

Міністерство освіти і науки України
Криворізький національний університет
Електротехнічний факультет
Кафедра електричної інженерії

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до кваліфікаційної роботи
магістра
(рівень вищої освіти)

зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

На тему: «Дослідження впливу режимів роботи тягового електроприводу
електрифікованого транспорту на процес функціонування мережі живлення»

КНУ.МР.141.25.665-11

Виконав студент II курсу, групи ЕПА-24м /Богдан МАЗУН/
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
«Електромеханічні системи автоматизації та електропривод»
(шифр і назва спеціальності, освітньо-професійної програми)

Керівник:

к.т.н., доцент

_____/Ігор СІНЧУК/

Нормоконтролер:

к.т.н., доцент

_____/Ігор СІНЧУК/

Гарант ОПП:

к.т.н., доцент

_____/Юрій ОСАДЧУК/

Кривий Ріг
2025 р.

Криворізький національний університет

Факультет: електротехнічний

Освітній рівень: магістр

Спеціальність: 141 - Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ

МАЗУН Богдан Вячеславович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Дослідження впливу режимів роботи тягового електроприводу
електрифікованого транспорту на процес функціонування мережі живлення

1. Термін подання студентом роботи: 15 грудня 2025 р.
2. Мета та завдання кваліфікаційної роботи: Метою є дослідження впливу режимів роботи тягового електроприводу електрифікованого транспорту на процес функціонування мережі живлення.
3. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які необхідно розробити) I. Загальні положення щодо процесу дослідження впливу режимів роботи тягового електроприводу електрифікованого транспорту на процес функціонування мережі живлення; II. Дослідження впливу рівня комутаційних перенапруг на вході й виході LC-Фільтра блоку електромагнітної сумісності тягового електроприводу електрифікованого транспорту на процес функціонування мережі живлення; III. Дослідження впливу режимів обмеження напруги на вході перетворювально-регулюючого блоку при мережних комутаційних перенапругах на роботу тягового електроприводу електрифікованого транспорту.
4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) I. Функціональне призначення блоку EMC; II. Мережеві комутаційні перенапруги та їх обмеження; III. Часовий спосіб обмеження напруги.

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	Загальні положення	10.09.25
2	Дослідження впливу рівня комутаційних перенапруг на вхіді й виході LC-Фільтра на процес функціонування мережі живлення	19.10.25
3	Дослідження впливу режимів обмеження напруги на роботу тягового електроприводу електрифікованого транспорту	07.12.25

Дата видання завдання 01.09.2025 р.

Здобувач вищої освіти _____
(підпис)

Богдан МАЗУН
(Ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____
(підпис)

Ігор СІНЧУК
(Ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка до випускової кваліфікаційної роботи магістра на тему: «Дослідження впливу режимів роботи тягового електроприводу електрифікованого транспорту на процес функціонування мережі живлення», КНУ.РМ.141.25.665-11

Мета дослідження – дослідження впливу режимів роботи тягового електроприводу електрифікованого транспорту на процес функціонування мережі живлення.

Об'єкт дослідження – тяговий електропривод електрифікованого транспорту.

Предмет дослідження – режими роботи тягового електроприводу електрифікованого транспорту.

Блок забезпечення електромагнітної сумісності (БЕМС) призначений для зниження взаємного впливу тягової електропередачі вагонів і живильної тягової мережі.

Основними функціями БЕМС є забезпечення припустимого рівня перенапруг на вході перетворювально-регулюючого блоку (ПРБ) в аномальних режимах, підтримка аперіодичного процесу заряду конденсатора *LC*-фільтра при підключенні, підтримання припустимого рівня пульсацій струму в живильній мережі для надійного функціонування пристроїв зв'язку й автоматики, а також забезпечення режиму реостатного гальмування за відсутності споживачів рекуперативної енергії.

Робоча напруга у тяговій мережі змінюється в діапазоні 550–975 В при номінальній величині 750 В.

Максимальна величина перенапруг (наприклад, через грозові

ураження або різке скидання навантаження іншими вагонами) обмежується пристроєм обмеження перенапруг (ОПН) у складі БЕМС до рівня (2,7–3,2) кВ.

Ці комутаційні перенапруги є неробочими режимами, і їхнє виникнення призводить до відключення тягової електропередачі швидкодіючим автоматичним вимикачем.

Для обмеження мережних комутаційних перенапруг використовується часовий спосіб затримки наростання напруги на фільтровому конденсаторі Cd за допомогою індуктивності Ld .

Ця затримка дозволяє відключити тягову електропередачу, при цьому приріст напруги на конденсаторі Cd залишається прийнятним для забезпечення вентильної міцності напівпровідникових приладів ПРБ 17 класу по напрузі.

ЕЛЕКТРИФІКОВАНИЙ ТРАНСПОРТ, ТЯГОВИЙ
ЕЛЕКТРОПРИВОД, РЕЖИМИ РОБОТИ, МЕРЕЖА ЖИВЛЕННЯ

Зміст

Вступ.....	7
Розділ 1. Загальні положення щодо процесу дослідження впливу режимів роботи тягового електроприводу електрифікованого транспорту на процес функціонування мережі живлення	8
Розділ 2. Дослідження впливу рівня комутаційних перенапруг на вході й виході LC-Фільтра блоку електромагнітної сумісності тягового електроприводу електрифікованого транспорту на процес функціонування мережі живлення	9
Розділ 3. Дослідження впливу режимів обмеження напруги на вході перетворювально-регулюючого блоку при мережних комутаційних перенапругах на роботу тягового електроприводу електрифікованого транспорту.....	22
Висновки	36
Список використаних джерел	38
Додатки.....	39

Вступ

Як свідчать дослідження, причиною мережних комутаційних перенапруг є енергія, запасена в індуктивності тягової мережі і яка обумовлена робочими або аварійними струмами інших вагонів, що працюють на одній ділянці фідерної зони.

При спрацьовуванні їх комутаційних апаратів (швидкодіючих автоматичних вимикачів) цей запас енергії звільняється, що й приводить до підвищення напруги в контактній рейці й, отже, до перенапруг на вході тягової електропередачі працюючого на цій ділянці вагона.

При цьому, найбільшою проблемою для працюючого вагона є перенапруга, обумовлене відключенням від тягової мережі інших вагонів з аварійним режимом у вигляді короткого замикання.

Розділ 1. Загальні положення щодо процесу дослідження впливу режимів роботи тягового електроприводу електрифікованого транспорту на процес функціонування мережі живлення

Блок забезпечення електромагнітної сумісності (БЕМС) знижує взаємний вплив тягової електропередачі вагонів і живильної тягової мережі в робітників і аномальних режимах.

По-перше, БЕМС забезпечує припустимий рівень перенапруг на вході перетворювально-регулюючого блоку при аномальних режимах роботи живильної тягової мережі перенапруг, що викликають появу, на вході тягової електропередачі вагонів.

По-друге, БЕМС забезпечує аперіодичний (або близький до нього) процес заряду конденсатора LC-Фільтра при підключенні тягової електропередачі до живильної тягової мережі й повторних торканнях струмоприймачем контактної рейки після відриву.

У третіх, БЕМС підтримує припустимий рівень пульсацій струму в живильній тяговій мережі в, що встановився й перехідному режимах роботи тягової електропередачі, що забезпечує надійне функціонування пристроїв зв'язки й автоматики.

У четвертих, БЕМС забезпечує режим реостатного гальмування вагона при відсутності в тяговій мережі споживачів рекуперативної енергії й знятті напруги живлення (відрив струмоприймача, наїзд на нейтральну вставку, спрацьовування швидкодіючого вимикача).

У п'ятих, БЕМС забезпечує захист перетворювально-регулюючого блоку від струмів розряду конденсатора LC-Фільтра при коротких замиканнях у фазах комутатора інвертора.

Розділ 2. Дослідження впливу рівня комутаційних перенапруг на вході й виході LC-Фільтра блоку електромагнітної сумісності тягового електроприводу електрифікованого транспорту на процес функціонування мережі живлення

Робоча напруга U_c у тяговій мережі змінюється в діапазоні 550-975 В при номінальній його величині на струмоприймачі 750 В [5].

Максимальна ж величина перенапруг у тяговій мережі, яка має характер одиночних імпульсів, викликаних зовнішніми стосовно працюючого вагону причинами, у багато разів перевищує максимальна робоча напруга.

