухомого складу постійного струму**

**Виконав: студент групи ЕЕМ-22-2**

**Олександр ГАРКУША**

**Керівник випускної роботи \_\_\_\_\_**

**к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК**

**Нормо контролер \_\_\_\_\_**

**к.т.н., доц. Ігор СІНЧУК**

**Декан ЕТФ \_\_\_\_\_**

**к.т.н., доц. Владислав ФЕДОТОВ**

**Гарант освітньої програми \_\_\_\_\_**

**к.т.н., доц. Ігор ПЕРЕСУНЬКО**

**Кривий Ріг 2026 р.**

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: бакалавр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка

## ЗАВДАННЯ

### НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

ГАРКУША Олександр Вікторович

---

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Розрахунок параметрів структури гібридного фільтру для  
електромеханічного рухомого складу постійного струму

1. Термін подання студентом роботи: 19 червня 2026 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є розрахунок параметрів  
структури гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу  
постійного струму
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I.  
Розрахунок параметрів та складання структури пасивної частини гібридного  
фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму; II.  
Дослідження принципу дії структури імпульсного активного гібридного  
фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму; III.  
Розрахунок параметрів та структури активної частини гібридного фільтру  
для електромеханічного рухомого складу постійного струму.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових  
креслень) I. Залежність для конденсаторів типу КА75-80; II. Розрахункові  
значення параметрів пасивного Тс-Фільтра; III. Структури гібридних  
фільтрів для ЕПС постійного струму; IV. Розрахункові значення параметрів  
пасивної частини гібридного фільтра.

5. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Ім'я, прізвище консультанта | Дата, підпис   |                  |
|--------|-----------------------------|----------------|------------------|
|        |                             | Завдання видав | Завдання прийняв |
| I      | Ігор СІНЧУК                 |                |                  |
| II     | Ігор СІНЧУК                 |                |                  |
| III    | Ігор СІНЧУК                 |                |                  |

6. Календарний план

| № | Етапи роботи                                                             | Термін   |
|---|--------------------------------------------------------------------------|----------|
| 1 | Дослідження режимів роботи пасивної частини гібридного фільтру           | 24.05.26 |
| 2 | Розрахунок параметрів структури пасивної частини гібридного фільтру      | 31.05.26 |
| 3 | Аналіз показників структури імпульсного активного гібридного фільтру     | 07.06.26 |
| 4 | Розробка принципу дії структури імпульсного активного гібридного фільтру | 15.06.26 |
|   |                                                                          |          |
|   |                                                                          |          |
|   |                                                                          |          |
|   |                                                                          |          |
|   |                                                                          |          |
|   |                                                                          |          |
|   |                                                                          |          |

Дата видання завдання 18.05.2026 р.

Здобувач вищої освіти \_\_\_\_\_  
(підпис)

Олександр ГАРКУША  
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

Ігор СІНЧУК  
(Ім'я, прізвище)

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової атестаційної роботи бакалавра на тему: «Розрахунок параметрів структури гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму»

41 с., 4 рис., 30 літературних джерел

Мета роботи: Забезпечення високого рівня електромагнітної сумісності (ЕМС) рухомого складу постійного струму з тяговою мережею та системами сигналізації шляхом синтезу оптимальної структури гібридного вхідного фільтру та розробки ефективних алгоритмів активного демпфування резонансних коливань, а також обґрунтування структури, принципів функціонування та методів пригнічення коливань гібридного фільтру тягового електроприводу для забезпечення вимог електромагнітної сумісності рухомого складу постійного струму із залізничною інфраструктурою та лініями зв'язку.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати такі завдання:

Здійснити гармонічний аналіз струмів, що генеруються сучасними імпульсними тяговими перетворювачами рухомого складу в контактну мережу постійного струму.

Проаналізувати спектральний склад гармонійних завад, що генеруються сучасними частотно-регульованими тяговими приводами в контактну мережу постійного струму.

Розробити математичні моделі взаємодії вхідного пасивного LC-фільтру з індуктивністю тягової підстанції та контактної мережі, виявивши умови виникнення низькочастотних резонансних коливань.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 4    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Визначити критерії вибору елементів пасивної частини фільтра з урахуванням обмежень на масу, габарити та теплові режими бортового обладнання.

Синтезувати структуру гібридного фільтра, що поєднує пасивні елементи (для фільтрації високочастотних комутаційних завад) та активний силовий фільтр (для придушення низькочастотних гармонік та стабілізації напруги).

Розробити структурну схему активної частини гібридного фільтра (силового електронного компенсатора) та визначити принципи її інтеграції з пасивним колом.

Розрахувати масо-габаритні та електромагнітні параметри компонентів гібридного фільтра.

Дослідити фізику виникнення резонансних явищ у вхідному колі локомотива та проаналізувати ефективність різних способів демпфування коливань (пасивних, активних та алгоритмічних).

Дослідити та порівняти методи демпфування коливань LC-фільтра (пасивне демпфування за допомогою RC-ланцюгів та активне демпфування шляхом введення зворотних зв'язків у систему керування перетворювачем), довівши енергетичну перевагу алгоритмів "віртуального резистора".

Сформулювати рекомендації щодо побудови комплексної системи забезпечення електромагнітної сумісності для перспективних зразків рухомого складу.

ГІБРИДНИЙ ФІЛЬТР, РУХОМИЙ СКЛАД ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, ЕЛЕКТРОМАГНІТНА СУМІСНІСТЬ, ПАСИВНЕ ДЕМПФУВАННЯ, АКТИВНЕ ДЕМПФУВАННЯ, АВТОНОМНИЙ ІНВЕРТОР, ЛАНКА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ, LC-ФІЛЬТР, РЕЗОНАНСНІ КОЛИВАННЯ

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 5    |

## Зміст

|                                                                                                                                                          |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Вступ.....                                                                                                                                               | 8  |
| Розділ 1. Розрахунок параметрів та складання структури пасивної частини гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму..... | 16 |
| 1.1. Дослідження режимів роботи пасивної частини гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму.....                        | 16 |
| 1.2. Розрахунок параметрів структури пасивної частини гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму.....                   | 21 |
| Розділ 2. Дослідження принципу дії структури імпульсного активного гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму.....      | 24 |
| 2.1. Аналіз показників структури імпульсного активного гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму .....                 | 24 |
| 2.2. Розробка принципу дії структури імпульсного активного гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму .....             | 25 |
| Розділ 3. Розрахунок параметрів та структури активної частини гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму .....          | 27 |
| 3.1. Розробка структури гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму .....                                                | 27 |
| 3.2. Розрахунок режимів роботи активної частини гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму.....                         | 29 |
| Висновки .....                                                                                                                                           | 32 |
| Список використаних джерел .....                                                                                                                         | 34 |
| Додаток А.....                                                                                                                                           | 38 |
| Додаток Б .....                                                                                                                                          | 39 |

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 6    |

|                 |    |
|-----------------|----|
| Додаток В ..... | 40 |
| Додаток Г ..... | 41 |

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 7    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## Вступ

### Виклики електромагнітної сумісності в сучасній тязі

Впровадження частотно-регульованих асинхронних та синхронних приводів на електрорухомому складі постійного струму суттєво підвищило їхню енергоефективність.

