

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

Дніпровський національний університет залізничного транспорту  
імені академіка В. Лазаряна

Кафедра Інтелектуальні системи електропостачання

«ДО ЗАХИСТУ»

В.о. завідувача кафедри  
\_\_\_\_\_ /Д. О. Босий/

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_\_\_ р.

**ДИПЛОМНА РОБОТА**  
на здобуття освітнього ступеня «магістр»

Галузь знань **14 Електрична інженерія**

Спеціальність **141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

Освітньо-професійна програма **Електротехнічні системи електроспоживання**

Тема **Інтелектуальні системи регулювання напруги на шинах тягової підстанції постійного струму**

Theme **Intelligent voltage regulation systems on DC traction substation tiores**

Керівник дипломної роботи доц. \_\_\_\_\_ В. М. Ляшук

Нормоконтролер доц. \_\_\_\_\_ Т. М. Міщенко

Студент групи ЕС1921 \_\_\_\_\_ С. Ю. Федянович

Student Fedianovych Stanislav

Дніпро – 2020

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна

Факультет «Управління енергетичними процесами»  
Кафедра «Інтелектуальні системи електропостачання»  
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»  
Спеціалізація Електротехнічні системи електроспоживання

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Зав. кафедри  
\_\_\_\_\_ Сиченко В.Г.  
(підпис)  
« 20 » січня 2020 р.

### **ЗАВДАННЯ**

до дипломного проекту на здобуття ОС магістр  
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

студент групи ЕС1921 Федянович Станіслав Юрійович  
(номер групи) (ПІБ)

1 Тема дипломного проекту (роботи) «Інтелектуальні системи регулювання напруги на шинах тягової підстанції постійного струму».

затверджена наказом по університету від від « 17 » січня 2020 р. № 52 ст.

2 Термін подання студентом закінченого проекту « 7 » грудня 2020 р.

3 Вихідні дані до дипломного проекту Незалежне регулювання і стабілізація напруги по фідерам міжпідстанційної зони.

4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань до розробки)

4.1 Режим напруги в тяговій мережі при підвищенні швидкості руху

4.2 Методи стабілізації напруги в тяговій мережі з можливістю регулювання рівня напруги, незалежно по кожному фідеру

4.3 Вплив електрорухомого складу на перехідний процес в тяговій мережі

4.4 Аналіз факторів, що характеризують перехідний процес при короткому замиканні і в установленому режимах

4.5 Силова частина системи стабілізації напруги

5 Перелік креслень (демонстраційного матеріалу)

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ п/п	Назва розділу дипломного проекту	Термін виконання	Обсяг розділу, %
1	<u>Вступ</u>	09.09	5
2	Режим напруги в тяговій мережі при підвищенні швидкості руху	21.10	25
3	Вплив електрорухомого складу на перехідний процес в тяговій мережі	11.11	30
4	Аналіз факторів, що характеризують перехідний процес при короткому замиканні і в установленому режимі	25.11	30
5	<u>Висновки</u>	05.12	5
6	Перелік креслень (демонстраційного матеріалу) : <u>ілюстрований опис результатів досліджень</u>	07.12	5

Дата видачі завдання: « 20 » січня 2020 р.

Керівник дипломного проекту: доцент \_\_\_\_\_ В.М. Ляшук  
(підпис)

Завдання прийняв до виконання: \_\_\_\_\_ С.Ю. Федянович  
(підпис)

## Реферат

Пояснювальна записка має обсяг 55 сторінок, складається з 9 розділів, та містить 18 ілюстрацій, 19 бібліографічних джерел.

В даному дипломному проекті, проведений аналіз існуючих систем регулювання та стабілізації напруги тягового електропостачання постійного струму і вибір необхідного, сучасного устаткування.

Було розглянуто можливість поліпшення ефективності існуючих централізованих систем електропостачання за рахунок регулювання напруги на шинах тягових підстанцій. Провели спостереження сучасного перетворювача на базі *IGBT*-транзистора в якості певного ключа та інвертора. А також, розглянули систему електропостачання, коли на підстанції встановлюються незалежно по кожному фідеру агрегати обмеженої потужності, які використовуються як вольтододаткові.

Ключові слова: БІПОЛЯРНІ ТРАНЗИСТОРИ, ТИРИСТОРИ, ПОСТІЙНИЙ СТРУМ, ДІОДНІ ВИПРЯМЛЯЧІ, ВОЛЬТОДОДАТКОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, ІНВЕКТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ, АВТОМАТИЧНИЙ РЕГУЛЯТОР, СТАБІЛІЗАТОР НАПРУГИ, МОДУЛЯЦІЯ НА *IGBT*, ШИРОТНО-ІМПУЛЬСНА МОДУЛЯЦІЯ.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1.РЕЖИМ НАПРУГИ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПРИ ПІДВИЩЕННІ ШВИДКОСТІ РУХУ.....	9
2.МЕТОДИ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ В ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ З МОЖЛИВІСТЮ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ НАПРУГИ, НЕЗАЛЕЖНО, ПО КОЖНОМУ ФІДЕРУ.....	14
3.НОВІ МОЖЛИВОСТІ ПРОВОДИТИ ВІДКЛЮЧЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МОДУЛЯТОРІВ НА IGBT.....	25
4.ВПЛИВ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ НА ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ.....	28
5.ЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ ДЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ.....	30
6.АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ І В УСТАНОВЛЕНОМУ РЕЖИМАХ.....	32
7.СИЛОВА ЧАСТИНА СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ.....	35
8.ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ.....	38
9 МОДЕЛЮВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ ORCAD 9.2.....	46
ВИСНОВКИ.....	52
СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДЖЕРЕЛ.....	53

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ		
<i>Змн.</i>	<i>Арк.</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Підпис</i>	<i>Дата</i>			
Розробник		Федянович С.Ю			<i>Літ.</i>	<i>Арк.</i>	<i>Акрушів</i>
					5	55	
Керівник		Ляшук В.М			ДНУЗТ, ІСЕ, гр. ЕС		
Н. контр.		Міщенко Т.М					
Інтелектуальні системи регулювання напруги на шинах тягової підстанції постійного струму							

## ВСТУП

**Актуальність роботи.** Незалежне регулювання і стабілізація напруги по фідерам міжпідстанційної зоні дозволить зменшити втрати від зрівняльних струмів. До мінімуму зменшити провали напруги при проходженні швидкісних поїздів. Таким чином, при оптимальному алгоритмі управління рівнем напруги, можливо організувати процес перевезення вантажів і пасажирів з мінімальними втратами електроенергії.

Стрімкий розвиток перетворювальної техніки на базі біполярних транзисторів з ізольованим затвором (*IGBT*) в тягових системах рухомого складу почався на початку 1990-х років з застосування її для нижнього діапазону потужності. Розширення області використання тягових перетворювачів на базі транзисторів *IGBT* залежало від можливостей підвищення замикаючої здібності і величини струму що між ними пропускається. Ряд ключових технічних рішень, внесених за минуле десятиліття в конструкцію і технологію виробництва транзисторів, сприяв їх безперервного вдосконалення. Серйозну проблему для розробників представляла механічна компоновка напівпровідникових приладів (транзисторів *IGBT*, діодів) у загальному корпусі з урахуванням високих вимог до тяговим системам, обумовлених циклічним зміною навантаження. Для вирішення цього завдання знадобилися ретельні дослідження і випробування. Тягові перетворювачі на базі транзисторів *IGBT* вигідно відрізняються двома особливостями, важливими як для залізниць, так і для виробників[1].

Така система забезпечує не тільки підвищення якості електроенергії, що споживається, та стабілізацію напруги на шинах тягових підстанцій, але й вирішує задачі стабілізації напруги на струмоприймачах електрорухомого складу; фільтрацію низькочастотних неканонічних і канонічних вихідних гармонік з метою зменшення встановленої потужності або повної відмови від використання громіздких дроселів, фільтрів та резонансних контурів; швидкодіючий захист при коротких замиканнях у тяговій мережі при реалізації без дугового відключення комутаційних апаратів. Таким чином робота, що

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		6

направлена на подальше підвищення ефективності перетворювальних агрегатів вольтододаткового типу без додаткових тягових трансформаторів для підстанцій постійного струму залізниць України, є актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами.** Обране дослідження безпосередньо пов'язане з виконанням науково-дослідних робіт у Дніпропетровському національному університеті залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, зокрема за наступними темами: «Розробка енергоефективної технології сумісної роботи системи централізованого тягового електропостачання та системи розподілених альтернативних джерел електроенергії», № держреєстрації 0117U004481.

**Мета і завдання роботи.** Забезпечення стабільного рівня напруги у тяговій мережі при впровадженні швидкісного руху.

**Об'єкт дослідження.** Система тягового електропостачання постійного струму.

**Предмет дослідження.** Незалежне регулювання і стабілізація напруги по фідерам міжпідстанційної зони

**Методи дослідження.** Методи статистичного аналізу, аналітичне дослідження режимів напруги. Обробка результатів експериментальних досліджень виконана на ЕОМ з використанням програмних засобів Excel, MathCAD. Для моделювання роботи системи стабілізації з програмних пакетів обрана OrCAD 9.2. Серєда OrCAD 9.2 .

**Наукова новизна одержаних результатів.** Вперше пропонується структурна схема тягового агрегату для підстанцій з вольтододатковими перетворювачами на кожен фідер, які використовують широтно-імпульсну модуляцією з частотою 5 кГц на IGBT , і можливістю регулювання рівня напруги, незалежно, по кожному фідеру.

**Практичне значення одержаних результатів.** Результати досліджень можуть бути використані при впровадженні швидкісного руху на території України, для забезпечення необхідного рівня напруги та пропускної здатності.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
						7
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		

Результати можна використати при впровадженні пристроїв поліпшення якості електроенергії на електроенергетичних об'єктах електрифікованих залізниць.

Розроблені методики та результати експериментальних досліджень можуть бути використані у навчальному процесі при підготовці бакалаврів та магістрів з електроенергетичних спеціальностей.

**Особистий внесок здобувача.** Постановку мети та завдань дослідження виконано спільно з науковим керівником. Основні наукові положення, теоретичні та експериментальні дослідження отримані здобувачем самостійно.

**Апробація результатів магістерської роботи.** Основні положення роботи і результати досліджень доповідалися здобувачем і обговорювалися на конференції в ДВНЗ“ Приазовський державний технічний університет”.

**Публікації за тематикою роботи.** За результатами роботи подано до друку 2 статті. Федянович С. Ю., Бобирь О. Д. Удосконалення режиму напруги в тяговій мережі при підвищенні швидкості руху[текст]/ Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузі «Енергетика» II тур: матеріали наук.-практ. конф.,(Маріуполь, 25-26 березня, 2020р.) 10 стр./ М-во осв. і науки України вул. Університетська 7, Маріуполь, 2020-20 с.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
						8
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 РЕЖИМ НАПРУГИ В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПРИ ПІДВИЩЕННІ ШВИДКОСТІ РУХУ

Історично склалося так, що до останніх часів в тягових агрегатах підстанцій постійного струму електрифікованих залізниць використовувалися трифазні нульові і мостові схеми діодних випрямлячів, які мають шестипульсову та дванадцятипульсову випрямлену напругу. Більш прості 6-ти пульсні діодні випрямлячі мають певні недоліки, а саме: відносно низький коефіцієнт потужності, скривлена форма кривої струму і, як наслідок, низька якість електричної енергії, значний вплив тягових струмів на повітряні лінії зв'язку, великий коефіцієнт нахилу зовнішньої характеристики, відносно низький коефіцієнт корисної дії. Техніко-економічна ефективність тягових перетворювачів підстанцій постійного струму дещо покращується при переході на дванадцяти пульсові схеми випрямлячів (трифазні двомостові схеми). Використання таких схем випрямлячів дозволяє:

- підвищити коефіцієнт потужності тягової підстанції до 0,96...0,97;
- покращити коефіцієнт форми кривої первинного струму і тим самим підвищити якість електричної енергії;
- покращити форму кривої випрямленої напруги і знизити негативний вплив тягової мережі на лінії зв'язку;
- дещо підвищити рівень напруги в тяговій мережі без використання додаткових пристроїв регулювання напруги;
- знизити витрати електротехнічних матеріалів при виробництві тягових агрегатів.