Причому, тут необхідно мати на увазі не тільки випадки грозової поразки контактної мережі, але й виникаюча перенапруга на вході тягової електропередачі, обумовлене різким скиданням навантаження іншими вагонами або поїздами, що працюють у режимі тяги на одній ділянці тягової мережі [7].

На практиці, рівень цих перенапруг на вході тягової електропередачі працюючого вагона обмежується пристроєм обмеження перенапруг (ОПН) блоку електромагнітної сумісності (БЕМС), що представляє собою лінійний розрядник на основі металооксидних резисторів (обмежники перенапруг типу *Polim HND* фірми *ABB*), який зменшує імпульс зовнішньої перенапруги до рівня (2,7-3,2) кВ [6].

Комутаційні перенапруги (грозові й мережні) є причиною небезпечних одноразових перенапруг на вході перетворювально-регулюючого блоку, тому що це є неприпустимим з погляду надійності його вентильного комутатора.

Стосовно тягової електропередачі вагона комутаційні перенапруги є неробочими, тобто, спрацьовування лінійного розрядника супроводжується наступним відключенням тягової електропередачі від живильної тягової мережі за допомогою швидкодіючого автоматичного вимикача.

Розглянемо характеристики імпульсу мережних комутаційних перенапруг на вході блоку електромагнітної сумісності (на вході його LC-Фільтра).

Слід указати, що відмінною рисою мережних комутаційних перенапруг є те, що вони, як правило, мають значно більшу тривалість у часі, чому грозові комутаційні перенапруги і їх амплітуда U_m може бути менше величини напруги спрацьовування пристрою обмеження перенапруги (ОПН), тобто:

$$U_m < U_{\text{опн}} \quad (2.1)$$

Як ми вже відзначали, причиною мережних комутаційних перенапруг є енергія, запасена в індуктивності тягової мережі і яка обумовлена робочими або аварійними струмами інших вагонів, що працюють на одній ділянці фідерної зони.

При спрацьовуванні їх комутаційних апаратів (швидкодіючих автоматичних вимикачів) цей запас енергії звільняється, що й приводить до підвищення напруги в контактній рейці й, отже, до перенапруг на вході тягової електропередачі працюючого на цій ділянці вагона.

При цьому, найбільшою проблемою для працюючого вагона є перенапруга, обумовлене відключенням від тягової мережі інших вагонів з аварійним режимом у вигляді короткого замикання.

Форма імпульсу мережної перенапруги досить складна й залежить від ряду факторів, що важко враховуються, зокрема, від величини спадання напруги на дузі, що вимикаються комутаційних апаратів.

Для приблизної оцінки процесів у вхідному LC-Фільтрі цю форму можна представити, як це показано на рис. 2.1.

На думку автора, зображена на рис. 2.1,а форма імпульсу мережної комутаційної перенапруги є найгіршою з погляду подальшого негативного впливу на вентиляний комутатор ПРБ тягової електропередачі вагонів.

На інтервалі $(t < t_1)$, який передуює виникненню імпульсу мережної комутаційної перенапруги, у тяговій мережі діє робоча напруга з величиною обумовленою діючими параметрами, тобто:

$$550\text{В} \leq U_c \leq 975\text{В}. \quad (2.2)$$

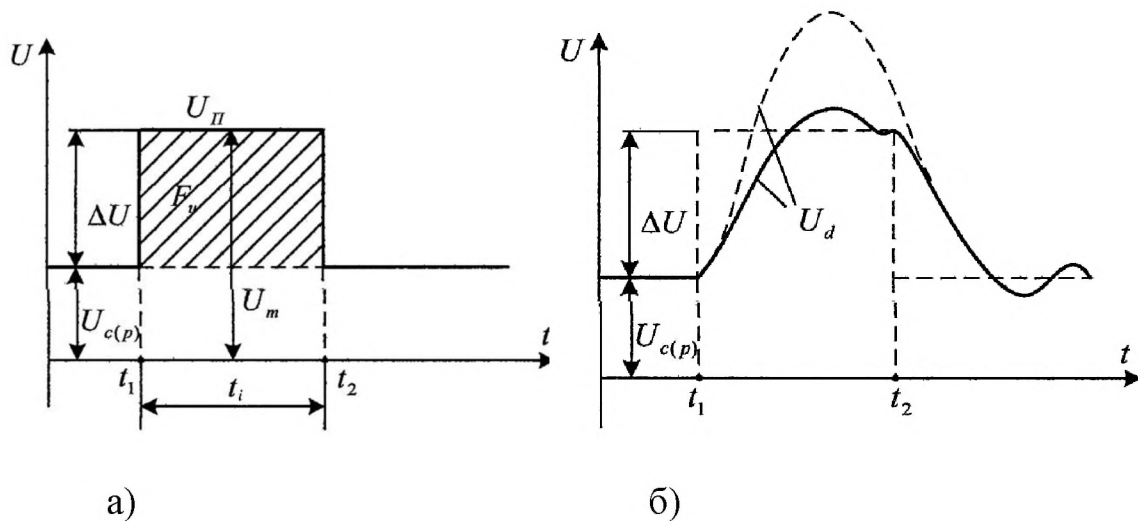


Рис. 2.1. Форма імпульсів мережних комутаційних перенапруг:

а) - на вході LC-Фільтра; б) - на виході LC-Фільтра

У момент t_1 починає відключатися комутаційний апарат на паралельно працюючому вагоні (поїзді), що веде до досить швидкого підвищення напруги в тяговій мережі.

Амплітуда імпульсу перенапруги U_m обмежується спаданням напруги на елементах дугогасної камери комутаційного апарата, що **вимикається**, після того, як надлишковий запас енергії в індуктивності тягової мережі буде неуважний, напруга в тяговій мережі вертається приблизно до колишнього рівня (момент t_2 на рис. 2.1,а).

На рис. 2.2,а показана еквівалентна схема, що відповідає розглянутому вище процесу.

На рис. 2.2,б показаний хід зміни надлишкового струму i тягової мережі в часі.

Цей струм описується диференціальним рівнянням [8]:

$$L_c \cdot \frac{di}{dt} + R_c \cdot i - \Delta U = 0 \quad (2.3)$$

вирішенням якого є вираження:

$$i = (i_H + i_\infty) e^{-\frac{t}{\tau_c}} - i_\infty, \quad (2.4)$$

де i_H - початкове значення надлишкового струму перед відключенням;

$i_{\infty} = \frac{\Delta U}{R_c}$ - кінцеве значення струму, яке було б досягнуте, якби спадання напруги $U_{\Pi} = U_H + \Delta U$ при будь-яких значеннях t ;

τ - постійна часу тягової мережі.

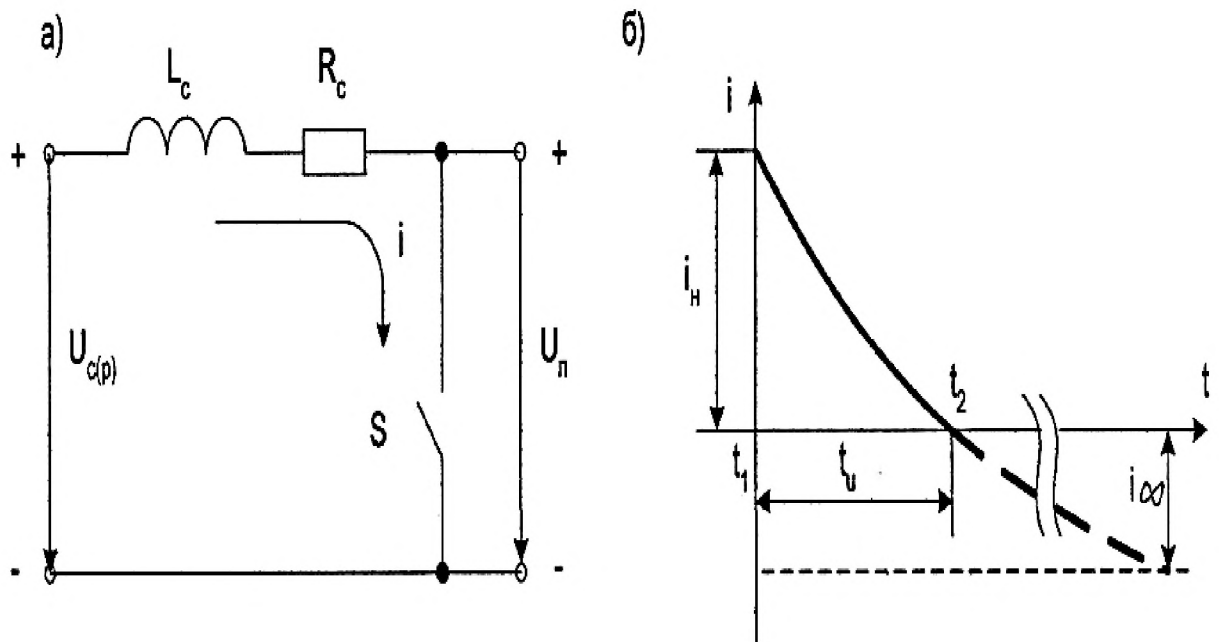


Рис. 2.2. Еквівалентна схема відключення вагона (а) і діаграма зміни в часі надлишкового струму при відключенні (б):

L_c - індуктивність тягової мережі;

R_c — активний опір мережі;

S - роз'єднувальний контакт комутаційного апарата.