Проте використання потужних напівпровідникових ключів, які працюють у режимі високочастотної широтно-імпульсної модуляції, породило серйозну проблему — генерацію потужних електромагнітних завад у контактну мережу.

Ці завади негативно впливають на системи залізничної автоматики, телемеханіки та лінії зв'язку, що прокладені вздовж колій.

Забезпечення електромагнітної сумісності (ЕМС) між рухомим складом та інфраструктурою є критично важливою умовою безпеки руху.

### Обмеження класичних пасивних фільтрів

Традиційно для захисту мережі від завад та згладжування пульсацій на борту поїзда встановлюють пасивні індуктивно-ємнісні (LC) фільтри.

Вони складаються з масивного реактора (катушки індуктивності) та батареї конденсаторів.

Щоб ефективно пригнічувати низькочастотні гармоніки, такі фільтри повинні мати величезну індуктивність та ємність.

Це автоматично призводить до збільшення маси та габаритів обладнання, що в умовах обмеженого простору локомотива або електропоїзда є вкрай небажаним.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 8    |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |



Крім того, пасивний фільтр сам по собі є коливальним контуром.

При певних режимах роботи (наприклад, при різкій зміні навантаження або стрибках напруги в контактній мережі) у ньому виникають небезпечні резонансні коливання напруги та струму, які можуть вивести з ладу силову електроніку тягового інвертора.

### **Концепція гібридної фільтрації**

Елегантним інженерним розв'язанням цієї проблеми є застосування гібридних фільтрів.

Гібридний фільтр поєднує в собі переваги пасивних та активних пристроїв.

Пасивна частина (невеликі за масою індуктивність та ємність) бере на себе основне навантаження з фільтрації високочастотних завад.

Активна частина являє собою швидкодіючий транзисторний інвертор малої потужності (силовий електронний компенсатор), який за допомогою спеціальної системи керування миттєво генерує в мережу струми завад, але у протифазі до завад тягового приводу.

У результаті відбувається взаємне знищення (компенсація) небажаних гармонік, а струм, що споживається з контактної мережі, стає практично ідеально згладженим.

### **Способи демпфування коливань пасивної ланки**

Центральною задачею при проектуванні вхідних кіл є надійне демпфування (гасіння) власних коливань пасивного LC-фільтра.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 9    |

Існує три основні підходи до вирішення цієї задачі:

- **Пасивне демпфування:** Полягає у введенні в схему фільтра додаткових резисторів (послідовно з конденсатором або паралельно індуктивності). Це найнадійніший спосіб, проте він супроводжується постійними втратами активної потужності на нагрівання цих резисторів, що знижує загальний ККД локомотива та вимагає відведення тепла.
- **Активне демпфування за допомогою додаткових інверторів:** Силовий компенсатор активної частини гібридного фільтра програмується таким чином, щоб працювати як "віртуальний резистор" на частоті резонансу, активно гасячи коливання без виділення фізичного тепла.
- **Алгоритмічне демпфування (віртуальне):** Найбільш прогресивний метод, який взагалі не потребує встановлення додаткового силового обладнання. Ефект гасіння досягається за рахунок внесення коригувальних поправок безпосередньо в алгоритм керування головним тяговим інвертором. Система керування двигуном постійно моніторить напругу на конденсаторі фільтра і при виникненні коливань миттєво змінює споживання потужності двигуном у протифазі до цих коливань, стабілізуючи систему.

### Практичне значення

Розробка та правильне структурування гібридних фільтрів дозволяє значно полегшити бортове обладнання рухомого складу, гарантувати повну електромагнітну сумісність із найчутливішими системами сигналізації та забезпечити динамічну стійкість енергетичної системи поїзда в усіх режимах експлуатації.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 10   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

### 3. Порівняльний аналіз методів демпфування коливань

| Критерій порівняння            | Пасивне демпфування (Резистивне)       | Активне демпфування (Через компенсатор)      | Алгоритмічне демпфування (Програмне)         |
|--------------------------------|----------------------------------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Додаткові апаратні витрати     | Високі (потужні резистори)             | Середні (блоки керування активною частиною)  | Відсутні (лише оновлення ПЗ)                 |
| Вплив на загальний ККД системи | Знижує (має постійні теплові втрати)   | Практично не впливає                         | Не впливає                                   |
| Масогабаритні показники        | Збільшує вагу та потребує вентиляції   | Потребує незначного простору для електроніки | Ідеальні (не займає місця)                   |
| Надійність та відмовостійкість | Абсолютна (немає складних компонентів) | Залежить від надійності напівпровідників     | Залежить від точності вимірювальних датчиків |

## **Вплив силової електроніки на електромагнітну сумісність тягових мереж**

Сучасний електричний рухомий склад постійного струму (трамваї, тролейбуси, вагони метрополітену, магістральні електровози постійного струму) масово оснащується тяговими приводами на базі трифазних асинхронних або синхронних двигунів.

Перетворення постійної напруги контактної мережі у змінну напругу регульованої частоти і амплітуди здійснюється за допомогою автономних інверторів напруги (АІН) з використанням широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Незважаючи на беззаперечні переваги в енергоефективності та динаміці керування, впровадження імпульсних перетворювачів породило серйозну проблему погіршення електромагнітної сумісності (ЕМС).

Робота АІН супроводжується споживанням імпульсного струму, який містить широкий спектр вищих гармонік.

Потрапляючи в тягову мережу, ці гармоніки викликають спотворення форми напруги, створюють електромагнітні завади для суміжних ліній зв'язку та, що найнебезпечніше, можуть призводити до хибних спрацьовувань рейкових кіл систем сигналізації, централізації та блокування (СЦБ), ставлячи під загрозу безпеку руху.

### **Обмеження класичних пасивних вхідних фільтрів**

Для згладжування пульсацій струму та стабілізації напруги на вході тягового інвертора традиційно встановлюється пасивний LC-фільтр.