Однак, дванадцятипульсові діодні випрямлячі не можуть вирішувати задачі стосовно регулювання рівня напруги на тягових шинах підстанції з метою стабілізації її на струмоприймачах електрорухомого складу, швидкодіючого безконтактного захисту при коротких замиканнях у тяговій мережі, доведення якості електроенергії в живлячій і тяговій мережах до рівня

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		9

Євростандартів, зменшення встановленої потужності вихідних фільтрів і т.п.

У середньому втрати в наших мережах електроенергетичної системи становлять близько 12 % від електроенергії, що відпускається у мережу. Тому можемо говорити, що це великі втрати і потрібно шукати вирішення цієї проблеми. Але однією з головних втрат, знаємо, це втрати при живленні рухомого складу.

Для зменшення втрат електроенергії за останні роки застосовуються різні методи і схемні рішення живлення рухомого складу і секціонування тягової мережі. Одним з альтернативних рішень, що дозволяє подолати вищевказані недоліки, є повна заміна напівпровідникової елементної бази в перетворювачах тягових підстанцій, а саме відмова від традиційних діодів і дешевих одноопераційних тиристорів на користь двоопераційних напівпровідникових приладів. Вони дозволяють здійснити широкодіапазонне регулювання вже іншим – широтно-імпульсним методом, що не супроводжується споживанням реактивної потужності, а також дозволяє легко згладжувати високочастотні пульсації малопотужними фільтрами та здійснювати ефективний контроль за якістю перехідних процесів. Однак, таке альтернативне рішення має велику вартість.

Можливо використовувати перетворювальний агрегат за схемою, наведеною на рис. 1.1, це дванадцятипульсова схема, зібрана на некерованих напівпровідникових приладах [2].

Але найбільш ефективним є - це застосування дванадцятипульсових керованих випрямлячів, зібраних на тиристорах, і вольтододаткові пристрої (ВДП), що вимагають, окремий тяговий трансформатор [3,4, 5, 6].

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
						10
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		

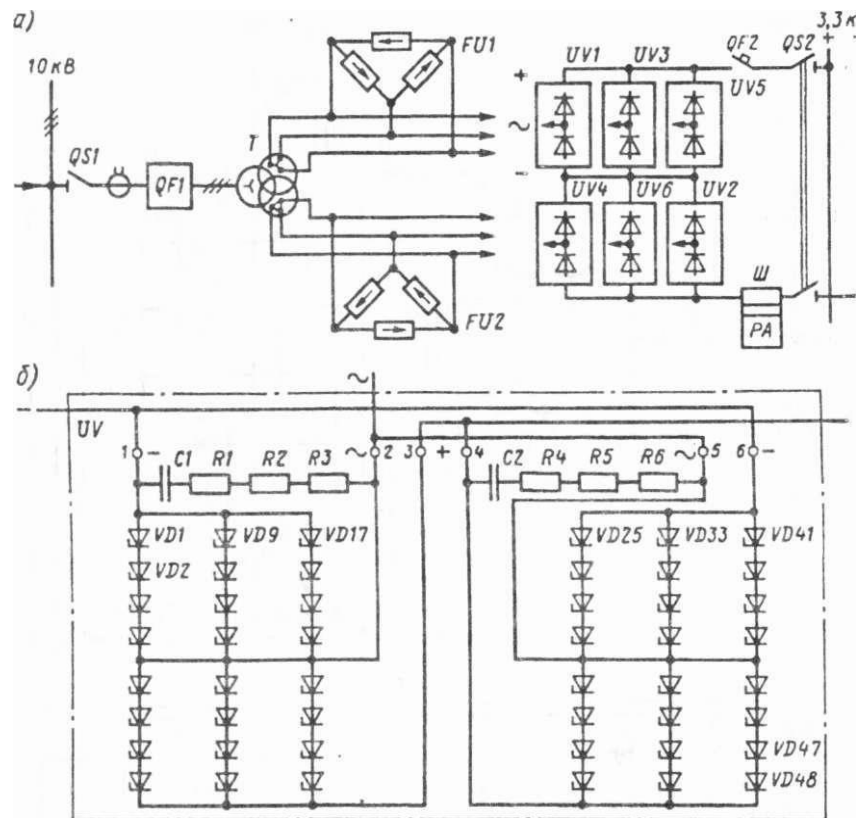


Рисунок 1.1 -Схема дванадцятипульсового випрямляча послідовного типу ТПЕД 3150 (а) і шафи з діодами (б)

До теперішнього часу на залізницях країн успішно застосовуються тягові трансформатори з пристроями безконтактного автоматичного регулювання напруги (БАРН) з 6-фазним і 12-фазним режимом випрямлення. Розроблено та проходить дослідну експлуатацію тяговий агрегат з 24-фазним випрямлення. На сьогоднішній день пропонується також застосування вдосконалених перетворювальних агрегатів з розширеними функціями. Структура такого перетворювального агрегату для тягових підстанцій, показана на рис. 1.2. Вона містить основний випрямляч (ОВ) за традиційною 12-пульсною схемою і оборотний вольт додатковий перетворювач ЗВ з широтно-імпульсною модуляцією на замикаючих приладах з діапазоном регулювання напруги порядку  $\pm 20\%$ , що компенсує недоліки основного випрямляча з точки зору його електромагнітної сумісності з контактною мережею (КС) і мережею живлення (ПС) [7].

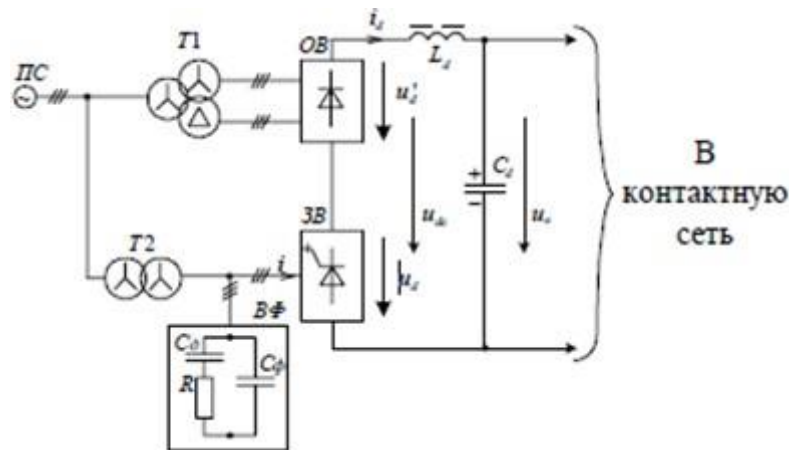


Рисунок 1.2- Структура перетворювального агрегату для тягових підстанцій з вольтододатковим перетворювачем ЗВ з широтно-імпульсною модуляцією на замикаючих приладах.

В даний час закордонними фірмами освоєні нові напівпровідникові прилади: силові тиристри що замикаються типу *GTO*, *GCT*, *IGCT* і силові біполярні транзистори з ізольованим затвором типу *IGBT*. Для створення 12-, 24-пульсових випрямно-інверторних перетворювачів тягових підстанцій найбільш ефективними напівпровідниковими приладами є потужні біполярні транзистори з ізольованим затвором типу *IGBT* на струм 1800 А і напруги 1700 В або на струм 2000 А і напруги 3300 В і потужні тиристри що замикаються з інтегрованим управлінням типу *IGCT* на струми 3 ... 4 кА і напругою 4500 ... 6000 В[4].

Використовуючи силові *IGBT* транзистори на зазначені струми і напругу, можна зробити інвертори для тягових підстанцій по 12- і 24-пульсовим схемами інвертування потужністю 2,4 і 6 МВт на номінальні струми відповідно 600 А, 1200 А і 1800 А, а використовуючи *IGCT* тиристри, можна створити тиристорні перетворювачі потужністю 5 МВт і 10 МВт на струми 1600 А і 3150 А[8].

У той же час реальних досліджень впливу пристроїв перетворювальної техніки з функціями регулювання напруги тягових підстанцій постійного струму на суміжні пристрою проводиться, висновки про їхню ефективність базуються на даних електронного моделювання, який не враховує реальних умов

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		12

функціонування. Незважаючи на те, що наведені результати досліджень виконані понад тридцять років тому, ми вважаємо, що вони не втратили свою актуальність і зараз повинні враховуватися розробниками сучасних пристроїв перетворювальної техніки.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		13

## 2 МЕТОДИ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ В ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ З МОЖЛИВІСТЮ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ НАПРУГИ, НЕЗАЛЕЖНО, ПО КОЖНОМУ ФІДЕРУ

Досягнуті в останні роки успіхи в області проектування, спорудження та монтажу, впровадження сучасних технічних засобів на електрифікованих залізницях, таких як керовані перетворювачі, мікропроцесорні системи управління, реєстратори параметрів руху поїзда з радіоканалами і супутниковими навігаційними системами, створюють можливість реалізувати новий принцип живлення тягових мереж, що дозволяє в максимальному ступені живлення реальні характеристики і параметри системи електричної тяги поїздів. При організації швидкісного руху на лініях постійного струму 3,3кВ одним з найважливіших вимог до тягового електропостачання є підтримання рівня напруги на струмоприймачі поїзда не нижче 2900В. Для забезпечення необхідного рівня напруги на існуючих лініях, як правило, виникає необхідність в посиленні електротягової мережі.

Традиційним способом вирішення цієї проблеми є будівництво додаткових тягових підстанцій. Новий напрямок ґрунтується на застосуванні розподіленої системи харчування з поздовжньою лінією підвищеної напруги, прокладеної по опорах контактної мережі.

Разом з тим, є можливість поліпшення ефективності існуючих централізованих систем електропостачання за рахунок регулювання напруги на шинах тягових підстанцій особливо з появою сучасних перетворювачів на основі *IGCT*-тиристорів і *IGBT*-транзисторів, що відрізняються високою швидкістю і економічністю.

Розглянемо деякі методи стабілізації напруги в мережі.

Система автоматичної стабілізації напруги тягової підстанції (АСНТп) [9]

Забезпечення високої точності регулювання напруги перетворювальних тягових агрегатів пов'язане, зі зниженням втрат електричної енергії від «зрівняльних

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		14

струмів» в контактній мережі між суміжними тяговими підстанціями. Вирішення цього завдання розглянемо на прикладах безперервних систем автоматичного регулювання з використанням елементів електромагнітної логіки і дискретних систем на базі інтегральних мікросхем.