Фізично ж при досягненні струмом i нульового значення дуга на контактах комутаційного апарата гасне, після чого в схемі встановлюються значення $i=0$ і $U_{\Pi} = U_{c(p)}$.

Тривалість імпульсу мережної комутаційної перенапруги знаходимо з вираження (2.4) прийнявши $i=0$:

$$t = \tau_c \ln \left(\frac{i_H}{i_{\infty}} + 1 \right) \quad (2.5)$$

Якщо у першій наближенні зневажити активним опором тягової мережі:

($R_c=0$) і врахувати, що при маленьких $\frac{i_H}{i_{\infty}}$ справедливо наближена рівність [7]:

$$\ln \left(\frac{i_H}{i_{\infty}} + 1 \right) \cong \frac{i_H}{i_{\infty}}, \quad (2.6)$$

тоді зі співвідношення (2.5) і (2.4) знайдемо:

$$t_u = \frac{L_c \cdot i_H}{\Delta U}. \quad (2.7)$$

Співвідношення (2.7) можливо одержати й безпосередньо з рис. 2.2,6.

З урахуванням прийнятого зміни величини ΔU у часі (рис. 2.1,а) процес її зміни можна записати в такий спосіб:

$$L_c \cdot i_n = F_u \quad (2.8)$$

де F_u - вольт-секундна площа імпульсу мережної комутаційної перенапруги, показана на рис. 2.1,а штрихуванням.

На практиці величина ΔU , а також процес її зміни в часі залежить від багатьох важко облікованих факторів і вони можуть суттєво змінюватися.

Однак величина вольт-секундної площі не залежить від властивостей комутаційного апарата.

Отже, ухвалюючи $\Delta U = \text{const}$, одержимо з вираження (2.8) характерну гіперболічну залежність тривалості імпульсу мережної комутаційної перенапруги від його амплітуди.

Для кількісної оцінки величини мережної комутаційної перенапруги потрібно враховувати часткові значення індуктивності й активного опору тягової мережі L_{cd} і R_{cd} .

Найбільші значення індуктивності й активного опору тягової мережі будуть для випадку, коли поїзд перебуває на середині ділянки між двома підстанціями, тобто:

$$L_{сmax} = L_{сд} \cdot \frac{l}{4}, \quad (2.9)$$

$$i \quad L_{сmax} = L_{сд} \cdot \frac{l}{4} \quad (2.10)$$

де l - відстань між двома сусідніми підстанціями.

Потрібно мати на увазі, що фактична величина $R_{сmax}$ у цій крапці буде більшої через внутрішній опір підстанцій, як джерел живлення.

Струм короткого замикання вагона поїзда, який перебуває на середині ділянки тягової мережі між двома підстанціями буде рівний:

$$i_{к.з} = \frac{U_c}{R_c} \quad (2.11)$$

Фактичний початковий струм i_n можна представити у функції струму короткого замикання $i_{к.з.}$, уводячи для цього відносний параметр:

$$i^* = \frac{i_n}{i_{к.з.}} \quad (2.12)$$

Уведемо також відносний параметр ΔU^* , що характеризує величину імпульсу перенапруги:

$$\Delta U^* = \frac{\Delta U}{U_{c(p)}} \quad (2.13)$$

Тоді зі співвідношень (2.5) і (2.7) з урахуванням співвідношення (2.4) одержимо вираження:

$$K_t = \frac{t_u}{t_u^*} = \frac{\ln \left(\left(\frac{i^*}{\Delta U^*} + 1 \right) \right)}{i^* / \Delta U^*}, \quad (2.14)$$

Яке й дозволяє оцінити вплив активного опору тягової мережі R_c на тривалість імпульсу перенапруги, яка приблизною формулою (2.7) не враховується.

Залежність (2.14) представлена графіком функції $K_t = f \left(\frac{i^*}{\Delta U^*} \right)$ на рис. 2.3.

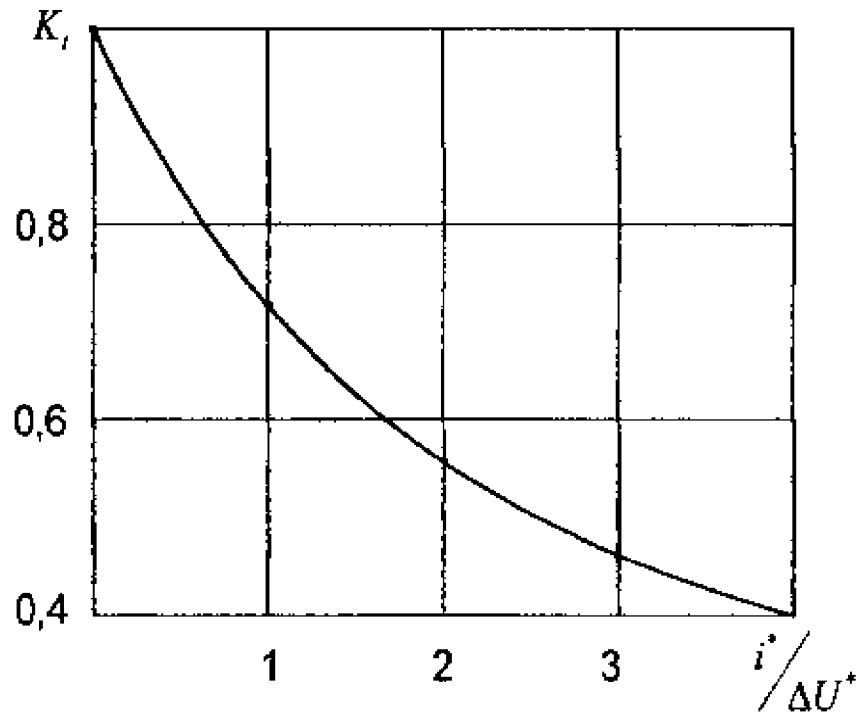


Рис. 2.3. Графік функції $K_t = f\left(\frac{i^*}{\Delta U^*}\right)$

Величина K_t характеризує зменшення тривалості імпульсу мережної комутаційної перенапруги на вході фільтра тягової електропередачі, обумовлене впливом активного опору тягової мережі.

Тривалість імпульсу перенапруги при цьому зменшується через втрати енергії в активному опорі тягової мережі.

Як показує аналіз функції $K_t = f\left(\frac{i^*}{\Delta U^*}\right)$ активний опір тягової мережі впливає ($K_t < 1$) при відключенні струмів короткого замикання ($i^* = 0$) якщо при цьому перенапруга ΔU істотно менше робочої напруги в тяговій мережі ($\Delta U^* < 1$).

В інших випадках можливо зневажити впливом активного опору тягової мережі на тривалість імпульсу мережної комутаційної напруги, віднісши різницю між t_u' і t_u за рахунок запасу.

Спрощена еквівалентна схема тягової електропередачі працюючого на лінії вагона показана на рис. 2.4, де коливальний контур $L_d C_d$ відповідає її мережному (вхідному) фільтру, що згладжує, а резистор, що демпфірує, R ураховує вплив навантаження інвертора й гальмового резистора R_T , який можливо підключити до фільтрового конденсатора в момент виникнення на вході фільтра мережної комутаційної напруги U_{Π} .