Він складається з послідовно включеного лінійного дроселя  $L$  та паралельно підключеного блоку конденсаторів  $C$ .

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 12   |

Пасивний фільтр розраховується таким чином, щоб його частота зрізу була значно нижчою за частоту комутації силових транзисторів інвертора.

Однак застосування виключно пасивних фільтрів має критичні недоліки:

1. Масо-габаритні показники. Для забезпечення глибокого придушення низькочастотних гармонік потрібні дроселі та конденсатори неприпустимо великих номіналів, що значно обтяжує рухомий склад та займає корисний об'єм.

2. Залежність від параметрів мережі. Пасивний фільтр не здатний адаптуватися до зміни конфігурації контактної мережі (наприклад, зміни відстані до тягової підстанції), яка динамічно змінює еквівалентну індуктивність лінії.

### **Резонансні явища та методи демпфування**

Найбільшою проблемою використання вхідних LC-фільтрів на рухомому складі є виникнення резонансних коливань.

Тягова мережа має власну індуктивність  $L$ , яка сумується з індуктивністю фільтра  $L$ .

Контур утворює слабозагасаючу коливальну систему з резонансною частотою.

При різких змінах навантаження (рушання поїзда, зрив зчеплення, перехід у рекуперацію) або при збігу частоти однієї з генеруючих гармонік, у контурі виникають незагасаючі коливання напруги та струму значної амплітуди.

Це може призвести до пробоя ізоляції конденсаторів або аварійного відключення інвертора системою захисту від перенапруг.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 13   |

Класичний метод боротьби з цим явищем — пасивне демпфування шляхом паралельного або послідовного включення демпфуючих резисторів до елементів LC-фільтра.

Проте цей підхід призводить до постійного розсіювання активної потужності (втрат Джоуля) у резисторах, що категорично суперечить сучасним вимогам щодо енергоефективності рухомого складу, особливо в умовах акумуляторного або гібридного ходу.

### **Переваги гібридної топології фільтрації та активного демпфування**

Для комплексного вирішення суперечностей між вимогами ЕМС, масо-габаритними обмеженнями та енергоефективністю сучасна силова електроніка пропонує перехід до гібридних фільтрів.

Гібридний фільтр складається з пасивного фільтра зменшених габаритів (налаштованого лише на високі комутаційні частоти) та паралельно або послідовно підключеного активного силового фільтра (АФ).

Активний фільтр — це додатковий високочастотний перетворювач меншої потужності, який у режимі реального часу вимірює гармонійний склад струму/напруги і генерує в мережу струми, рівні за амплітудою, але протилежні за фазою до струмів завад.

Особливе значення в контексті гібридних структур набувають алгоритми активного демпфування (Active Damping).

Суть методу полягає у зміні алгоритму керування тяговим або активним перетворювачем таким чином, щоб система поводити себе так, ніби в колі присутній демпфуючий резистор ("віртуальний опір"), але без реального фізичного виділення тепла.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 14   |

Математично це реалізується шляхом введення додаткового зворотного зв'язку за струмом конденсатора або напругою фільтра у контур регулювання струму перетворювача.

### **Мета та значення досліджень**

Розробка методів розрахунку параметрів гібридних фільтрів та синтез алгоритмів активного демпфування є складною і надзвичайно актуальною науково-технічною задачею.

Актуальність роботи зумовлена жорсткістю міжнародних стандартів ЕМС на залізничному транспорті (зокрема, серії EN 50121).

Практичне впровадження результатів розробки гібридних структур дозволить:

- Надійно захистити пристрої СЦБ від завад тягового приводу, виключивши аварії через хибну зайнятість блок-ділянок.
- Зменшити масу та габарити вхідного силового обладнання рухомого складу на 20–40%.
- Забезпечити стійкість роботи тягових інверторів при будь-яких параметрах контактної мережі без використання енергоємних демпфуючих резисторів, підвищивши загальний ККД електромеханічного комплексу.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 15   |

# Розділ 1. Розрахунок параметрів та складання структури пасивної частини гібридного фільтра для електромеханічного рухомого складу постійного струму

## 1.1. Дослідження режимів роботи пасивної частини гібридного фільтра для електромеханічного рухомого складу постійного струму

Теоретично можливе створення пасивного одноланкового  $LC$ -фільтра, що пригнічує спектральні складові тягового струму небажаного низькочастотного діапазону, які виникають у перехідних режимах роботи тягової асинхронної електропередачі ЕПС постійного струму [7].

Методика розрахунків такого пасивного  $LC$ -фільтра трохи відрізняється від класичної методики розрахунків параметрів елементів  $LC$ -фільтра автономних інверторів напруги [4] і вона полягає в наступному.

По-перше, вибирається тип фільтрового конденсатора й тип фільтрового дроселя й ухвалюється умова забезпечення мінімальних масогабаритів  $LC$ -фільтра [8].

При використанні в якості елементів  $LC$ -фільтра конденсаторів типу КА75-80 і реакторів з магнітною системою на основі холоднокатаної електротехнічної сталі товщиною не більше 0.35 мм цією умовою є співвідношення [9]

$$A = \frac{C_d}{L_d} = 2 \dots 3 \frac{\Phi}{\Gamma_H}, \text{ при } \sqrt{L_d \cdot C_d} = \text{const.} \quad (1.1)$$

|           |                 |          |        |      |                          |      |      |        |
|-----------|-----------------|----------|--------|------|--------------------------|------|------|--------|
|           |                 |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 |      |      |        |
| Зм.       | Лист            | № докум. | Підпис | Дата | Розділ 1                 | Лім. | Лист | Листів |
| Розробив  | Гаркуша О.В.    |          |        |      |                          |      | 16   | 8      |
| Перевірив | Сінчук І.О.     |          |        |      |                          |      |      |        |
| Реценз.   |                 |          |        |      |                          |      |      |        |
| Н. Контр. | Сінчук І.О.     |          |        |      |                          |      |      |        |
| Затвердив | Пересунько І.І. |          |        |      | КНУ<br>ЕЕМ-22-2          |      |      |        |



По-друге, використовуючи трохи модернізоване співвідношення з роботи [9]

$$f_{\text{гран}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_d \cdot C_d}}, \quad (1.2)$$

де  $f_{\text{гран}}$  - нижня гранична частота робочого діапазону пристроїв сигналізації, централізації й блокування рейкової автоматики.