Розімкнута САР з введенням в систему струму навантаження і напруги живильної мережі, реалізована на базі регулятора ШАУН1, тягового трансформатора ТДРУ-20000/35 і реактора РТДП6300 / 35 дозволила отримати в процесі експлуатаційних випробувань похибка (зниження точності) регулювання до  $\pm 1,5\%$ .

Безперервна замкнута по вихідній напрузі на базі шаф ШАУН2, ШАУН3, тягових трансформаторів з нульовою (ТДПУ-20000/10) і трифазної мостової (ТДП-16000/10) шести пульсової схемою випрямлення, реактором РТДП-6300/10 забезпечила зниження похибки регулювання до  $\pm 1\%$ .

Можливі два варіанти регулюючого органу при побудові системи АСНТп. За першим варіантом регулювання напруги тягового трансформатора здійснюється двома керованими реакторами, включеними в відводи регульовальної частини первинної обмотки трансформатора.

Автоматичний регулятор - шафа автоматичного управління напругою ШАУН3 виконує зміни струмів управління реакторів з урахуванням оптимального за коефіцієнтом потужності алгоритму управління. При зміні підмагнічування магнітопроводів здійснюється плавна безконтактна зміна випрямленої напруги в межах регульовальної зони між природними зовнішніми характеристиками 1 і 2, відповідним граничним режимам намагнічування реакторів.

За другим варіантом регулювання напруги здійснюється несиметричним реактором. При цьому спрощується функціональна схема регулятора шляхом виключення підсилювача потужності. Спрощення схеми управління досягається в цьому варіанті забезпеченням постійного опору реактора.

З метою зниження втрат електричної енергії на власні потреби,

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		15

підвищення швидкодії шафи управління ШАУН і підвищення точності регулювання напруги одним або декількома паралельно працюючими напівпровідниковими перетворювачами був розроблений і досліджений в умовах експлуатації шафа управління ШАУН4 на базі безперервної логічної схеми шафи ШАУН3 з вихідним тиристорним мостом. Блок імпульсного управління забезпечує можливість роботи в ручному і автоматичному режимах з формуванням пачки позитивних імпульсів частотою 4 кГц і тривалістю імпульсу 20-30 мкс. Кут імпульсного регулювання лежить в межах від 0 до 180 електричних градусів.

Стабілізація напруги на вихідних шинах тягових підстанцій за допомогою системи АСНТп компенсує втрати напруги на внутрішньому опорі підстанції, на опорі мережі живлення і підвищує напругу в контактній мережі фідерних зон. Підвищення на тягових підстанціях рівня стабілізації напруги, що застосовується для компенсації втрат напруги в контактній мережі від тягової підстанції до електровоза, що працює в режимі тяги, знижує ефективність застосування на електровозах рекуперативного гальмування.

Від якості напруги в контактній мережі, як відомо, залежить забезпечення надійної та економічної експлуатаційної роботи електрорухомого складу і в цілому системи електропостачання. Напруга на струмоприймачі електровозів за умови забезпечення проєктованих розмірів руху при заданих швидкостях і масах поїздів на практиці значно відрізняється від оптимального (номінального) значення за рахунок втрат напруги в контактній мережі від шин тягової підстанції до струмоприймача електровозів.

Тому для підвищення напруги в контактній мережі в тяговому режимі роботи електровозів і для забезпечення ефективності електричного гальмування в режимі рекуперації необхідна зміна напруги безпосередньо в контактній мережі, за допомогою пристроїв регулювання напруги тягових підстанцій. Для цього розроблено «Зонне» регулювання напруги в контактній мережі.

«Зонне» регулювання забезпечує на одній або на декількох фідерних

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		16

зонах безперервне і одночасне для всіх фідерних зон регулювання напруги.

Розроблена на основі «зонного» регулювання система автоматичного регулювання напруги в контактній мережі «Сирена» включає систему АСНТп, апаратуру передачі і прийому інформації про напругу на фідерних зонах і блок цифрового регулятора. Основним завданням системи «Сирена» є поліпшення якості напруги в контактній мережі в тяговому режимі роботи електровозів із забезпеченням ефективного електричного гальмування в режимі рекуперації.

Враховуючи, що на зоні живлення може знаходитися не один електровоз і підтримання постійної напруги на струмоприймачах всіх електровозів практично і теоретично неможливо, система «Сирена» забезпечує регулювання напруги в контактній мережі в зоні максимального зниження напруги, наприклад біля поста секціонування, за рахунок зміни рівня напруги на шинах тягових підстанцій.

Аналізуючи різні методи стабілізації напруги в тяговій мережі, їх недоліки і переваги, для зменшення втрат електроенергії та спрощення пристроїв стабілізації напруги в тяговій мережі постійного струму пропонується система електропостачання, коли на підстанції встановлюються чотири агрегати (Т1-Т4), обмеженої потужності, які використовуються як вольтододаткові, замість стандартної компоновки проміжної тягової підстанції з двох агрегатів (ТА)[19]. Структурна схема застосування модернізованої підстанцій наведена на рис. 2.1.

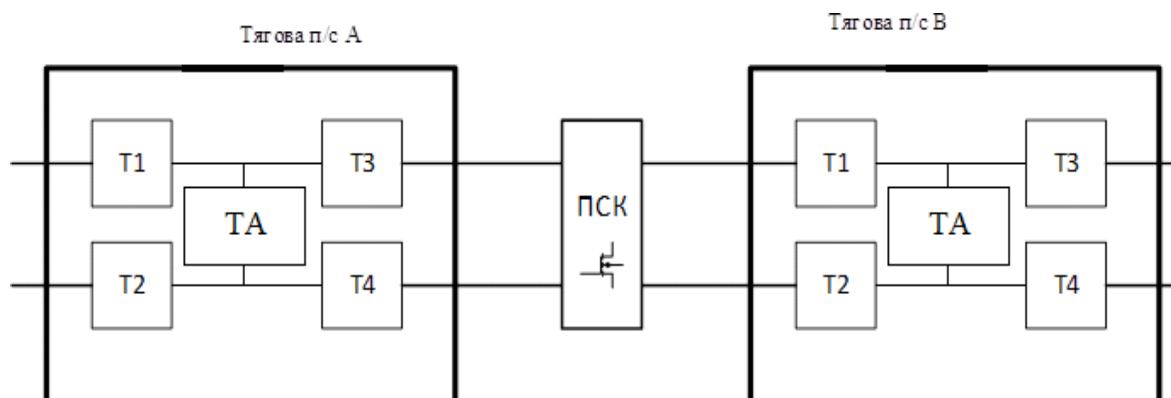


Рисунок 2.1 -Структурна схема застосування чотирьох агрегатних підстанцій

Пропонована схема тягової підстанції постійного струму дає можливість

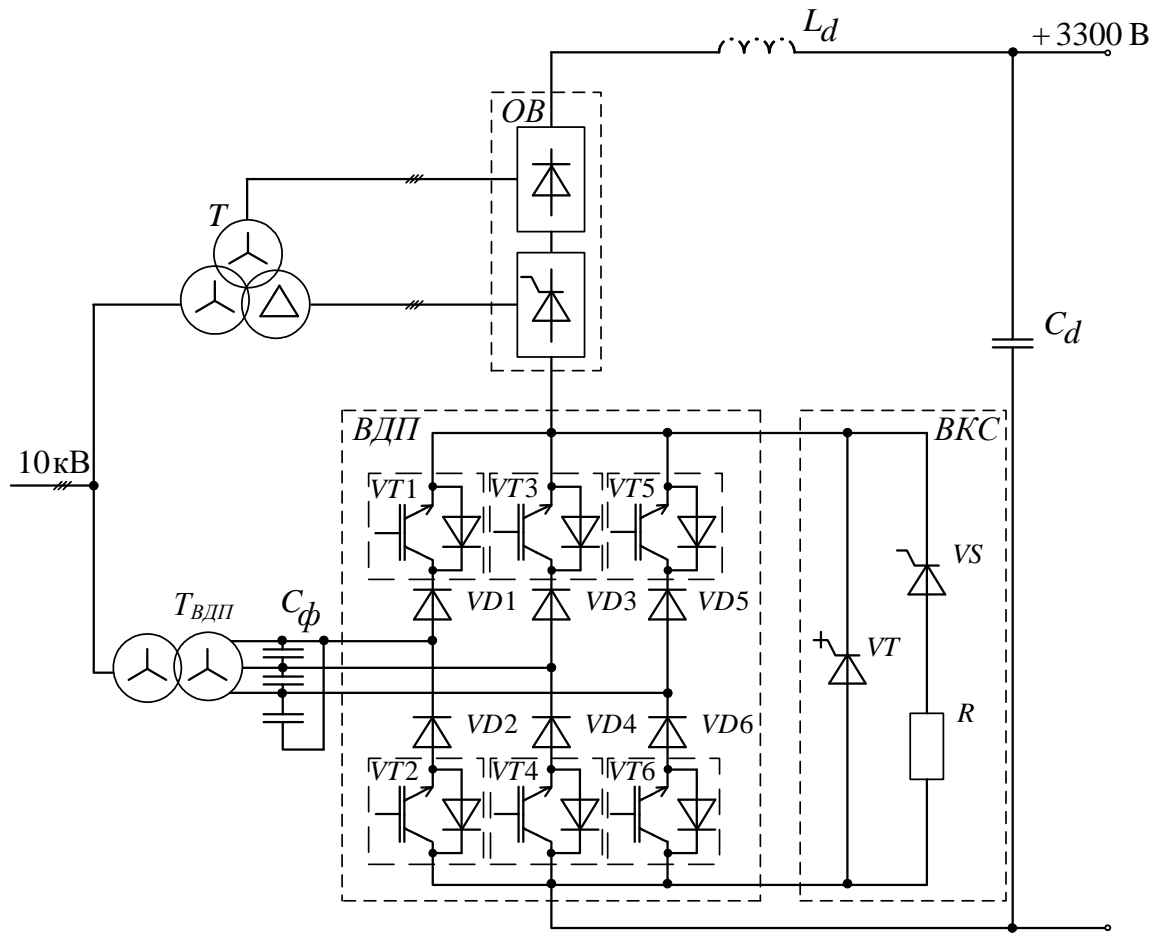
					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		17

усунути деякі недоліки існуючих схем тягових підстанцій і створення можливості модернізувати існуючі тягові підстанції без заміни найбільш дорогих пристроїв, таких як тягові трансформатори і випрямлячі. В якості основного перетворювача ТА на рисунку 3 можливо використовувати дванадцяти пульсовий випрямляч послідовного типу ТПЕД-3150 (а) і шафи з діодами (б) рис. 1.1.

Пропонована спрощена схема [10] доцільна для практики побудови енергоефективних регульованих перетворювальних агрегатів тягового електропостачання постійного струму напруги 3,3 кВ є схема бездросельного регульованого перетворювального агрегату в якій поєднано широтно-регульований реверсивний вольт додатковий перетворювач з вузлом короткочасного струмообмеження та напів керований 12-пульсний випрямляч. Спрощена силова схема реверсивного ВДП на ДДКЗН з ВКС, що приєднані до основного дванадцятипульсового випрямляча наведена на рис 2.2.

Тому в подальшому і будемо розглядати схему реверсивного вольт додаткового перетворювача на двоквADRантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги з вузлом короткочасного струмообмеження з боку реалізації вимог до системи тягового електропостачання постійного струму напруги 3,3 кВ, визначивши спочатку основні характеристики такого реверсивного ВДП[9].