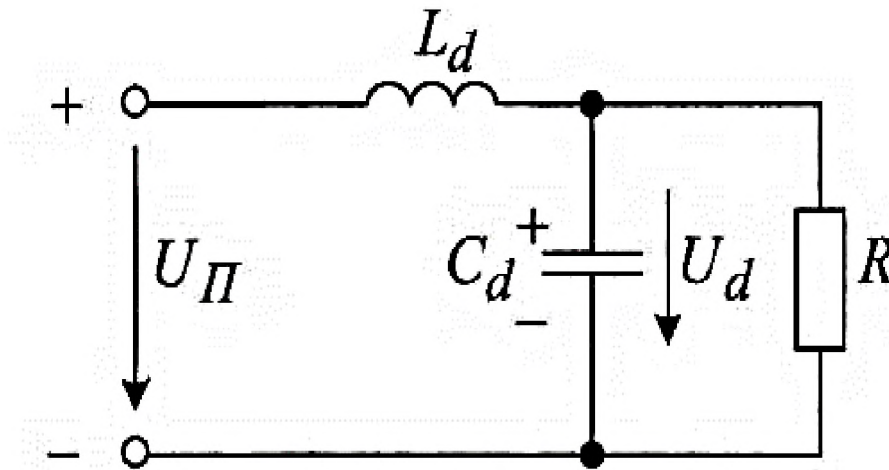


Рис. 2.4. Спрощена еквівалентна схема тягової електропередачі вагона

При відсутності резистора, що демпфірує, R напруга U_d на виході, що згладжує LC - фільтра, яке прикладається до входу вентиляного комутатора інвертора напруги має вигляд пунктирної кривої, показаної на рис. 2.1,6.

У результаті дії коливального процесу перенапруга на виході фільтра $U_d - U_c$ може досягтися $2\Delta U$ [8], що є небажаним при обмеженому запасі вентиляної міцності напівпровідникових приладів комутатора інвертора.

Тут потрібно відзначити, що дія, що демпфірує, навантаження може бути відсутнє зовсім (режим холостого ходу) або бути дуже малим (режими близькі до холостого ходу).

Крім цього, необхідно мати на увазі, що при наявності швидкодіючого регулятора, що підтримує постійне споживане навантаження, можливо створити ефект, зворотний демпфіруванню, тобто інвертор напруги з боку входу вентильного комутатора поводить як негативна активна провідність, а це сприяє розгойдуванню коливань.

Тому підключення гальмового реостата при мережних комутаційних перенапругах на вході тягової електропередачі іноді є доцільним.

Залежно від добротності коливального контуру:

$$Q \frac{R}{\rho} = \frac{R}{\sqrt{\frac{L_d}{C_d}}} \quad (2.15)$$

Процес установлення U_d при впливі на вході імпульсу мережної комутаційної перенапруги може бути коливальним ($Q > 0,5$) і аперіодичним ($Q < 0,5$). Відповідним розрахунками вхідного фільтра можна забезпечити аперіодичний або слабкоколивальний процес, як це показано на рис. 2.1,6 суцільною лінією.

Однак, тут треба відзначити, що такий хід процесу можна забезпечити для всіх режимів роботи частотно-регульованого електропривода тільки при попередньому підключенні гальмового реостата до моменту виникнення імпульсу перенапруги на вході фільтра.

При попередньому підключенні гальмового реостата на вході фільтра й слабкоколивальному характері процесу, час установлення нового значення

напруги на виході LC-Фільтра в першому наближенні дорівнює чверті періоду вільних коливань не демпфованого LC-Фільтра [3]:

$$t_y \cong \frac{\pi}{2} \sqrt{L_d C_d}. \quad (2.16)$$

Якщо тривалість імпульсу мережної комутаційної перенапруги t_u на вході фільтра менше величини t_y обумовленої з (2.16), то тоді величина перенапруги на виході фільтра буде меншою в порівнянні з ΔU на його вході, а якщо ні, то ця величина близька до ΔU і не буде залежати від тривалості t_u мережного комутаційного імпульсу перенапруги.

Таким чином, якщо немає достовірних даних про реальні характеристики імпульсів мережних комутаційних перенапруг, то розрахунки системи обмеження величини перенапруги на виході фільтра при мережних комутаційних перенапругах повинен виконуватися по величині ΔU що задається характеристиками лінійного розрядника на вході тягової електропередачі й значенні тривалості імпульсу перенапруги перевищуючим час установлення перенапруги t_y .

Розділ 3. Дослідження впливу режимів обмеження напруги на вході перетворювально-регулюючого блоку при мережних комутаційних перенапругах на роботу тягового електроприводу електрифікованого транспорту

Розглянемо один зі способів обмеження напруги на вході перетворювально-регулюючого блоку, а саме часовий спосіб затримки наростання напруги на фільтровому конденсаторі C_d , при яким за допомогою індуктивності L_d забезпечується затримка наростання напруги на виході фільтра й, отже, на вході вентильного комутатора ПРБ, силові ключі якого є найбільш уразливими до перенапруг.

Одночасно ця затримка використовується для відключення тягової електропередачі вагона від контактної рейки за допомогою автоматичного швидкодіючого вимикача ВШЛ.

При цьому способі обмеження амплітуди імпульсу мережної перенапруги на вході тягової електропередачі пристрій обмеження перенапруги (ОПН) виконує допоміжну роль, дозволяє знизити тільки масу дроселя L_d і використовувати лінійні розрядники у вигляді обмежників напруги.

На рис. 3.1 наведена еквівалентна схема вхідного ланцюга БЕМС тягової асинхронної електропередачі вагона й діаграми напруги й струму, що пояснюють реалізацію тимчасового способу обмеження величини перенапруги на вході ПРБ (на виході LC-Фільтра) при мережних комутаційних перенапругах.

Еквівалентна схема рис. 3.1,а містить у собі LC-Фільтр (індуктивність L_d і ємність C_d), лінійний швидкодіючий автоматичний вимикач ВШЛ, навантаження, заміщену джерелом струму i_d , пристрій обмеження

перенапруги (лінійний розрядник) $P_{\text{л}}$ і джерело напруги живлення $U_{c(p)}$, напруга якого з моменту початку мережної комутаційної перенапруги на вході тягової електропередачі обмежене на рівні $U_{c(p)} + \Delta U$ або власним лінійним розрядником $P_{\text{л}}$ вагона, або комутаційним апаратом, що відключають паралельний вагону споживач струму в тяговій мережі. Відзначимо, що активний фільтр (АФ) стосовно перенапруг на вході тягової електропередачі являє собою закоротку, тому на рис. 3.1,а він не показаний.

С початком мережної комутаційної перенапруги до дроселя L_d прикладається різниця напруг $U_{\text{п}} - U_d$, яка показана на рис. 3.1,б штрихуванням. Під дією цієї різниці напруг у дроселі L_d починає наростати струм джерела живлення $i_{\text{п}}$ відповідно до закону [7]:

$$L_d \cdot \frac{di_{\text{п}}}{dt} = U_{\text{п}} - U_d. \quad (3.1)$$

Тут потрібно відзначити, що дуже важливо, щоб сердечник фільтрового дроселя L_d не насичувався до моменту часу t_2 , коли тягова електропередача вагона відключиться швидкодіючим вимикачем ВШД від джерела живлення.

Якщо насичення сердечника дроселя відбудеться, тоді індуктивність дроселя різко зменшується, що приводить до швидкого зростання струму живлення i_c і, отже, до швидкого заряду конденсатора C_d , як мінімум, до повної напруги $U_{c(p)} + \Delta U$. Для того щоб дросель L_d не насичувався, повинне виконуватися умова [3]:

$$F_u = L_d(I_{\text{пм}} - i_d) \leq W F_0(B_s - B_m), \quad (3.2)$$

де F_u – вольт-секундна площа прикладеного до обмотки дроселя напруги, яка показана на рис. 3.1,6 штриховкою;

F_o - поперечний переріз сердечника дроселя;

W - число витків обмотки дроселя;

B_s, B_m - індукція насичення й прийнята розрахункова робоча індукція матеріалу сердечника відповідно;

I_{Im} - амплітуда струму живлення (рис. 3.1,в).