Враховуючи співвідношення (1.1), знаходимо розрахункове співвідношення для визначення ємності батареї фільтрових конденсаторів

$$C_d = \frac{\sqrt{A}}{2\pi \cdot f_{\text{гран}}}. \quad (1.3)$$

Задаючись спочатку найменшою величиною  $A$  із зазначеного діапазону раціональних співвідношень відповідно до співвідношення (1.1), а це  $A=2$ , знаходимо величину ємності конденсаторної батареї  $C_d$ .

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 17   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

По-третє, перевіряємо величину ємності конденсаторної батареї  $C_d$  на предмет припустимого рівня пульсацій у режимі нерегульованого по напрузі трифазного мостового інвертора, тобто при  $f=f_{max}$  відповідно до співвідношення в роботі [6]:

$$U_{dpm} = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{dp}}{p \cdot 2\pi \cdot f_{max} \cdot C_d} \leq \Delta U_{c \text{ доп}}, \quad (1.4)$$

де  $\Delta U_{c \text{ доп}}$  - припустима величина пульсацій напруги для обраного типу фільтрового конденсатора; для конденсаторів типу КА75-80 вона перебуває із графіка залежності  $\Delta U_{\text{доп}}^* = Uf$ , де  $\Delta U_{\text{доп}}^* = \frac{\Delta U_{c \text{ доп}}}{U_N}$ , наведеного на рис. 1.1 [9].

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 18   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

/

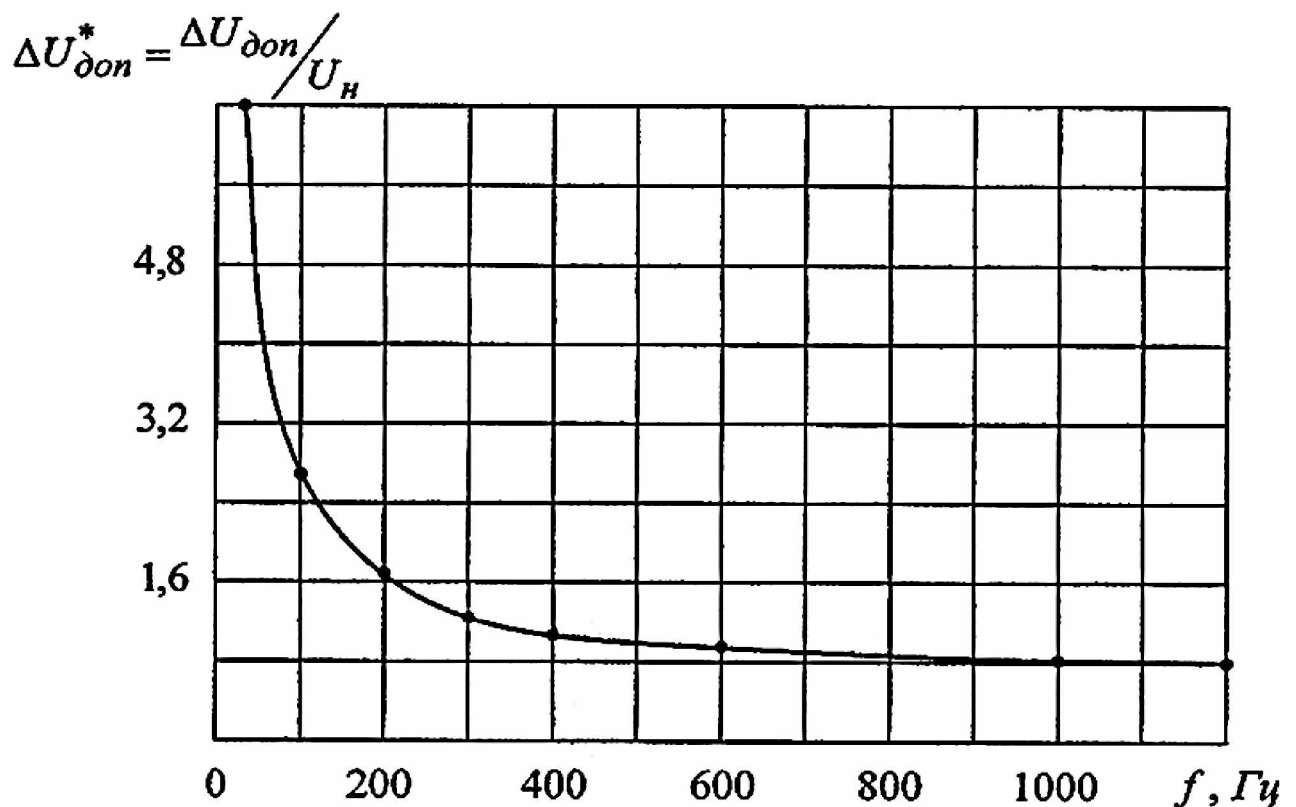


Рис. 1.1 Залежність  $\Delta U_{\text{дон}} = Uf$  для конденсаторів типу КА75-80

У випадку, коли не виконується умова (1.4), потрібно провести перерахунок величини ємності конденсаторної батареї  $C_d$ , ухвалюючи більше значення величини  $A$ , або вибираючи інший тип фільтрового конденсатора із кращими частотними властивостями в порівнянні з конденсаторами типу КА75-80.

І нарешті, визначаємо величину реактора, що згладжує,  $L_d$  зі співвідношення

$$L_d = \frac{C_d}{A}. \tag{1.5}$$

## 1.2. Розрахунок параметрів структури пасивної частини гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму

Прийнявши граничну частоту  $f_{\text{гран}}$  відповідно до рекомендацій роботи [5], а це  $f_{\text{гран}} = 21$  Гц, а також величину  $A=2$ , для раніше розглянутого прикладу (див. підрозділ 1.1) одержимо, що для забезпечення необхідної електромагнітної сумісності тягової асинхронної електропередачі й тягової мережі потрібна установка  $LC$  - фільтра з параметрами:  $C_d=10,7$  мФ,  $L_d=5,36$  мГн.

При такому фільтрі в режимі нерегульованого по напрузі трифазного мостового інвертора напруги при  $f=f_{\text{max}}=100$  Гц пульсації напруги на конденсаторі  $C_d$  і пульсації струму в тяговій мережі відповідно становлять  $\Delta U_{\text{dpt}} = 6,2$  В и  $I_{\text{срт}} = 0,3$  А, що є припустимим як з погляду потужності втрат у конденсаторній батареї, так і з погляду функціонування СЦБ [5].