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
						18
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		



*OB* – основний фазо керований випрямляч; *T* – трансформатор *OB*;  
*LdCd* – вихідний фільтр; *TВДП* – трансформатор вольтододаткового перетворювача;  
*ВДП* – вольтододатковий перетворювач; *Cφ* – вхідний фільтр ВДП;  
*VT1-VT6* – транзистори ВДП; *VD1-VD6* – діоди; *BКС* – вузол короткочасного  
 струмообмеження, *VT* – шунтуючий керований ключ;  
*VS* – тиристор вузла *BКС*; *R* – струмообмежуючий резистор

Рисунок 2.2 -Спрощена силова схема реверсивного широтно-регульованого  
 вольтододаткового перетворювача на двоквADRантних двоопераційних ключах  
 знакозмінної напруги з вузлом короткочасного струмообмеження, що приєднані  
 до основного дванадцятипульсового випрямляча

Схема реверсивного ВДП на ДДКЗН (рис.2.2) включає до себе вхідний  
 фільтр  $L_s C_\phi$ , трифазний мостовий комутатор на ДДКЗН (двоопераційні ключі із  
 зворотною блокуючою властивістю) та вихідний  $L_d C_d$  –фільтр спільний з

вихідним фільтром основного випрямляча. В якості індуктивності вхідного фільтра  $L_s$  використовується індуктивність розсіювання перетворювального трансформатора  $T$ .

За своєю суттю, реверсивний ВДП, що працює в режимі однополярної синусоїдальної ШІМ, може генерувати у мережу живлення і реактивну енергію зустрічного (по відношенню до основного дванадцятипульсового випрямляча) знаку, практично не впливаючи при цьому на реактивну потужність спотворення. Це забезпечується за рахунок завдання реактивної складової струму ВДП на додаток до завдання активної складової його струму в залежності від потрібної напруги  $i$ , отже, викликає збільшення установленої потужності ВДП.

Таким чином, вигідно генерувати ВДП в мережу відносно невеликий реактивний струм, що потребує незначного збільшення потужності ВДП. Для розглянутого вище прикладу  $\chi = 0,125$ , при збільшенні встановленої потужності всього на 20% одержуємо  $i^* \cong 0,09$ . При цьому реактивна потужність спотворення перетворювача практично не змінюється  $i$ , отже, залишається на рівні 0,15. Реактивна ж потужність тепер складе  $0,22 - 0,09 = 0,13$  і, отже, коефіцієнт потужності живлячої мережі підвищиться до величини  $\lambda = 0,98 \div 0,985$ , що вже відповідає рекомендаціям Євростандарту на якість електроенергії, що споживається.

Фактично, враховуючи наявність вхідного LC-фільтра ВДП з встановленою потужністю конденсаторів фільтра  $\epsilon^* = 0,885$  при  $f_{ШІМ} = 600$  Гц, залишкова реактивна потужність перетворювача (а це десь 13%) практично повністю компенсується цими конденсаторами у номінальному режимі роботи перетворювача. При цьому залишається тільки реактивна потужність спотворення, що і дає для цього режиму коефіцієнт потужності живлячої мережі близький до 1 ( $\lambda \geq 0,99$ ). Однак, наявність фільтрових конденсаторів такої значної встановленої потужності, приводить до надлишкової реактивної потужності зустрічного знаку, що генерується перетворювачем у живлячу

						02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
							20
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата			

мережу в режимах близьких до холостого ходу. Тому доцільно використовувати для ВДП більш високі частоти ШІМ ( $f_{\text{ШІМ}} \geq 1200$  Гц), що у відповідності дає можливість знизити встановлену потужність конденсаторів фільтра і, отже, знизити їх негативний вплив на живлячу мережу в режимах близьких до холостого ходу, залишаючи коефіцієнт потужності живлячої мережі при номінальному навантаженні більше за 0,98.

Реверсивний ВДП на двоквADRантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги значно спрощує також фільтрацію вищих гармонік напруги на виході перетворювача і тим самим дає можливість зменшити встановлену потужність вихідного LC-фільтра. Ця особливість полягає у тому, що вищі гармоніки на виході основного дванадцятипульсового випрямляча швидко убивають у мірі того, як зменшується кут управління  $\alpha$ .

Вольтододатковий перетворювач на двоквADRантних двоопераційних ключах знакозмінної напруги рис. 2.2 потребує керування. Для цього був запропонований алгоритм керування ключами ВДП згідно роботи [11,19].

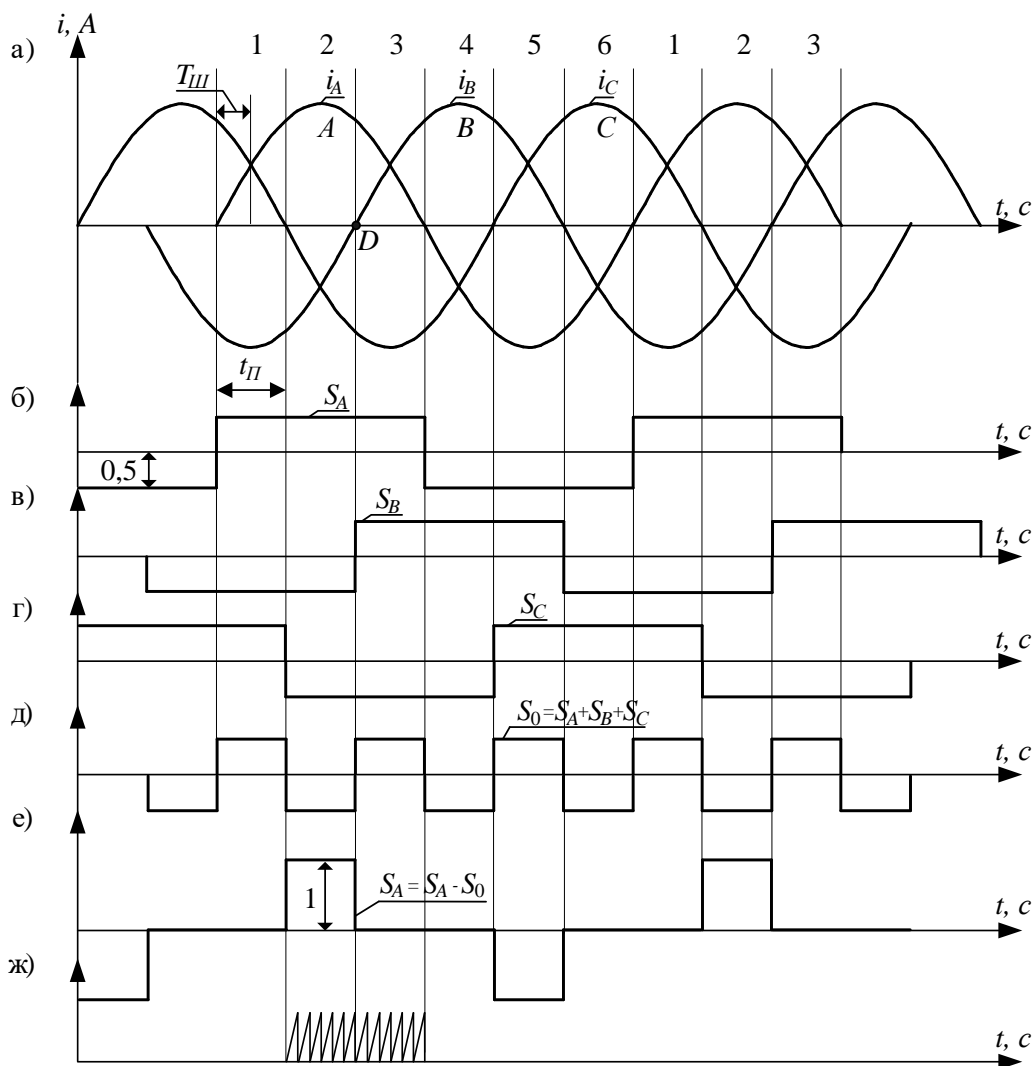
Ключі ВДП керуються відповідно до алгоритмів ШІМ. Для спрощення завдання законів зміни інтервалів ШІМ період струму мережі живлення розбивається на 6 інтервалів по 60 ел. град., межі яких відповідають переходу фазних струмів через нульові значення. Особливістю управління є необхідність підтримання точної відповідності між частотою ШІМ та частотою трифазної мережі живлення.

Таким чином, у робочому стані перетворювача в комутаторі ВДП можливі два стана ключів: робочий, коли ввімкнені і проводять струм  $i_d$  два тиристри різних фаз, і стан з короткозамкненим виходом (КЗ-стан), в якому проводять струм два тиристри однієї і тієї ж фази. В КЗ-стані всі три фазних струми на вході комутатора дорівнюють нулю. Чергування робочих і КЗ-станів дозволяє реалізувати на кожному півперіоді вихідного струму однополярну ШІМ(рис.2.3).

Позитивною особливістю однополярної ШІМ є те, що фактична частота

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		21

перемикань тиристорів є меншою за частоту ШІМ. Крім цього, лише половина перемикань проходить примусово, тобто потребує запирання тиристорів під напругою  $i$ , отже, супроводжується комутаційними втратами, а інша половина протікає при природному спаді струму під дією напруги живлення, що означає фактично нульові комутаційні втрати.



а) – трифазна система струмів завдання; б – з) – функції знаку системи струмів;  
 д) – комутаційна функція для перемикання груп ключів; е) – функція вибірки найбільшого значення фазного струму; ж) – опорний сигнал при частоті ШІМ 1800 Гц.

Рисунок 2.3-До пояснення структурної системи алгоритму управління реверсивним ВДП в режимі однополярної ШІМ

Пропонується структурна схема тягового агрегату для підстанцій з вольт додатковими перетворювачами, які використовують широтно-імпульсну

модуляцією на *IGBT* рис. 2.4

Використовується дванадцятипульсовий випрямляч послідовного типу-ТПЕД-3150 (ВУ), тяговий трансформатор  $T_m$ , перетворювач постійного струму в змінний частотою 5кГц, високочастотний трансформатор  $T_1$ , випрямляч з широтно-імпульсною модуляцією на *IGBT*, фільтр  $C_\phi$ . До постійної напруги 3.3кВ додається напруга з перетворювача який змінює її рівень в залежності від необхідного рівня в тяговій мережі. Система керування (СК) отримує інформацію о рівні напруги в окремих місцях тягової мережі.