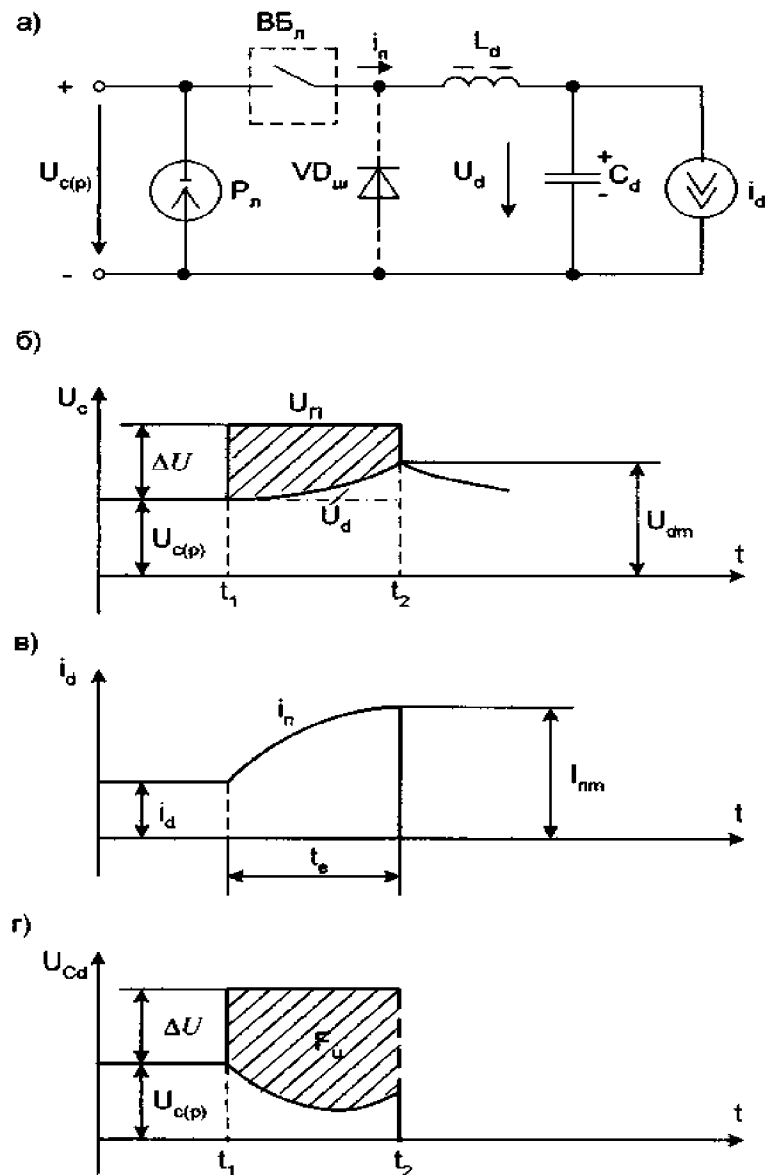


Рис. 3.1. Еквівалентна схема вхідного ланцюга БЕМС тягової електропередачі вагона (а) і діаграми струму й напруги при годинному способі обмеження комутаційних мережних перенапруг (б, в, г)

Таким чином, для мінімізації розмірів дроселя L_d , необхідно прагнути до зниження вольт-секундної площі F_u прикладеного до його обмотки напруги.

Деякий ефект у цьому напрямку дає підвищення напруги на конденсаторі C_d яке відбувається внаслідок заряду його різницеvim струмом $i_n - i_d$ (рис. 3.1, б,в):

$$C_d \cdot \frac{dU_d}{dt} = i_n - i_d. \quad (3.3)$$

Але цей ефект не дуже значний, оскільки різницеvий струм зростає поступово. Якщо допустити, що його зростання йде за лінійним законом, то напруга U_d на конденсаторі LC-Фільтра буде наростати за параболічним законом і очевидно, що вольтсекундную площа F_u можна приблизно обчислити як площу прямокутника, показаного на рис. 3.1,6 пунктиром, тобто:

$$F_u = \Delta U \cdot t_b, \quad (3.4)$$

де t_b - час спрацьовування лінійного швидкодіючого вимикача ВБЛ.

З наведеного випливає, що підключення гальмового реостата R_T у момент початку мережної комутаційної перенапруги не дає позитивного результату.

Дійсно, оскільки наростання струму живлення i_n затримується дроселем L_d , те підключення гальмового реостата приводить до швидкого

розряду конденсатора C_d струмом $i_R = U_d/R_T$, що може суттєво збільшити вольт-секундну площу F_u (рис. 3.1,г).

Більш доцільно підключати гальмовий реостат до конденсатора C_d у момент спрацювання швидкодіючого вимикача ВШЛ ($t=t_2$).

У цьому випадку, при наявності діода VD_{in} у входному ланцюзі БЕМС (на рис. 3.1,а він показаний пунктиром), полегшує процес вимикання швидкодіючого вимикача ВШЛ і не буде подальшого наростання напруги на конденсаторі C_d за рахунок коливального процесу через залишковий струм I_{Im} в індуктивності дроселя L_d .

Проведемо тепер оцінку параметрів дроселя L_d вхідного LC - фільтра й визначимо основну характеристику цього дроселя при реалізації тимчасового способу обмеження мережних комутаційних напруг, маючи у виді, що основне завдання LC - фільтра це обмеження пульсацій вхідного струму й додання джерелу живлення властивостей джерела напруги при роботі інвертора напруги ПРБ.

Нехай алгоритм керування інвертором напруги такий, що на частоті $f_1 = f_{max}$, відповідної до максимальної швидкості вагона V_k , в інверторі відбувається перехід з режиму синусоїдального імпульсного регулювання вихідної напруги на режим нерегульованого по напрузі інвертора, тобто починається в тяговій електропередачі режим ослаблення поля асинхронних двигунів при подальшому розгоні.

Тоді для відносного діючого значення p - й гармонійної складової вхідного струму маємо [5]:

$$I_{dp}^* = \frac{\sqrt{2}}{p^2 - 1} \sqrt{p^2 \cdot \sin^2 \varphi_{b1} + \cos^2 \varphi_{b1}}, \quad (3.5)$$

де $(\varphi_{b1}$ - кут зрушення між напругою й струмом перших гармонійних складових на частоті f_{max}) .

У якості базисного струму при цьому ухвалюємо значення постійної складової вхідного струму при допущенні, що $\varphi_{b1} = 0$, тобто:

$$i_{d0m} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} I_{b1};$$

$$I_{dp} = I_{dp}^* \cdot i_{d0m}, \quad (3.6)$$

де I_{b1} - діюче значення першої гармоніки вихідного струму однієї фази інвертора.

Для трифазного моста інвертора для визначення старшої гармоніки вхідного струму потрібно прийняти $p=6$.

Задаючись значеннями коефіцієнтів пульсацій напруги на фільтровому конденсаторі $K_{\Pi u}$ й струму в дроселі $K_{\Pi i}$, визначаємо допустимі напруження й струм пульсацій:

$$U_{dpm} = K_{\Pi u} \cdot U_d,$$

$$I_{\Pi pm} = K_{\Pi i} \cdot i_{d0}. \quad (3.7)$$

Ємність і індуктивність LC - фільтра при забезпеченні заданих пульсацій визначаємо зі співвідношень [4]:

$$P\omega C_d = \frac{\sqrt{2}I_{dp}}{U_{dpm}}; \quad (3.8)$$

$$P\omega L_d = \frac{U_{dpm}}{I_{\Pi pm}}, \quad (3.9)$$

де $\omega = 2\pi \cdot f_{max}$.

Наприклад, при повній потужності вагона $S_H = 1000$ кВт; $\cos\varphi_{b1} = 0.85$; $f_{max} = 100$ Гц; $U_d = 750$ В; $P = 6$; $= 0.025$ і $K_{\Pi i} = 0.001$ маємо:

$$U_{b1} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_d = 338 \text{ В}; I_{b1} = \frac{S_H}{3U_{b1}} \cong 986 \text{ А}; i_{dom} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \cdot I_{b1} \cong 1332 \text{ А};$$

$$I_{dp}^* = 0.132; I_{dp} = I_{dp}^* \cdot i_{dom} = 176,12 \text{ А}; I_{\Pi pm} = K_{\Pi i} \cdot i_{dom} = 1,331 \text{ А};$$

$$U_{dpm} = K_{\Pi i} \cdot U_d = 18,75 \text{ В}; C_d = 3500 \text{ мкФ}; L_d = 3,74 \text{ мГн};$$

$$t_y = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \sqrt{L_d \cdot C_d} = 5,7 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \rho = \sqrt{\frac{L_d}{C_d}} = 1,033 \text{ Ом}.$$

Надалі ухвалюємо, що вольт-секундна площа напруги на обмотці фільтрового дроселя L_d при перенапругах на вході тягової електропередачі апроксимується рівністю (3.4).