Показники маси такого фільтра для тягової асинхронної електропередачі з пусковою потужністю 1000 кВт розраховані відповідно до рекомендації роботи [5] при використанні конденсаторів типу КА-75-80-1600-550 мкФ  $\pm 10\%$  і реактора, конструктивно подібного реактора фільтра електровоза НПМ 2 (росія, НЕВЗ) і наведені в табл. 1.1.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 21   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Таблиця 1.1

Розрахункові значення параметрів пасивного Тс-Фільтра

| $C_d, мФ$ | $L_d, мГн$ | $m_{cd}, кг$ | $m_{ld}, кг$ | $\sum m_{ф}, кг$ |
|-----------|------------|--------------|--------------|------------------|
| 10,7      | 5,36       | 168          | 1994         | 2162             |

Тут необхідно відзначити, що такий розв'язок завдання необхідної електромагнітної сумісності практично не реалізоване в тягових асинхронних електропередачах через обмеження по масогабаритним показникам їх тягового електроустаткування.

Масогабаритні показники вище розглянутого пасивного LC-фільтра становлять більш третини від масогабаритних показників тягового електроустаткування серійних вагонів метро з тиристорно-імпульсними системами керування [11], що є неприйнятним як для дахового, так і підвагонного розміщення фільтра.

Для поліпшення масогабаритних показників блоку електромагнітної сумісності тягової асинхронної електропередачі вагона метро, автором пропонується гібридна структура вхідного фільтра (рис. 3.1), що забезпечує електромагнітну сумісність при суттєво менших масі й габаритах.

Фільтрова дія такого гібридного фільтра полягає в тому, що для придушення низькочастотних як канонічних, так і неканонічних гармонік тягового струму використовується активний фільтр (АФ), а для придушення високочастотних гармонік тягового струму, обумовлених власною частотою модуляції активного фільтра, використовується індуктивність  $L_d$  пасивного LC-фільтра.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 22   |

Тому що в запропонованій структурі блоку електромагнітної сумісності тягової електропередачі вагона метро з тяговою мережею метрополітену реактор  $L_d$  пасивного LC-фільтра забезпечує захист перетворювально - регулюючого блоку від мережних перенапруг, то його параметри, у першу чергу, повинні визначатися для цього режиму [10].

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 23   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## Розділ 2. Дослідження принципу дії структури імпульсного активного гібридного фільтра для електромеханічного рухомого складу постійного струму

### 2.1. Аналіз показників структури імпульсного активного гібридного фільтра для електромеханічного рухомого складу постійного струму

Відомо [4,5], що масогабаритні й вартісні показники активного фільтра при використанні його в гібридних схемах фільтрації залежать від прийнятої топології гібридного фільтра й закону керування активним фільтром.

Для паралельної топології гібридного фільтра із двох можливих законів керування активним фільтром: по порушенню й по реакції, найбільш прийнятним законом керування з погляду складності практичної реалізації й масогабаритних показників є закон керування по порушенню [5].

Щодо послідовної топології силової схеми гібридного фільтра, те тут також найбільш прийнятним для практичної реалізації є закон керування активним фільтром по порушенню [11].

|           |                 |          |        |     |                          |      |      |        |
|-----------|-----------------|----------|--------|-----|--------------------------|------|------|--------|
|           |                 |          |        |     | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 |      |      |        |
|           |                 |          |        |     |                          |      |      |        |
| Зм.       | Лист            | № докум. | Підпис | Дат | Розділ 2                 | Літ. | Лист | Листів |
| Розробив  | Гаркуша О.В.    |          |        |     |                          |      | 24   | 3      |
| Перевірів | Сінчук І.О.     |          |        |     |                          |      |      |        |
| Реценз.   |                 |          |        |     |                          |      |      |        |
| Н. Контр. | Сінчук І.О.     |          |        |     |                          |      |      |        |
| Затвердив | Пересунько І.І. |          |        |     | КНУ<br>ЕЕМ-22-2          |      |      |        |



## 2.2. Розробка принципу дії структури імпульсного активного гібридного фільтра для електромеханічного рухомого складу постійного струму

Принцип дії імпульсного активного фільтра з керуванням по порушенню полягає в генеруванні низькочастотних гармонійних складових  $E(t)$ .

Ці складові чисельно рівні й протифазні гармонікам, що пригнічуються, [12,13].

Таким чином, у структурі послідовного гібридного фільтра генеровані активним фільтром низькочастотні гармоніки вмикаються зустрічно-послідовно в коло з генерованими основним перетворювачем небажаними низькочастотними гармоніками.

У структурі паралельного гібридного фільтра генеровані активним фільтром низькочастотні гармоніки вмикаються зустрічно-паралельно в коло з генерованими основним перетворювачем небажаними низькочастотними гармоніками.

Потрібно відзначити, що в цей час найбільш детальне досліджені масогабаритні й вартісні показники активних фільтрів паралельного типу гібридних фільтрів ЕПС постійного струму [4,5,7] і практично зовсім не досліджені активні фільтри послідовного типу гібридних фільтрів ЕПС постійного струму.

Так, маса активного фільтра електровоза НПМ 2 із тривалим тяговим струмом 512 А при напрузі в контактній мережі 1500В становить 260 кг, що дає можливість при реалізації в пасивній частині гібридного фільтра резонансної частоти  $f_{max} = 100$  Гц знизити масу фільтрового пристрою більш ніж удвічі стосовно чисто пасивного фільтра з резонансною частотою  $f_p =$

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 25   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

21 Гц при забезпеченні в обох випадках необхідної електромагнітної сумісності.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 26   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

### Розділ 3. Розрахунок параметрів та структури активної частини гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму

#### 3.1. Розробка структури гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму

Схеми гібридних фільтрів для ЕПС постійного струму залежно від способу придушення низькочастотних гармонік активним фільтром діляться:

- на гібридні фільтри з паралельним активним фільтром [5], який як генератор низькочастотних гармонік включається паралельно основному перетворювачу;
- на гібридні фільтри з послідовним активним фільтром [11], який як генератор низькочастотних гармонік включається послідовно з основним перетворювачем.
- На рис 3.1 показані варіанти структур гібридних фільтрів з паралельним включенням активного фільтра (рис. 3.1, а) і з послідовним включенням активного фільтра (рис. 3.1, б).

|           |                 |          |        |     |                          |  |  |  |      |      |        |    |   |
|-----------|-----------------|----------|--------|-----|--------------------------|--|--|--|------|------|--------|----|---|
|           |                 |          |        |     | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 |  |  |  |      |      |        |    |   |
|           |                 |          |        |     |                          |  |  |  |      |      |        |    |   |
| Зм.       | Лист            | № докум. | Підпис | Дат | Розділ 3                 |  |  |  | Літ. | Лист | Листів |    |   |
| Розробив  | Гаркуша О.В.    |          |        |     |                          |  |  |  |      |      |        | 27 | 5 |
| Перевірів | Сінчук І.О.     |          |        |     |                          |  |  |  |      |      |        |    |   |
| Реценз.   |                 |          |        |     |                          |  |  |  |      |      |        |    |   |
| Н. Контр. | Сінчук І.О.     |          |        |     |                          |  |  |  |      |      |        |    |   |
| Затвердив | Пересунько І.І. |          |        |     |                          |  |  |  |      |      |        |    |   |
|           |                 |          |        |     | КНУ<br>ЕЕМ-22-2          |  |  |  |      |      |        |    |   |