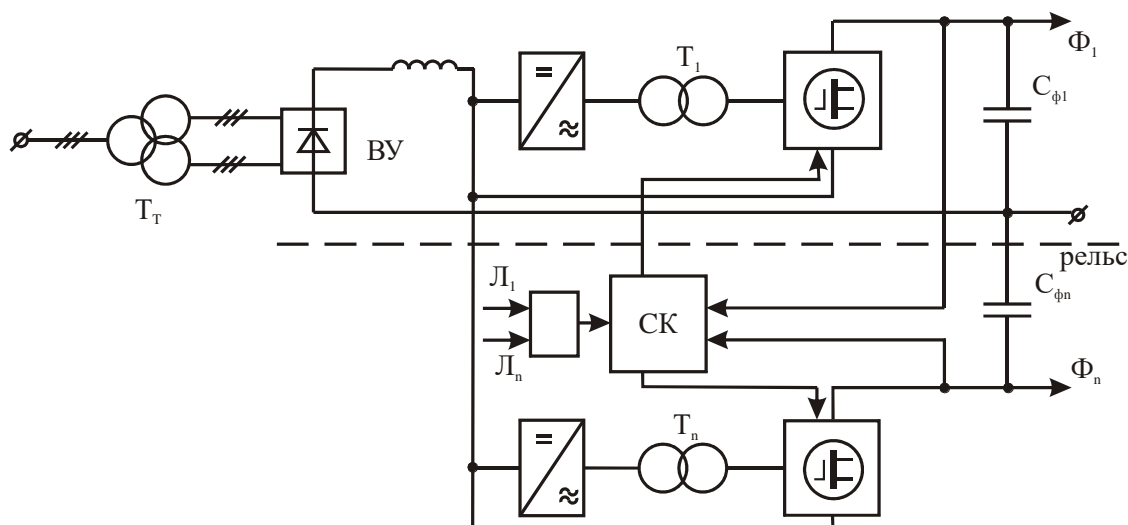


Рисунок 2.4 -Структурна схема тягового агрегату для підстанцій з вольтододатковими перетворювачами, які використовують широтно-імпульсну модуляцією на *IGBT*

При використанні повністю керованих вольтододаткових агрегатів, з'являється можливість відмовитися від швидкодіючих вимикачів (ШВ) і встановлювати тільки роз'єднувачі і відокремлювачі. У разі перевантаження по струму або короткому замиканні в тяговій мережі, відключаються керуючі імпульси транзисторного випрямляча, потім відключаються роз'єднувачі. Перенапруга, що виникає при комутації, усувається поглинаючими пристроями. Як вольтододаткові агрегати, можна використовувати існуючі випрямлячі тягових агрегатів міського електротранспорту, з плавним регулюванням під навантаженням і збільшенням робочого струму [ 12].

Така система забезпечує не тільки підвищення якості електроенергії, що споживається, та стабілізацію напруги на шинах тягових підстанцій, але й вирішує задачі стабілізації напруги на струмоприймачах електрорухомого складу; фільтрацію низькочастотних неканонічних і канонічних вихідних гармонік з метою зменшення встановленої потужності або повної відмови від використання громіздких дроселів фільтрів та резонансних контурів; швидкодіючий захист при коротких замиканнях у тяговій мережі при реалізації без дугового відключення комутаційних апаратів. Таким чином робота, що направлена на подальше підвищення ефективності перетворювальних агрегатів вольтододааткового типу для тягових підстанцій постійного струму залізниць України, є актуальною.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
						24
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3 НОВІ МОЖЛИВОСТІ ПРОВОДИТИ ВІДКЛЮЧЕННЯ НАВАНТАЖЕННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МОДУЛЯТОРІВ НА IGBT

Використання перетворювачів, з широтно-імпульсною модуляцією на *IGBT*, дає можливість проводити відключення навантаження не тільки в разі короткого замикання а й виключити помилкові відключення при короткочасному перевищенні струму при розгоні рухомого складу.

Розширення області застосування тягових перетворювачів на базі транзисторів *IGBT* залежало від можливостей підвищення замикаючої здібності і величини пропускається ними струму. Ряд ключових технічних рішень, внесених за минуле десятиліття в конструкцію і технологію виробництва транзисторів, сприяв їх безперервного вдосконалення. Серйозну проблему для розробників представляла механічна компоновка напівпровідникових приладів (транзисторів *IGBT*, діодів) у загальному корпусі з урахуванням високих вимог до тяговим системам, обумовлених циклічним зміною навантаження. Для вирішення цього завдання знадобилися ретельні дослідження і випробування. Тягові перетворювачі на базі транзисторів *IGBT* вигідно відрізняються двома основними особливостями, важливими як для залізниць, так і для виробників. Перш за все, ці пристрої створюють потенційні можливості для зниження витрат, головним чином завдяки здешевленню збірки і підвищенню ефективності тягових систем. Друга особливість, яка сприяла швидкому впровадженню перетворювальної техніки на базі транзисторів *IGBT*, полягає в підвищеній надійності та експлуатаційної готовності тягових систем. Уже на початковому етапі впровадження перетворювачів, виконаних на тиристорах що замикаються тиристорах (*GTO*), було очевидно, що гранично досяжний рівень надійності обмежується складністю таких пристроїв. Особливо сильний вплив на надійність системи надавали схеми ланцюгів управління тиристорами *GTO*.

На відміну від тиристорів що замикаються, транзистори *IGBT* управляються напругою при досить малих керуючих токах заряду і розряду

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		25

вхідний ємності напівпровідникового приладу. Завдяки цьому значно спрощується схема управління затвором. Хоча надійність сучасних тягових перетворювачів, виконаних на замикаються тиристорах, досягає необхідного рівня, проте заміна елементної бази *GTO* на *IGBT* створює можливість для істотного поліпшення цього показника.

В даний час діапазон потужності тягових систем простирається від декількох сотень кіловат (для рухомого складу міського рейкового транспорту) до приблизно 10 МВт (для локомотивів). Крім потужності, до основних параметрів тягової системи відноситься робоча напруга перетворювача. У разі живлення від контактної мережі постійного струму напруга перетворювача і, отже, необхідна замикаюча здатність напівпровідникових ключів визначається безпосередньо напругою мережі. Приблизно 10 років тому для перетворювачів, які отримують живлення від контактних мереж постійного струму напругою 3,3 кВ, були розроблені тиристори *GTO* з замикаючої здатністю 6,5 кВ. Це було потрібно для забезпечення безпечної та надійної роботи перетворювача. З тих пір відпала необхідність у застосуванні вхідних переривників для узгодження по напрузі.

Особливу увагу необхідно приділяти перехідним процесам які виникають в тяговій мережі при пропуску швидкісних поїздів. Фізично перехідні процеси представляють собою процеси переходу від енергетичного стану, відповідного до комутаційного режиму, до енергетичного стану, відповідного після комутаційного режиму. Перехідні процеси є швидкодіючими, тривалість становить близько секунди. Проте, вивчення перехідних процесів в тяговій мережі важливо, тому що воно дає можливість встановити, як змінюються за формою і амплітудою досліджувані величини, а також визначити тривалість перехідного процесу при різних режимах роботи тягової мережі.

У процесі нормальної роботи тягової мережі в ній здійснюються запуски поїзда, переходи через секційні ізолятори струмоприймачів поїздів, що рухаються під струмом, підйоми струмоприймачів на зупинках внаслідок чого

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		26

відбувається заряд ємності в загороджувальному фільтрі, АПВ відключеного фідера, повторні пуски після АПВ . Всі перераховані режими називають стаціонарними. Також в тяговій мережі виникають аварійні ситуації - режим короткого замикання. При цьому протягом певного часу в тяговій мережі протікає перехідний процес.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
						27
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		

## 4 ВПЛИВ ЕЛЕКТРОРУХОМОГО СКЛАДУ НА ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС В ТЯГОВІЙ МЕРЕЖІ ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ

При різкому падінні напруги в контактній мережі тягові двигуни е.р.с. переходять у генераторний режим внаслідок інерційності контурів магнітної системи двигунів, обумовленої дією вихрових струмів. Так як якір двигуна обертається в магнітному полі повільно спадного потоку, що наводиться в його обмотці за законом електромагнітної індукції ЕРС, яка дорівнює  $e_2 = C_n \cdot \Phi$ , також зменшується повільно і коли напруга мережі  $U_c$  в результаті виниклого к.з. стає менше  $e_2$ , в ланцюга з'являється генераторний струм  $I_2$ . В цьому випадку електрична машина з рухомого режиму переходить у генераторний.

При односторонньому живленні прискорений перехід в режим генерації можливий в разі розташування е.р.с. в безпосередній близькості від місця короткого замикання, коли залишкова напруга мережі істотно менше протидії е.р.с. двигуна.

При двосторонньому живленні перехідний процес протікає більш складно, тому що силові ланцюги е.р.с. шунтуються нелінійним опором дуги в місці пошкодження. Це призводить до того, що в будь-якій точці фідерної зони двигуни рухомого складу через 2-15 мс після початку к.з. переходять в генераторний режим. Подальший розвиток процесу залежить від співвідношення залишкової напруги в мережі і протидії-е.р.с. двигунів. Тривалість сплеску генераторного струму порівняно з часом відключення ШВ на підстанції і становить 0,02-0,03 с. Якщо струм к.з. недостатній для відключення ШВ, перехідний процес завершується, а струм рухомого режиму однотонно зростає до певної величини, що відповідає новому сталому значенню напруги мережі. Якщо захист спрацьовує, то напруга в мережі падає до нуля і е.р.с. повторно переходить в режим тривалої генерації.

Аналіз осцилограм і розрахунки показують[13], що в залежності від місця розташування, ходової позиції і швидкості е.р.с. час загасання основної

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		28

складової генераторного струму становить 2-3 с. Таким чином, генеруючий локомотив пересувним джерелом, підживлюючи місце пошкодження. Це збільшує обсяг термічних пошкоджень контактної мережі і збільшує ймовірність перегорання контактного проводу при аварійних режимах, особливо в тому випадку, коли на фідерній зоні знаходиться кілька поїздів. Таким чином, енергії генеруючий локомотивів у багатьох випадках цілком достатньо, щоб привести до відпалу або руйнування контактної підвіски. Крім цього, внаслідок виникаючий при цьому перенапруги, пошкоджуються іскрові проміжки, діодні заземлювачі і ізоляція електроустаткування е.р.с., що працює в тяговому режимі поблизу місця к.з., особливо при ослабленому полі збудження тягових двигунів.

Впровадження перетворювачів, з широтно-імпульсній модуляцією на *IGBT* дає можливість проводити відключення навантаження за значно менший час, приблизно на порядок, що виключає термічне пошкодження контактної мережі і ймовірне перегорання контактного проводу.

Час відключення залежить від індуктивності навантаження, тимчасові діаграми показані на рис. 4.1.



Рисунок 4.1 -Тимчасові діаграми відключення навантаження

## 5 ЗНАЧЕННЯ СТРУМІВ ДЛЯ РІЗНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ ТЯГОВОЇ МЕРЕЖІ

Струми фідерів контактної мережі (КМ) в нормальних і аварійних режимах істотно змінюються. Ці режими тягової мережі для цілей захисту прийнято в основному характеризувати максимальними струмами фідера  $I_{\phi}$ , різкою зміною струмів  $\Delta I$ , крутизною фронту наростання струму  $dI / dt$  постійної часу  $T$ , а також рівнем напруги  $U$  в різних точках мережі.

При пуску електропоїздів і восьми вісних електровозів струм досягає 2100- 2250 А. Зміна схеми з'єднання двигунів супроводжується різкою зміною (приростами) струму до 900-1080 А. Швидкість зміни струму в початковий момент в цьому режимі складає для електровозів приблизно 30 кА / с, а для електропоїздів 80-320 кА / с. В експлуатації, особливо при великих швидкостях руху, відбуваються короточасні відриви струмоприймачів локомотивів від контактних проводів, що дорівнює короточасному зникненню напруги і повторному його появи. Таке ж явище спостерігається при відключенні фідера захистом (наприклад, від перенавантаження) і його повторному включенні пристроями АПВ. У разі повторної появи напруги виникає різке підвищення струмів перехідного режиму, значення яких залежить від тривалості перерви живлення. При відривах струмоприймачів різке підвищення струму досягає 500А і має крутизну фронту 60-80 кА / с. Якщо перерва живлення триває більше 0,5 с, то наприклад, різке підвищення струму восьми вісного електровоза досягає 3000 А при крутизні фронту 100-180 кА / с.