За умовами роботи дроселя L_d у номінальному режимі (режимі обмеження пульсацій струму в живильній мережі) можна записати два основні співвідношення [1]:

$$\psi_m = L_d \cdot I_{\Pi} = WF_0 \cdot B_m$$

$$i \quad F_{0k} = W \frac{I_{\Pi}}{j \cdot K_k}, \quad (3.10)$$

де ψ_m - амплітуда потокозчеплення обмотки в номінальному режимі;

$I_{\Pi} = i_{dom} \cdot \cos \varphi_{b1}$ номінальний струм джерела живлення значення, що діє, якого у зв'язку з малістю пульсацій ухвалюють рівним постійної складовій вхідного струму i_{do} ;

j - припустима щільність струму в провіднику обмотки дроселя;

K_k - коефіцієнт заповнення котушки провідником;

F_{0k} - перетин вікна сердечника дроселя.

Зі співвідношення (3.10) одержуємо:

$$F_0 \cdot F_{0k} = \frac{L_d \cdot I_{\Pi}^2}{B_m \cdot j \cdot K_k} = F_0^* \cdot F_{0k}^* \cdot a^4, \quad (3.11)$$

де a - базисний розмір сердечника, у якості якого для магнітних елементів звичайно ухвалюють ширину сердечника [6];

F_0^* і F_{0k}^* - перетин сердечника й вікна у відносних одиницях ($F_0^* = \frac{F_0}{a^2}$ і $F_{0k}^* = \frac{F_{0k}}{a^2}$).

Як впливає из формули (3.11), величина $F_0 F_{0k}$ у першому наближенні пропорційна обсягу сердечника й, отже, масі дроселя.

Заміняючи нерівність (3.2) рівністю й враховуючи перше співвідношення з вираження (3.10), одержимо умову працездатності фільтрового дроселя як обмежуючого елемента при мережних комутаційних перенапругах:

$$F_u = \psi_m \frac{B_s - B_m}{B_m}. \quad (3.12)$$

Оскільки величина F_u задається умовою (3.4), те з вираження (3.12) можна знайти припустиму амплітуду робочої індукції сердечника дроселя:

$$B_m = \frac{B_s}{1 + F_u / \psi_m}. \quad (3.13)$$

Тому що:

$$B_s / B_m = I_{\Pi m} / i_{d0}, \quad (3.14)$$

Тоді величина B_m не повинна бути надто малою, тому що при цьому буде більша амплітуда струму $I_{\Pi m}$ і, отже, струм, що заряджає конденсатор C_d , а також буде великий струм, що комутується швидкодіючим вимикачем ВБД.

На практиці величина B_s/B_m не повинна перевищувати 2-3, а якщо ні, то доцільно збільшити індуктивність L_d щодо значення, мінімально необхідного за умовами фільтрації (3.9).

Однак при цьому слід урахувати, що маса дроселя L_d буде зростати.

Розглянемо роботу дроселя L_d з погляду обмеження мережної перенапруги на вході комутатора ПРБ.

Так при індуктивності дроселя $L_d = 3,74 \cdot 10^{-3}$ Гн у відповідності даних проведеного раніше розрахунків маємо:

$$i_{d0} = I_{\Pi} \cong i_{d0m} \cdot \cos \varphi_{b1} = 1132 \text{ A}$$

$$\psi_m = L_d \cdot I_{\Pi} = 4,234 \text{ B} \cdot \text{с.}$$

При рівні обмеження перенапруги на вході тягової електропередачі $U_m = 3200 \text{ В}$, що задається лінійним розрядником пристрою ОПН, і при $U_{c(p)} = 750 \text{ В}$ маємо:

$$\Delta U = U_m - U_{c(p)} = 2450 \text{ В}$$

Для часу спрацьовування швидкодіючого вимикача $t_b = 0,8 \cdot 10^{-3}$ с із вираження (3.4) одержимо:

$$F_U = 1,96B \cdot c.$$

При $B_s = 2\text{Тл}$ (для холоднокатаної електротехнічної сталі) з формули (3.13) маємо:

$$B_m \cong 1.34 \text{ Тл}$$

$$\frac{B_s}{B_m} = I_{\text{Пм}}/i_{d0} = 1,492.$$

Тобто, різницевий струм:

$$I_{\text{Пм}} - i_{d0} = 557\text{А}$$

Приріст заряду на обкладинках конденсатора C_d за час t_b при допущенні лінійності закону наростання струму становить:

$$\Delta q = \frac{1}{2} (I_{\text{Пм}} - i_{d0}) \cdot t_b = 0.223 \text{ кул},$$

що дає приріст напруги на фільтровому конденсаторі C_d :

$$\Delta U_d = \frac{\Delta q}{C_d} \cong 64U$$

Величина приросту напруги на фільтровому конденсаторі C_d є цілком прийнятною завбільшки із крапки зору забезпечення вентиляційної міцності напівпровідникових приладів типу БТІЗ і ТКУЕ (*IGBT* і *IGCT*) 17 класу по напрузі щодо їхнього застосування в одноключових плечах мостових комутаторів інверторів напруги ПРБ навіть із запасом по напрузі рівним 2.

На закінчення відзначимо, що джерелом одиночних імпульсів перенапруги на вході вентиляного комутатора ПРБ у тяговій електропередачі вагона можуть бути й коливальні процеси в LC – фільтрі при заряді конденсатора, а також через нестійкість контакту між струмоприймачем вагона й контактною рейкою в процесі руху поїзда.

Причому, на відміну від одиночних мережних перенапруг, які є стосовно тягової електропередачі не робітниками (спрацьовування ОПН супроводжується наступним відключенням тягової електропередачі від контактної мережі) перенапруги, обумовлені коливальними процесами в LC - фільтрі, носять робочий характер, тобто їхнє виникнення не повинне приводити до відключення тягової електропередачі від контактної рейки й збоїв у її роботі.

Висновки

Мета дослідження – дослідження впливу режимів роботи тягового електроприводу електрифікованого транспорту на процес функціонування мережі живлення.

Об'єкт дослідження – тяговий електропривод електрифікованого транспорту.

Предмет дослідження – режими роботи тягового електроприводу електрифікованого транспорту.

Блок забезпечення електромагнітної сумісності (БЕМС) призначений для зниження взаємного впливу тягової електропередачі вагонів і живильної тягової мережі.

Основними функціями БЕМС є забезпечення припустимого рівня перенапруг на вході перетворювально-регулюючого блоку (ПРБ) в аномальних режимах, підтримка аперіодичного процесу заряду конденсатора *LC*-фільтра при підключенні, підтримання припустимого рівня пульсацій струму в живильній мережі для надійного функціонування пристроїв зв'язку й автоматики, а також забезпечення режиму реостатного гальмування за відсутності споживачів рекуперативної енергії.

Робоча напруга у тяговій мережі змінюється в діапазоні 550–975 В при номінальній величині 750 В.

Максимальна величина перенапруг (наприклад, через грозові ураження або різке скидання навантаження іншими вагонами) обмежується пристроєм обмеження перенапруг (ОПН) у складі БЕМС до рівня (2,7–3,2) кВ.

Ці комутаційні перенапруги є неробочими режимами, і їхнє виникнення призводить до відключення тягової електропередачі швидкодіючим автоматичним вимикачем.

Для обмеження мережних комутаційних перенапруг використовується часовий спосіб затримки наростання напруги на фільтровому конденсаторі Cd за допомогою індуктивності Ld .