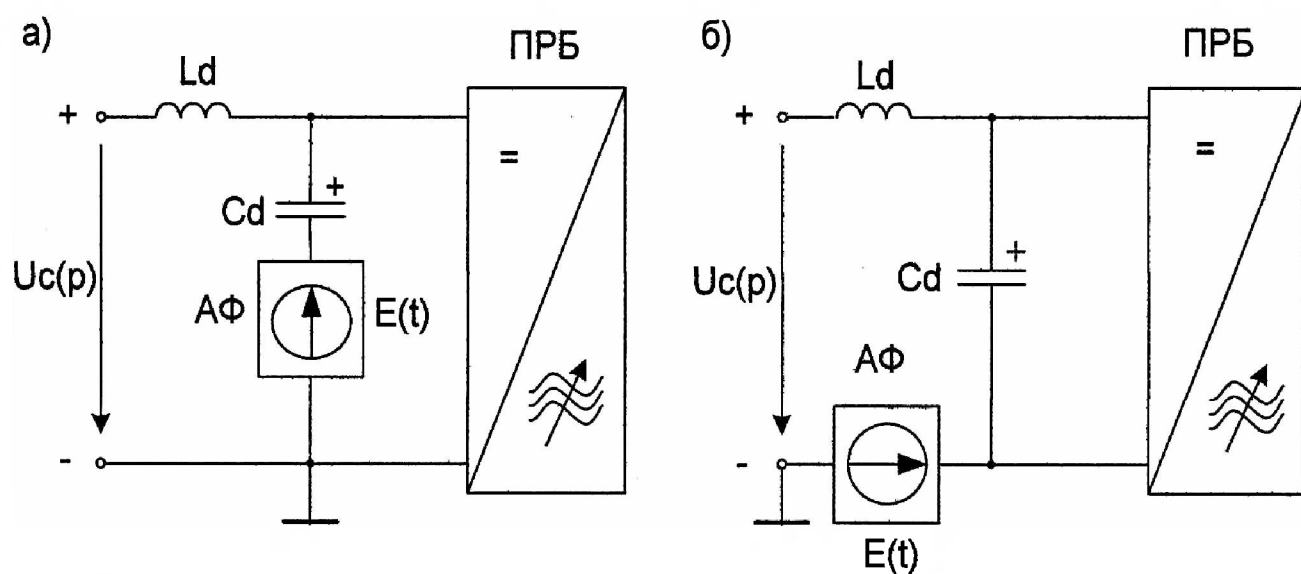


Рис. 3.1. Структури гібридних фільтрів для ЕПС постійного струму:

а) - з паралельним включенням активного фільтра (АФ);

б) - з послідовним включенням активного фільтра (АФ)

### 3.2. Розрахунок режимів роботи активної частини гібридного фільтру для електромеханічного рухомого складу постійного струму

Для того, щоб оцінити ефективність гібридних фільтрів необхідно обґрунтувати рекомендації для вибору параметрів пасивної й активної частини таких фільтрів і визначити їхні показники маси.

Методика розрахунків пасивного одноланкового LC-Фільтра для гібридної структури вхідного фільтра тягової асинхронної електропередачі вагона метро наступна.

По-перше, для попередньо обраного типу фільтрового конденсатора й величини припустимої амплітуди старшої з гармонік пульсацій напруги  $U_{dpm}$  відповідно до класичної методики [4] для частоти виходу інвертора на природній (нерегульований по напрузі) режим  $f_{max}$  знаходимо величину ємності конденсаторної батареї LC-фільтра:

$$C_d = \frac{\sqrt{2} \cdot I_{dp}}{p \cdot 2\pi \cdot f_{max} \cdot U_{dpm}}. \quad (3.1)$$

По-друге, задаючись величиною мережної перенапруги  $U_{\Pi}$ , величина якого обмежена вхідним лінійним розрядником  $P_{\text{л}}$ , часом спрацьовування швидкодіючого вимикача  $t_b$ , максимальною величиною струму мережі  $I_{cm}$  у межах  $(2-3)i_{d0}$  на момент спрацьовування швидкодіючого вимикача, знаходимо величину індуктивності реактора  $L_d$ , що забезпечує обмежуючі властивості LC-фільтра з погляду мережних перенапруг:

$$L_d = \frac{[U_{\Pi} - U_{c(p)}] \cdot t_b}{I_{cm} - i_{d0}}. \quad (3.2)$$

По-третє, виконуємо перевірку величини резонансної частоти LC-фільтра на предмет умови:

$$f_{\text{рез}} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_d \cdot C_d}} < f_{\text{шим}}, \quad (3.3)$$

де  $f_{\text{шим}}$  — частота імпульсної модуляції активного фільтра.

Якщо умова (3.3) не виконується, то потрібно або збільшити частоту імпульсної модуляції  $f_{\text{шим}}$ , або збільшити величину індуктивності обмежуючого реактора  $L_d$ , пам'ятаючи, що в останньому випадку, маса реактора  $L_d$  буде зростати.

Показники маси пасивної частини гібридного фільтра ( LC-фільтра) для тягової асинхронної електропередачі вагона метро пускової потужності 1000 кВт, параметри  $L_d$  і  $C_d$  якої розраховані відповідно до вище розробленої методики при  $U_n=3200B$ ,  $U_{c(p)}=750B$ ,  $I_{cm}=3i_{do}$ ,  $t_b=0,8 \cdot 10^{-3} C$ ,  $i_{do}=1132A$ ,  $f_{max}=100Гц$ ,  $U_{dpm}=18,75B$ ,  $I_{dpm}=176,12A$  наведені в табл. 3.1.

Таблиця 3.1

Розрахункові значення параметрів пасивної частини гібридного фільтра

| $C_d, мФ$ | $L_d, мГн$ | $m_{Cd}, кг$ | $m_{Ld}, кг$ | $\sum m_{LC}, кг$ |
|-----------|------------|--------------|--------------|-------------------|
| 3,5       | 0,866      | 59           | 439          | 498               |

Маса елементів у табл. 3.1 розрахована аналогічно методики розрахунків маси елементів у табл. 1.1.