При проїзді повітряних проміжків струмоприймач локомотива перемикає обидві його гілки. У цей момент струм поїзда, раніше протікаючий по одному фідеру, який живить набігаючу гілку ізолюючого сполучення, розподіляється між двома фідерами. Після проходження повітряного проміжку весь струм поїзда буде протікати через другий фідер, що живить набігаючу гілку ізолюючого сполучення.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		30

Таким чином, для другого фідера процес проходження повітряного проміжку струмоприймачем супроводжується двома різкими зростаннями струму: перший збігається з моментом замикання збігаючої і набігаючої гілок повітряного проміжку, другий - з моментом сходу струмоприймача з набігаючої гілки. Різка зміна струму дорівнює половині струму Локомотива і може досягати 1000 А при крутизні фронту до 1000...1500 кА/с

За розрахунками постійна часу  $T$  яка характеризує швидкість зміни струму в тяговій мережі при перехідних режимах в нормальних умовах експлуатації знаходиться в межах 0,3...0,7с. Однак при запуску електропоїздів вона знижується до 0,1 с, а при проїзді повітряних проміжків та повторної подачі напруги - 0,03...0,05с. Чим більше струм к.з. в порівнянні з струмом навантаження, тим легше виявити коротке замикання.

В кривій струму фідера міститься значна кількість вищих гармонік, кратних шести (при шести пульсовому випрямленні змінного струму на тягових підстанціях), а також інші гармоніки пов'язані з нелінійними процесами в ланцюзі при наявності електричної дуги в місці к.з. Крутизна наростання струму к.з. може змінюватися від 70...100 кА/с (при віддалених к.з.) до 500...700 кА/с (при к.з. поблизу шин підстанції). На підставі дослідних даних можна вважати, що різка зміна струму при к.з. на одноколійних ділянках становить не менш як 1600 А, а на двох колійній - не менше 2200 А. Постійна часу  $T_M$  (тягової мережі) при к.з. в залежності від місця пошкодження змінюється в межах від 0.003...0,35 С.

Для порівняння аварійного і нормального режимів роботи тягової мережі необхідно досліджувати зміну струму фідера при перехідному процесі в стаціонарних режимах і режимі короткого замикання.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
						31
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		

## **6 АНАЛІЗ ФАКТОРІВ, ЩО ХАРАКТЕРИЗУЮТЬ ПЕРЕХІДНИЙ ПРОЦЕС ПРИ КОРОТКОМУ ЗАМИКАННІ І В УСТАНОВЛЕНОМУ РЕЖИМАХ**

Перш ніж аналізувати всі фактори, що до перехідних процесів, хотілося б розглянути, що насамперед представляє перехідний процес, причини його виникнення та що це таке взагалі.

Перехідний процес— це процес зміни в часі координат, стану, параметрів який виникає при переході від одного усталеного режиму роботи до іншого. Що до причин його виникнення в тяговій мережі, то перехідні процеси виникають внаслідок зміни е. р. с. у колі, напруги, прикладеної до кола, або у зв'язку із зміною його параметрів опору, індуктивності чи ємності. Безпосередніми причинами виникнення перехідних процесів можуть бути комутаційні зміни режимів, тобто вмикання і вимикання джерел живлення, приймачів енергії; короткі замикання на ділянках електричних кіл; зміни механічного навантаження електродвигунів та інше.

Розглянуті дослідження перехідних процесів в тяговій мережі постійного струму дозволили встановити фактори, що характеризують перехідний процес при короткому замиканні і в установлених режимах. Параметри цих факторів можуть бути порівнянні або по амплітудні, або за тривалістю. Тому велика кількість захистів, запропонованих раніше і реагуючих на один з них, не задовольняли повністю або частково вимогам, пред'явленим до захисту контактної мережі. Вони або мають помилкові спрацьовування, або іноді нечутливі до деяких видів к.з.

Поєднання декількох ознак, характерних для перехідного процесу при к.з., дозволяє підвищити чутливість і надійність захисту за рахунок чого значно зменшити число помилкових спрацьовувань. Такими признаками можуть бути: збільшення швидкості наростання струму протягом певного заданого вставкою часу, виникнення коливань напруги в контурі контактний провід-земля ( або

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		32

рейки - земля), збільшення струму згладжуючого пристрою, індукційні напруги певної смуги частоти в додатковому проводі, розташованому паралельно тягової мережі, різке зростання температури контактного проводу, зміна струму вище певної величини. Швидкість зростання струму при запусках електрорухомого складу, при переході поїздів з одного фідера на інший, відриві пантографів і швидкість наростання струму короткого замикання можуть бути порівнянні по величині, тому здійснити надійний захист, що реагує тільки на швидкість наростання струму по фідеру, важко. Пропонувалися різні доповнення до датчика  $di / dt$ , контролюючи час, протягом якого значення  $di / dt$  знаходиться вище заданого уставкой і формують логічний сигнал на спрацьовування захисту по швидкості наростання струму. Гарні параметри датчика і оригінальний алгоритм можуть знизити число помилкових спрацьовувань в режимах запуску поїздів і підвищити чутливість при к.з. з малим струмом.

Коливання напруги в контурі контактний провід-земля, а також індуквану е.р.с. певної смуги частот можна використовувати як додаткові ознаки, які вказують, що сталося коротке замикання, в тому числі і з малими струмами. З метою надійності і селективності захисту в якості додаткової ознаки можна використовувати високочастотні коливання в смузі частот від 4 кГц і вище, коли в порівнянні сигнал-перешкода максимальне, при наявності надійних датчиків можна контролювати температуру контактного проводу, можна контролювати кількість різкої зміни струму  $\Delta I$  певної величини за певний часовий інтервал.

Таким чином, для розробки надійного захисту контактної мережі від малих струмів к.з. слід використовувати кілька ознак, одночасна поява яких повинна свідчити про коротке замикання, а окрема поява кожного з них не повинна викликати дію захисту. Щоб виконати ці умови в схемі захисту повинно здійснюватися порівняння сигналів від датчиків по амплітуді і тривалості з наступною логічною обробкою за заданим алгоритмом. Таким чином можна створити кілька типів багато параметричних захистів.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		33

В одному з варіантів в якості ознак пропонується використовувати швидкість наростання струму по фідеру, змінну складову напруги контактний провід-земля, високочастотні коливання напруги, індукованого в додатковому проводі з корекцією їх в залежності від параметрів тягової мережі, типу е.р.с. і режимів роботи. За датчиком швидкості наростання струму можна визначити на якому фідері сталося коротке замикання. Збільшення швидкості наростання струму вказує на те, що має місце перехідний процес, пов'язаний з наростанням струму з фідера. Змінна складова напруги "контактний провід - земля" свідчить про характер перехідного процесу, пов'язаний зі зміною режиму роботи тягової мережі, а величина його про режим к.з. і, нарешті, високочастотні коливання певної частоти в паралельному контурі свідчить про коливальний процес, характерним для режиму к.з. в мережі.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
						34
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		

## 7 СИЛОВА ЧАСТИНА СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАПРУГИ

Силова частина системи стабілізації напруги наведена на рис. 7.4. У неї входить автономний інвертор, зібраний за мостовою схемою на *IGBT* транзисторах  $Z_1$ - $Z_4$ . Інвертор перетворює постійну напругу в змінну з частотою 5 кГц. Навантаженням для інвертора є трансформатор. Виводи трансформатора підключені до випрямляча, зібраному за мостовою схемою на силових діодах  $D_1$  і  $D_2$  *IGBT* транзисторах  $Z_5$ ,  $Z_6$ , які працюють у ключовому режимі. Змінюючи тривалість імпульсу напруги затвор емітера  $U_{зв}$  *IGBT* транзисторів  $Z_5$ ,  $Z_6$  можна керувати напругою на навантаженні, тобто на виході перетворювача [13,14,15].

Структурна схема, найбільш поширеною тягової підстанції, приведена на рис. 7.1, з системою стабілізації - на рис. 7.2, з регульованим вольтододатковим пристроєм - на рис. 7.3

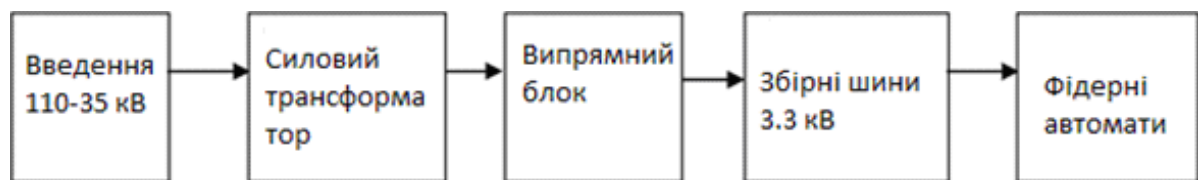


Рисунок 7.1- Структурна схема тягової підстанції



Рисунок 7.2- Структурна схема тягової підстанції з системою стабілізації напруги 3.3 кВ

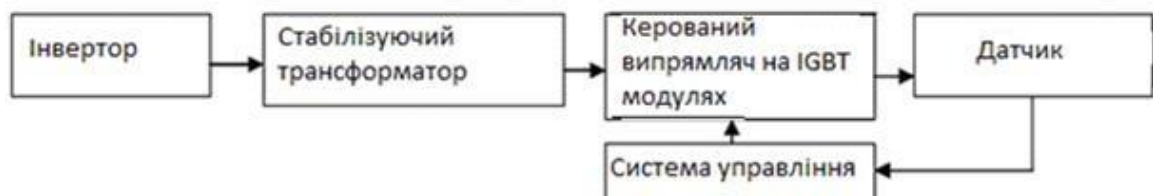


Рисунок 7.3- Структурна схема стабілізації напруги з регульованим вольтододатковим пристроєм

Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата



Рисунок 7.4- Силова частина системи стабілізації

Напруга на виході випрямного агрегату тягової підстанції (на схемі позначено  $U_1$ ) подається на вхід автономного інвертора, зібраного за мостовою схемою на транзисторах  $Z_1$ - $Z_4$ . У момент часу від 0 до  $t_1$  сигнал з блоку управління відкриває транзистори  $Z_1$ ,  $Z_4$  і на первинну обмотку автотрансформатора подається напруга  $U_1$ .

У момент часу від  $t_1$  до  $t_2$ , напруга на первинній обмотці автотрансформатора (клеми 1-4)  $U_1$  змінює свій знак на протилежний, так як відкриваються транзистори  $Z_2$ ,  $Z_3$ , а транзистори  $Z_1$ ,  $Z_4$  закриваються. Таким чином, постійна напруга 3.3 кВ перетворюється в змінну напругу з частотою 5 кГц на первинній обмотці автотрансформатора. Залежність  $U_1(t)$  наведена на рис. 7.5.