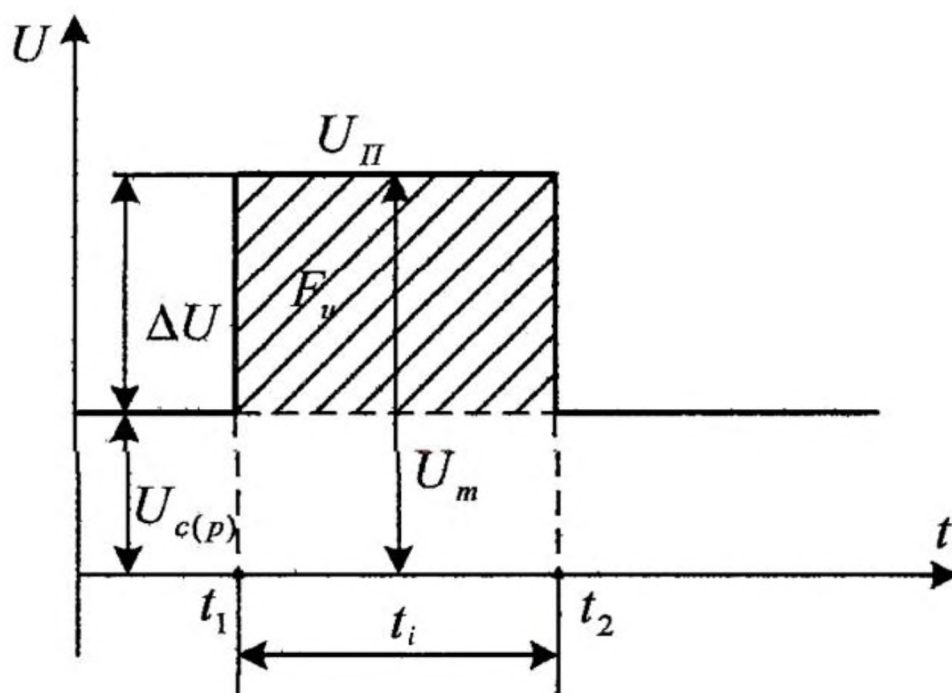
Ця затримка дозволяє відключити тягову електропередачу, при цьому приріст напруги на конденсаторі Cd залишається прийнятним для забезпечення вентильної міцності напівпровідникових приладів ПРБ 17 класу по напрузі.

Список використаних джерел

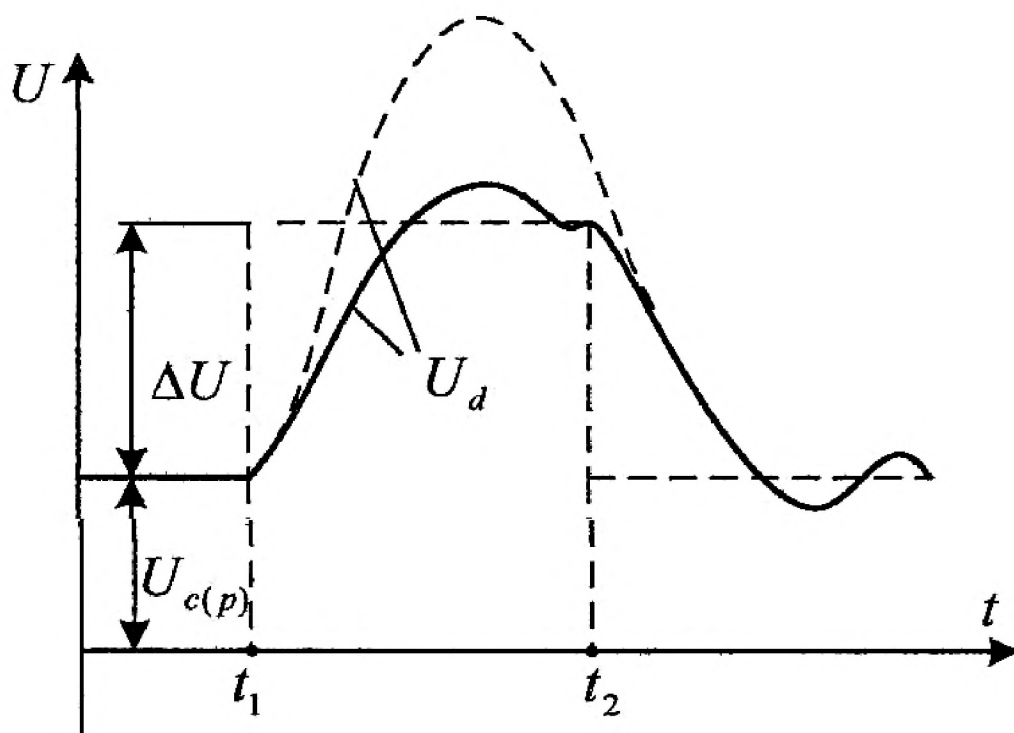
1. Електромагнітна сумісність радіоелектронної апаратури. / Іванов В. О., Ільницький Л. Я., Щербіна О. А. – К.: НАУ, 2014. – 312 с.
2. Генрі В. Отт. Проектування електромагнітної сумісності. / Henry W. Ott Electromagnetic Compatibility Engineering. Wiley 2009, 880 p. ISBN: 978-0-470-18930
3. Електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів. Навчальний посібник. / Укладач В.В. Пілінський. Рекомендовано НМУ, № Е10/11-156 від 23.12.2010 – К. НТУУ „КПІ”. – 374 с. Електронна версія 2010. – 17,5 МБ
4. Виноградов Є.М., Винокуров В.І., Харченко І.П. Електромагнітна сумісність радіоелектронних засобів. – Л.: Суднобудування, 1986. – 264 с.
5. Князєв А.Д., Кечієв Л.М., Петров Б.М. Конструювання радіоелектронної та електронно-обчислювальної апаратури з урахуванням ЕМС. – М.: Радіо та зв'язок, 1989. *Додаткова*
6. Директива ЕМС 2014/30/EU Європейського Парламенту та Ради від 16 квітня 2014 року про гармонізацію законів держав-членів щодо надання на ринку радіообладнання та скасування Директиви 2004/108/ЄС.
7. Y.O. Onikienko, V.V. Pilinsky, P.V. Popovych, V.S. Lazebnyi, O.I. Smolenska, V.S. Baran. Моделювання режимів роботи та електромагнітних завад GaN-транзисторних перетворювачів / Modelling of Operation Modes and Electromagnetic Interferences of GaN Transistor Converters "Електротехніка" ISSN 2309-3404 № 3. – 2020. С. 37–42
8. Вільямс Т., Армстронг К. ЕМС систем та установок. – М.: Видавничий дім «Технології», 2003. – 508 с.

Додатки

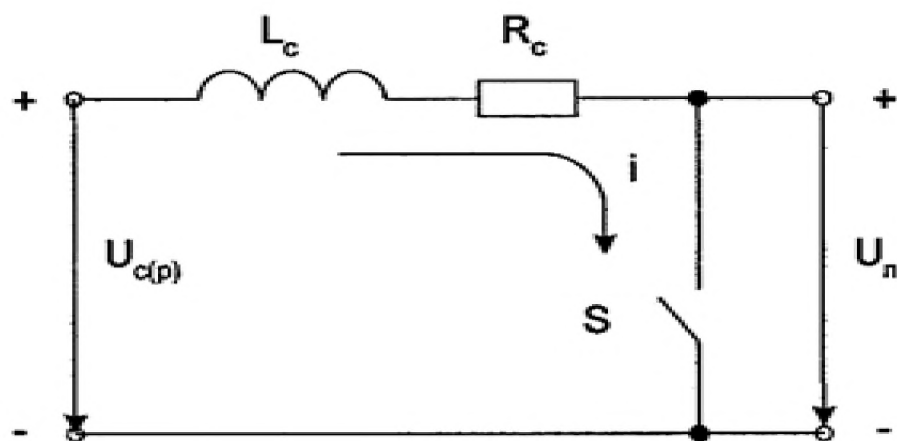
Форма імпульсів на вході LC-Фільтра мережних комутаційних перенапруг



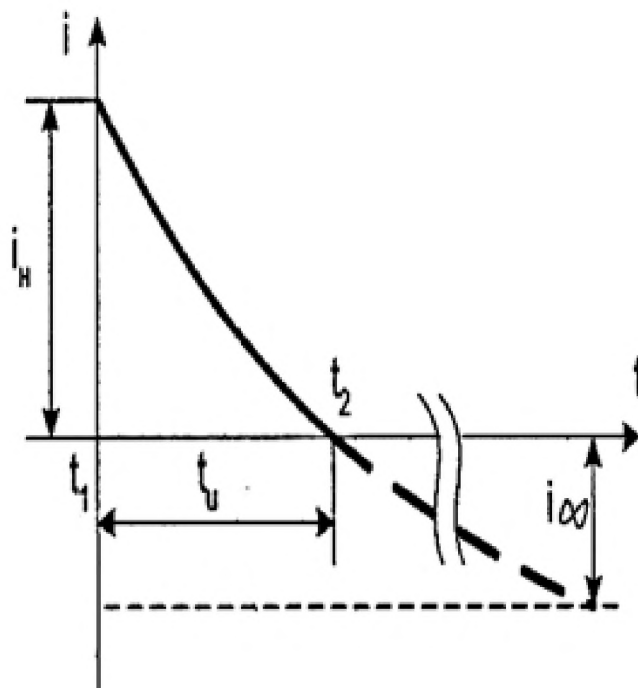
Форма імпульсів на виході LC-Фільтра мережних комутаційних перенапруг