## Висновки

Для досягнення поставленої у роботі мети необхідно було виконати такі завдання:

Здійснити гармонічний аналіз струмів, що генеруються сучасними імпульсними тяговими перетворювачами рухомого складу в контактну мережу постійного струму.

Проаналізувати спектральний склад гармонійних завад, що генеруються сучасними частотно-регульованими тяговими приводами в контактну мережу постійного струму.

Розробити математичні моделі взаємодії вхідного пасивного LC-фільтра з індуктивністю тягової підстанції та контактної мережі, виявивши умови виникнення низькочастотних резонансних коливань.

Визначити критерії вибору елементів пасивної частини фільтра з урахуванням обмежень на масу, габарити та теплові режими бортового обладнання.

Синтезувати структуру гібридного фільтра, що поєднує пасивні елементи (для фільтрації високочастотних комутаційних завад) та активний силовий фільтр (для придушення низькочастотних гармонік та стабілізації напруги).

Розробити структурну схему активної частини гібридного фільтра (силового електронного компенсатора) та визначити принципи її інтеграції з пасивним колом.

Розрахувати масо-габаритні та електромагнітні параметри компонентів гібридного фільтра.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 32   |



Дослідити фізику виникнення резонансних явищ у вхідному колі локомотива та проаналізувати ефективність різних способів демпфування коливань (пасивних, активних та алгоритмічних).

Дослідити та порівняти методи демпфування коливань LC-фільтра (пасивне демпфування за допомогою RC-ланцюгів та активне демпфування шляхом введення зворотних зв'язків у систему керування перетворювачем), довівши енергетичну перевагу алгоритмів "віртуального резистора".

Сформулювати рекомендації щодо побудови комплексної системи забезпечення електромагнітної сумісності для перспективних зразків рухомого складу.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 33   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

## Список використаних джерел

1. Akagi, H., Watanabe, E. H., & Aredes, M. (2017). Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning (2nd ed.). IEEE Press/Wiley.
2. Steimel, A. (2008). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrieverlag.
3. Brenna, M., Foiadelli, F., & Zaninelli, D. (2018). Electrical Railway Transportation Systems. IEEE Press/Wiley.
4. Bollen, M. H. J., & Gu, I. Y. H. (2006). Signal Processing of Power Quality Disturbances. IEEE Press/Wiley.
5. Gonzalez, J. M., Bueno, A. M., & Aller, J. M. (2015). Active damping of an LC filter for a DC traction system. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62(9), 5644-5654.
6. Routimo, M., Salo, M., & Tuusa, H. (2007). Comparison of voltage-source and current-source shunt active power filters. IEEE Transactions on Power Electronics, 22(2), 636-643.
7. Corasaniti, V. F., Barbieri, M. B., Arnera, P. L., & Valla, M. I. (2009). Hybrid power filter to enhance power quality in a medium-voltage distribution network. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56(8), 2885-2893.
8. Liserre, M., Blaabjerg, F., & Hansen, S. (2005). Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier. IEEE Transactions on Industry Applications, 41(5), 1281-1289. (Note: The active damping principles here are foundational for DC LC-filters as well).

9. Perez, J., Cardenas, V., & Pazos, F. (2012). Hybrid filter topology to eliminate harmonics and compensate reactive power in DC railway traction systems. IET Power Electronics, 5(8), 1483-1491.
10. Hill, R. J. (2001). Electric railway traction part 6: Electromagnetic compatibility—Emissions and susceptibility. Power Engineering Journal, 11(6), 275-284.
11. Tang, Y., Loh, P. C., Wang, P., Choo, F. H., Gao, F., & Blaabjerg, F. (2012). Generalized design of high performance shunt active power filter with strict target dynamics. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 59(8), 3185-3196.
12. Wang, T., Zhang, Z., & Chen, W. (2017). Active damping of DC LC filter resonance using virtual resistor concept for DC traction power supply system. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 3(4), 819-829.
13. Luo, A., Shuai, Z., Shen, J., Zhu, R., & Tu, C. (2010). Design considerations for maintaining DC-side voltage of hybrid active power filter with injection circuit. IEEE Transactions on Power Electronics, 25(1), 75-84.
14. European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). (2017). EN 50121-3-2: Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 3-2: Rolling stock - Apparatus.
15. IEEE. (2014). IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems (IEEE Std 519-2014). IEEE Standards Association.
16. Akagi, H., Watanabe, E. H., & Aredes, M. (2017). Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning (2nd ed.). Wiley-IEEE Press.
17. Steimel, A. (2012). Electric Traction - Motive Power and Energy Supply: Basics and Practical Experience. Oldenbourg Industrie.

18. Bose, B. K. (2020). Power Electronics and Motor Drives: Advances and Trends (2nd ed.). Academic Press.
19. Standard EN 50121-3-3:2016. Railway applications - Electromagnetic compatibility - Part 3-2: Rolling stock - Apparatus.
20. Standard IEC 61287-1:2014. Railway applications - Power converters installed on board rolling stock - Part 1: Characteristics and test methods.
21. Kiessling, F., Puschmann, R., & Schmieder, A. (2018). Contact Lines for Electric Railways. Publicis Publishing.
22. Mhango, L. (2013). Evaluation of hybrid power filters for electric locomotive traction applications. IET Electrical Systems in Transportation, 3(2), 45-53.
23. Paul, C. R. (2006). Introduction to Electromagnetic Compatibility (2nd ed.). John Wiley & Sons.
24. Song, K., & Lee, H. (2016). Active damping control of LC filter resonance for DC traction systems. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 65(9), 6981-6989.
25. Blazic, R., & Papic, I. (2011). Mitigation of low-frequency resonances in DC railway electrification systems using active power filters. IEEE Transactions on Power Delivery, 26(4), 2134-2142.
26. Arrillaga, J., & Watson, N. R. (2003). Power System Harmonics (2nd ed.). John Wiley & Sons.
27. Pugi, L., Rindi, S., & Ercole, G. (2013). Modelling and simulation of damping strategies for light rail vehicle input filters. International Journal of Heavy Vehicle Systems, 20(1), 54-76.
28. Kazmierkowski, M. P., Krishnan, R., & Blaabjerg, F. (2002). Control in Power Electronics: Selected Problems. Academic Press.

29. Tallam, R. M., Lukaszewski, R. A., & Schlegel, D. W. (2007). Active damping of LC filters for high-power AC drives. IEEE Transactions on Industry Applications, 43(5), 1312-1321.