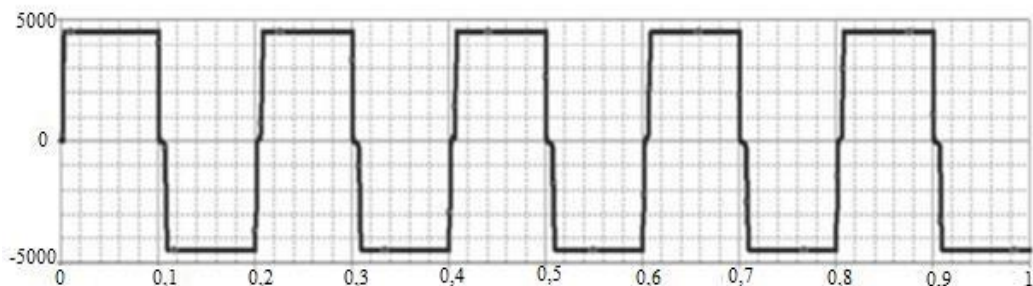


Рисунок 7.5- Напруга  $U(t)$  інвертора

Високочастотний трансформатор складається з первинної обмотки  $L_1$ , вторинної обмотки  $L_2$ , феритового сердечника. Виводи вторинної обмотки автотрансформатора підключені до однофазного мостового випрямляча на діодах  $D1$ ,  $D2$  IGBT модулях  $Z_5$ ,  $Z_6$ , який підключається кабелем електроживлення до контактної мережі.

Блок управління здійснює вимірювання напруги на навантаженні, порівнюється з еталоном, і якщо напруга в контактній мережі вище норми, то на транзистори  $Z_5$ ,  $Z_6$  подається напруга  $U_{\text{з}}$  менше, ніж у попередній момент часу. І навпаки, якщо в контактній мережі напруга нижче норми, тоді блок управління подає більшу напругу  $U_{\text{з}}$  на транзистори  $Z_5$ ,  $Z_6$ . Таким чином здійснюється стабілізація напруги.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
						37
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		

## 8 ВИБІР ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ

Базовими елементами при розробці системи були обрані сучасні *IGBT* - транзистори, або модулі, характеристики якого дозволяють працювати з досить великими струмами і напругами. Потужноструміві модулі з електричною ізоляцією, як правило, містять ключі, з'єднані за полу мостовою ключовою схемою або з одно ключовою конфігурацією. У цих модулях діапазон номінальних струмів коливається в межах від 25 до 5000 ампер, а робоча напруга доходить до 4.0 кВ [8].

Привабливими рисами потужнострумівих модулів є: наявність електричної ізоляції, простота монтажу з охолоджувачем і легкість зв'язку з іншими модулями для підвищення навантаження кола. Вони також дозволяють уникнути використання паралельного з'єднання ключів для струмів, що перевищують сотні ампер.

Використання приладів з вбудованими зворотними швидкодіючими діодами становиться особливо кращим при розробці інверторів. У цьому випадку необхідне число силових напівпровідникових компонентів зменшується на 50 % порівняно з користуванням *IGBT* і діодів у вигляді окремих елементів.

Перебиваються області діапазонів струмів, де використання дискретних приладів економічно переважніше в порівнянні з потужнострумівими модулями, можуть бути розширені за рахунок паралельного з'єднання окремих приладів.

Тож чому саме *IGBT*, а не наприклад *MOSFET*. Розглянемо трішки детальніше *IGBT* (БТІЗ-біполярний транзистор з ізолюваним затвором) у відкритому стані струм проходить через р-п-перехід, а у *MOSFET* - через канал стік-витік, що володіє резистивним характером. Тож і можливості для розсіювання потужності у цих приладів розрізняються, втрати виходять різними: у *MOSFET*-полосника розсіювана потужність буде пропорційна квадрату струму через канал і опору каналу, в той час як у БТІЗ розсіювана потужність виявиться пропорційна напрузі насичення колектор-емітер і току через канал

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		38

першого ступеня.

Якщо нам потрібно знизити втрати на ключі то можливо, буде потрібно вибрати MOSFET з меншим опором каналу, однак не варто забувати, що з ростом температури напівпровідника це опір зросте й втрати на нагрів все ж зростуть. А ось у IGBT з ростом температури напруга насичення р-п-переходу навпаки знижується, значить і втрати на нагрів зменшуються.

Але не все так просто, як може здатися на погляд недосвідченого в силовій електроніці людини. Механізми визначення втрат у IGBT і MOSFET в корені відрізняються.

У MOSFET-транзистора опір каналу в провідному стані обумовлює певні втрати потужності на ньому, які за статистикою майже в 4 рази перевершують потужність, затрачену на управління затвором.

У IGBT справа йде з точністю до навпаки: втрати на переході менше, а ось витрати енергії на управління - більше. Мова про частотах порядку 60 кГц, і чим вище частота - тим більше втрати на управління затвором, особливо стосовно IGBT.

Справа вся в тому, що в MOSFET неосновні носії заряду не рекомбінують, як це відбувається в IGBT, в складі якого є польовий MOSFET-транзистор, що визначає швидкість відкривання, але де база недоступна безпосередньо, і прискорити процес за допомогою зовнішніх схем не можна. В результаті динамічні характеристики у IGBT обмежені, обмежена і гранична робоча частота.

Підвищуючи коефіцієнт передачі і знижуючи напругу насичення припустимо, знизимо статичні втрати, але зате підвищимо втрати при перемиканні. З цієї причини виробники IGBT-транзисторів вказують в документації на свої прилади оптимальну частоту і максимальну швидкість перемикання.

Є недолік і у MOSFET. Його внутрішній діод відрізняється кінцевим часом зворотного відновлення, яке так чи інакше перевищує час відновлення,

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		39

характерне для внутрішніх антипаралельних діодів IGBT. У підсумку маємо втрати включення і струмові перевантаження у MOSFET в полу мостова схема.

Тепер безпосередньо про розсіюване тепло. Площа напівпровідникової IGBT-структури більше ніж у MOSFET, тому і розсіювана потужність у IGBT більше, в той же час температура переходу в процесі роботи ключа зростає інтенсивніше, тому важливо правильно підібрати радіатор до ключа, розумно розрахувавши потік тепла, прийнявши до уваги теплові опори всіх кордонів збірки.

У MOSFET на високих потужностях також ростуть втрати на нагрів, сильно перевершуючи втрати на управління затвором IGBT. При потужностях вище 300-500Вт і на частотах в районі 20-30 кГц перевага буде за IGBT-транзисторами.

Тому, для кожного завдання вибирають свій тип ключа, і є певні типові погляди на цей аспект. MOSFETи підійдуть для роботи на частотах вище 20 кГц при напрузі живлення до 300 В - зарядні пристрої, імпульсні блоки живлення, компактні інвертори невеликої потужності і т. Д. - переважна більшість з них збирають сьогодні на MOSFET.

IGBT добре працюють на частотах до 20 кГц при напрузі живлення 1000 і більше вольт - частотні перетворювачі, ІБП і т. П. - ось низькочастотний сегмент силової техніки для IGBT-транзисторів.

У проміжній ніші - від 300 до 1000 вольт, на частотах порядку 10 кГц, - підбір напівпровідникового ключа відповідної технології здійснюють суто індивідуально, зважуючи всі за і проти, включаючи ціну, габарити, ККД і інші фактори.

Поява сонячних та вітряних електростанцій, а також збільшення числа електромобілів і інших типів електротранспорту, створення розподілених мереж генерації електрики – все це вимагає управління потоками електроенергії, неможливе без перетворення її параметрів.

На сьогоднішній день потужності високочастотних перетворювачів вже

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
						40
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		

перевищили рівень в один мегават. Це означає, що їх робочі напруги і струми вимірюються цифрами з трьома і більше нулями. Але ж крім забезпечення навантажень необхідною кількістю енергії, перетворювачі повинні бути надійними, компактними, високоефективними і мати максимально тривалий термін служби. Очевидно, що для виконання цих взаємовиключних вимог вони повинні будуватися на основі силових компонентів зі специфічним набором характеристик, серед яких установча потужність (твір максимально допустимого напруги на максимально допустимий струм) є головним, але не єдиним ключовим параметром. З усього існуючого різноманіття компонентів за якими ми можемо спостерігати, найбільш підходящими для побудови потужних перетворювачів є біполярні транзистори з ізольованим затвором (*IGBT*), поступово витісняють з цієї області всі інші типи напівпровідникових приладів, в тому числі і замикаються тиристори (*GTO, IGCT*), до недавнього часу колишні практично безальтернативним варіантом для створення потужних перетворювачів.

Оскільки кількість існуючих схем перетворювачів невелика, багато виробників випускають повторювані фрагменти схеми силової частини у вигляді готових модулів. В цьому випадку в спеціально розробленому корпусі з малим тепловим опором розташовуються не тільки силові *IGBT*, а й інші стандартні компоненти, наприклад, антипаралельні діоди, драйвери транзисторів або обмежувачі перенапруг. Крім цього, елементи всередині корпусу з'єднуються між собою, в результаті чого модуль перетворюється в закінчений вузол, що вимагає мінімальної кількості операцій, коли в пристрій. Особливістю розглянутих модулів є використання кількох нових технологій, завдяки яким були значно поліпшені три основних параметри *IGBT*-модуля: питома потужність, ефективність і термін служби. Розробивши дані модулі, компанії фактично вивела потужні перетворювачі на новий рівень якості, поки що недосяжний при використанні аналогічних приладів інших виробників.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		41

Відмінною особливістю *IGBT*-модулів також є унікальне поєднання трьох передових технологій:

1. *IGBT* п'ятого покоління, виготовлені за технологією *Trench-FieldStop*;
2. корпусу з малим тепловим опором *PrimePACK*;
3. технологія ХТ для внутрішніх з'єднань, що збільшує надійність модуля.

Використання кожної з цих технологій окремо вже дозволяє відчутно поліпшити характеристики перетворювачів, однак їх поєднання взаємно посилює переваги один одного, що дозволило компаніям в кінцевому підсумку збільшити питому потужність своїх приладів як мінімум на 25%, тим самим фактично відкривши нову епоху в силовий перетворювальній техніці .

Дивлячись на п'яте покоління *IGBT TrenchStop*. Найбільш простий і недорогий технологією виготовлення *IGBT* є технологія *NPT* (рис. 8.1а) без використання дорогого епітоксіального нарощування кремнію, при якій всі шари транзистора розташовуються в основній пластині. *NPT-IGBT* відрізняються малим падінням напруги між колектором і емітером, невеликим «хвостом» струму при виключенні, хорошою термостабільністю і повторюваністю параметрів. Однак неможливість збільшення щільності струму призводить до збільшення розмірів транзисторів і, як наслідок, до погіршення їх частотних властивостей і динамічних характеристик. Все це не дозволяє використовувати дані транзистори в потужних пристроях.