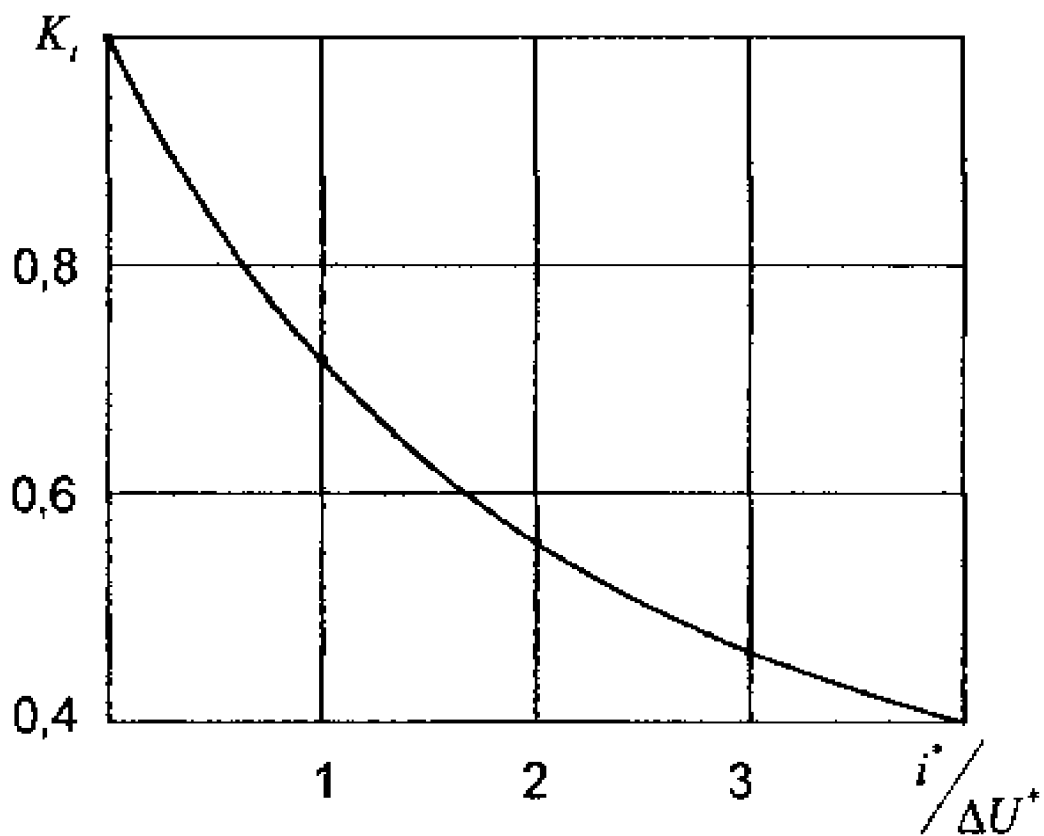
Еквівалентна схема відключення вагона



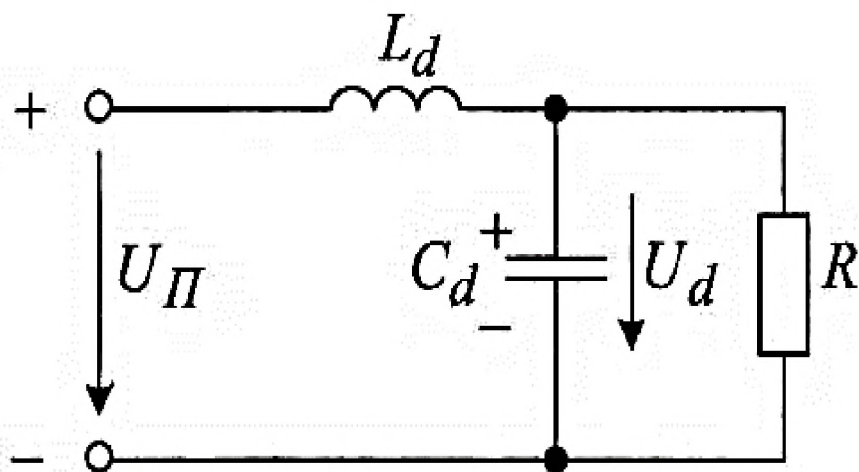
Діаграма зміни в часі надлишкового струму при відключенні



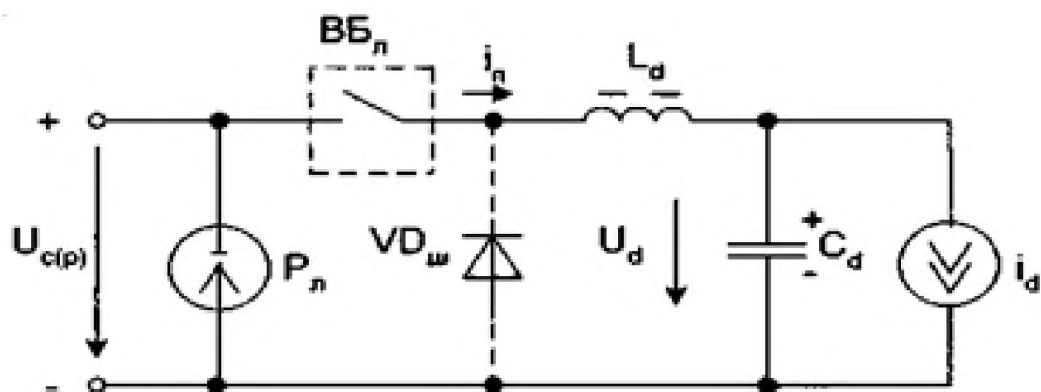
Графік функції $K_t = f\left(\frac{i^*}{\Delta U^*}\right)$



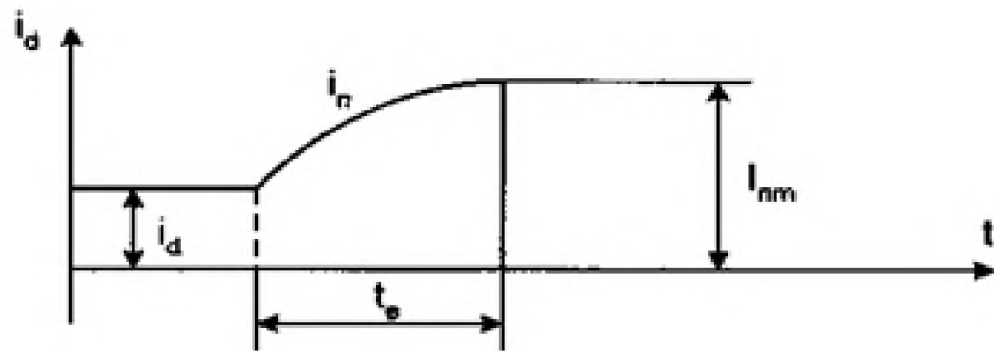
Спрощена еквівалентна схема тягової електропередачі вагона



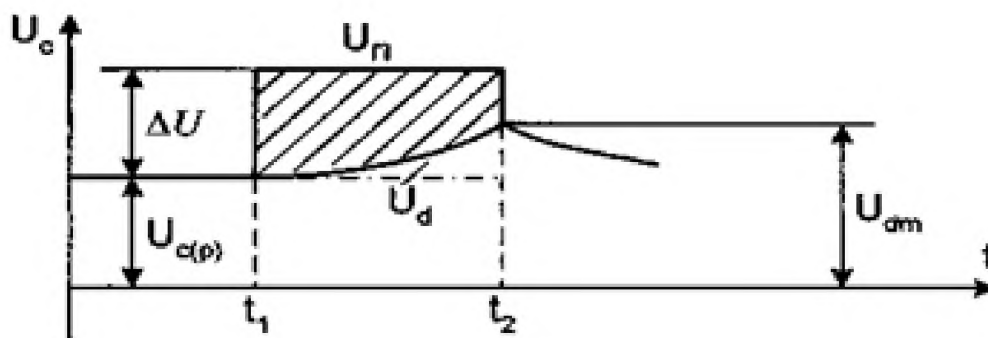
Еквівалентна схема вхідного ланцюга БЕМС тягової електропередачі
вагона



Діаграма струму й напруги при годинному способі обмеження
комутаційних мережних перенапруг



Діаграма напруги при годинному способі обмеження комутаційних
мережних перенапруг



Діаграма напруги при годинному способі обмеження комутаційних
мережних перенапруг