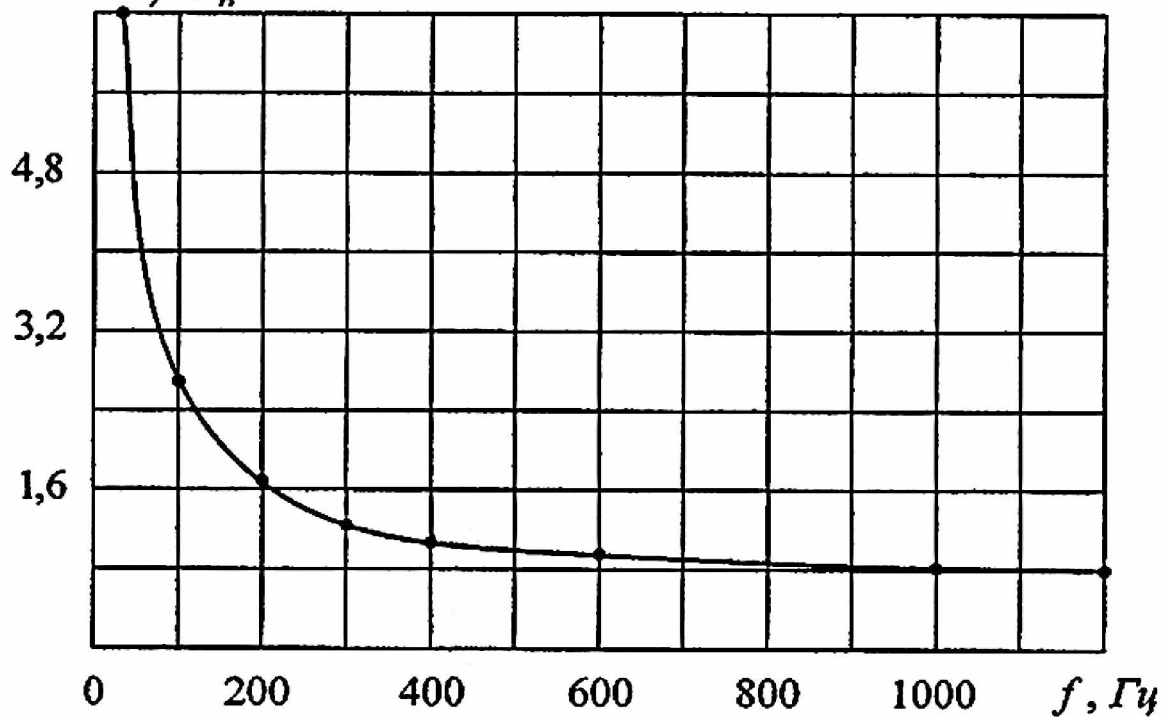
30. Hill, R. J. (1994). Electric railway traction. Part 2: Traction power supplies and electromagnetic compatibility. Power Engineering Journal, 8(6), 275-286.

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
|      |      |          |        |      |                          | 37   |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          |      |

Залежність  $\Delta U_{\text{доп}} = Uf$  для конденсаторів типу КА75-80

/

$$\Delta U_{\text{доп}}^* = \Delta U_{\text{доп}} / U_{\text{н}}$$



## Додаток Б

Розрахункові значення параметрів пасивного Тс-Фільтра

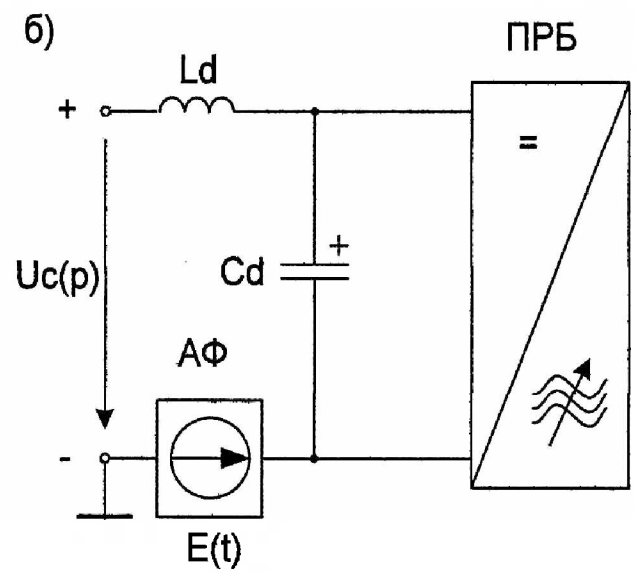
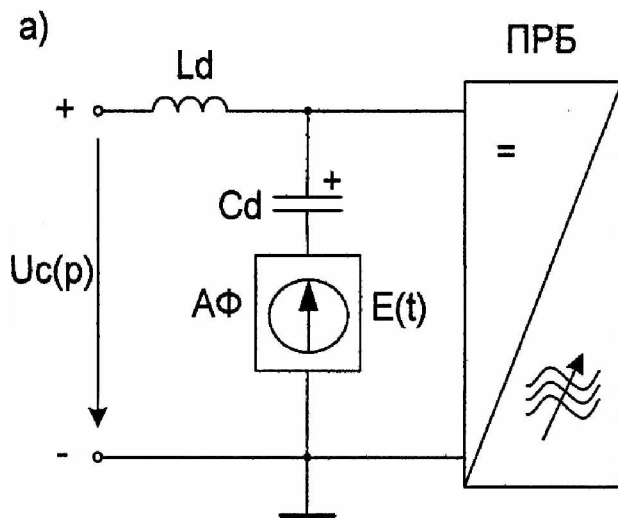
| $C_d, мФ$ | $L_d, мГн$ | $m_{cd}, кг$ | $m_{ld}, кг$ | $\Sigma m_{ф}, кг$ |
|-----------|------------|--------------|--------------|--------------------|
| 10,7      | 5,36       | 168          | 1994         | 2162               |

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 39   |

Структури гібридних фільтрів для ЕПС постійного струму:

а) - з паралельним включенням активного фільтра (АФ);

б) - з послідовним включенням активного фільтра (АФ)





## Додаток Г

Розрахункові значення параметрів пасивної частини гібридного фільтра

| $C_d, мФ$ | $L_d, мГн$ | $m_{Cd}, кг$ | $m_{Ld}, кг$ | $\sum m_{LC}, кг$ |
|-----------|------------|--------------|--------------|-------------------|
| 3,5       | 0,866      | 59           | 439          | 498               |

|      |      |          |        |      |                          |      |
|------|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
|      |      |          |        |      | ЕТФ.КНУ.РБ.141.26.248-03 | Арк. |
| Змн. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |                          | 41   |