Набагато кращі характеристики показують транзистори, виконані за технологією *Trench-FieldStop* (рис. 8.1б), за якою компаніям вдалося реалізувати практично трапецеїдальну форму напруженості електричного поля по товщині дрейфової зони при блокуванні номінальної напруги, на відміну від трикутної форми, реалізованої в *NPT IGBT*.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		42

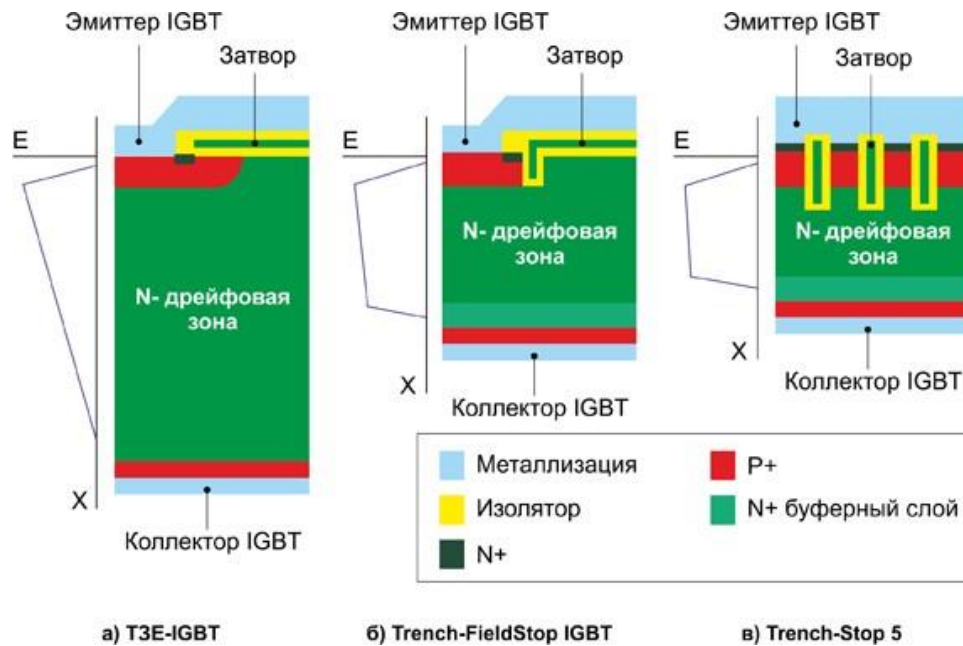


Рисунок 8.1- Структура IGBT різних технологій

Це дозволило приблизно вдвічі зменшити товщину зони дрейфу зарядів і, відповідно, зменшити як величину падіння напруги між колектором і емітером в відкритому стані, так і поліпшити частотні характеристики транзисторів за рахунок зменшення кількості заряду. Використання для виготовлення транзисторів *Trench-FieldStop* пластин кремнію, товщина яких набагато менше товщини стандартних підкладок, з одного боку, ускладнило технологію виробництва і збільшило собівартість, з іншого ж - це було скомпенсовано поліпшенням практично всіх інших параметрів. В результаті *Trench-FieldStop-IGBT* відрізняються малими значеннями статичних і динамічних втрат, теплового опору, високою щільністю струму і стійкістю до циклічних теплових навантажень.

Останньою розробкою на сьогоднішній день є транзистори п'ятого покоління (рис. 8.1в). Поєднуючи в собі всі ключові переваги попередніх технологій, транзистори *TrenchStop5* мають ще меншу товщину дрейфової зони і, Набагато кращі характеристики показують транзистори, виконані за технологією *Trench-FieldStop* (рисунок 8б), за якою компаніям вдалося реалізувати практично трапецеїдальну форму напруженості електричного поля

по товщині дрейфової зони при блокуванні номінальної напруги, на відміну від трикутної форми, реалізованої в *NPT IGBT*.

Крім цього, збільшена товщина мідної металізації виведення емітера дозволила збільшити теплову ємність структури і збільшити допустимий час роботи на кордоні області безпечної роботи (в режимі короткого замикання) до 10 мкс.

Однак які б високі характеристики не були у транзистора, його робота залежить, перш за все, від оточуючих умов, які, в свою чергу, залежать від характеристик корпусу. В першу чергу від корпусу залежить швидкість відводу тепла і, відповідно, температура кристалів. Крім цього, з огляду на особливості роботи потужних перетворювачів, особливе значення для цього вузла модуля має стійкість до циклічних теплових навантажень.

Спостерігаючи за результатами проведених досліджень, найбільш руйнівними для потужних силових модулів є періодичні коливання температури, що виникають із-за непостійності навантаження перетворювачів. Невдалий підбір матеріалів основи корпусу, способів кріплення силових компонентів модуля і внутрішніх з'єднань з часом, через різних коефіцієнтів теплового розширення матеріалів, призводить до руйнування з'єднань елементів всередині модуля і виходу його з ладу.

Скажімо, при використанні м'яких припоїв на основі олова з температурою плавлення 230 ... 280 ° С максимальна температура кристалів не повинна перевищувати 150 ° С. У цьому випадку виробник ще може гарантувати тривалу роботу модуля. Але при збільшенні температури кристала до 175 ° С вже різко зростає плинність припою, що призводить до появи внутрішніх напружень і в кінцевому підсумку, після ряду циклів «нагрів-охолодження» (включення- виключення перетворювача) - до руйнування з'єднання. Саме це є одним з основних причин виходу з ладу напівпровідникових модулів, розрахованих на використання в потужних перетворювачів. Причому руйнування можуть піддаватися будь-які з'єднання всередині модуля: кріплення

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
						44
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		

транзисторів до основи, внутрішньо блокові з'єднання, покриття підстав і елементів модуля. Скрізь, де існує з'єднання декількох різномірних матеріалів, є велика ймовірність відмови через наявність змінних теплових навантажень.

Ключовими особливостями корпусів *PrimePACK* є мала величина теплового опору, в тому числі і за рахунок розміщення кристалів напівпровідникових елементів ближче до точок кріплення підкладки до тепло відводу, що дозволяє ефективно відводити тепло від силових елементів модуля (рис.8.2).

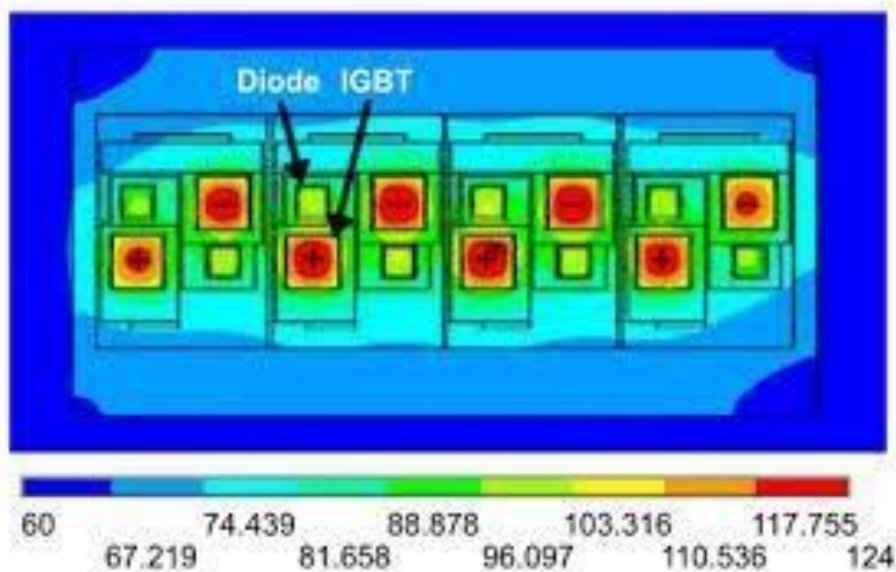


Рисунок 8.2- Моделювання розподілення температури в середині корпусу *PrimePACK*

Також на рис.8.2 можемо спостерігати, що IGBT з антипаралельними діодом розташовуються поперемінно (в шаховому порядку). Це особливо важливо, коли коефіцієнт потужності  $\cos\phi$  високий (близький до 1). Тому і вважають одним з важливим фактором в роботі модуля тепловий процес.

## 9 МОДЕЛЮВАННЯ В СЕРЕДОВИЩІ ORCAD 9.2

Для моделювання роботи системи стабілізації з програмних пакетів обрана OrCAD 9.2. Середо OrCAD 9.2 є універсальним засобом наскрізного проектування електронних систем і володіє широкими можливостями[16,17].

На рис. 9.1 зображена модель системи стабілізації. Як ключі обрані *IGBT* модулі компанії *MitsubishiElectric*. Залежність  $U_1(t)$  інвертора (напруга на виході) зображена на рис.7.5.

Генераторами служать моделі джерел напруги прямокутних імпульсів *Vpulse*, вибрані з стандартних бібліотек OrCAD. Модель трансформатора взята з бібліотеки *Analog*, модель сердечника - з бібліотеки *Magnetic*. Модель *IGBT* модуля CM600HA - 12H теж присутня в стандартному наборі бібліотек OrCAD.

Таким чином модель силової частини системи стабілізації відображає змінення в перетворювачах напруги в залежності від величини навантаження, напруги і частоти перетворювання. Як змінюється напруга при роботі системи стабілізації на вході і на виході автотрансформатора, та якої вона форми на виході випрямляча при повністю відкритих модулях, можемо спостерігати на рис.9.2.

Але труднощі з'являються при виборі матеріалу осердя і габариту трансформатора, при підвищенні робочої частоти, втрати потужності мають особливе значення. В цьому випадку обмеження виникають не тільки від часових характеристик робочих ключів.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
						46
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		

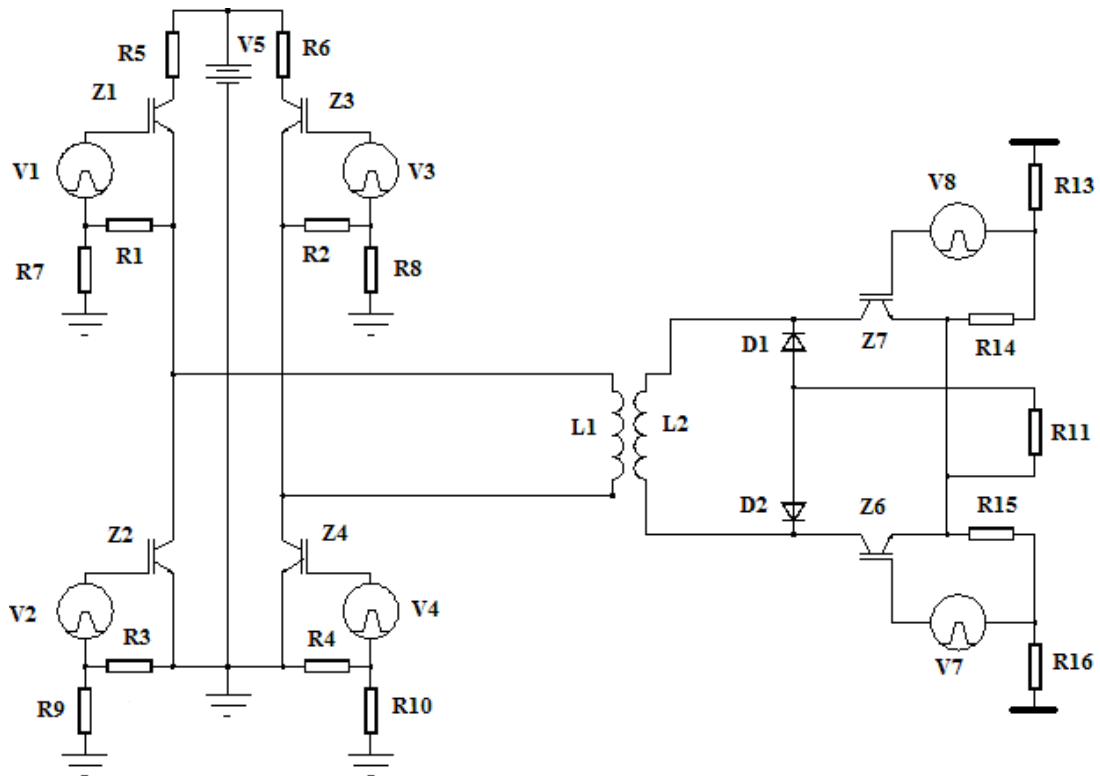
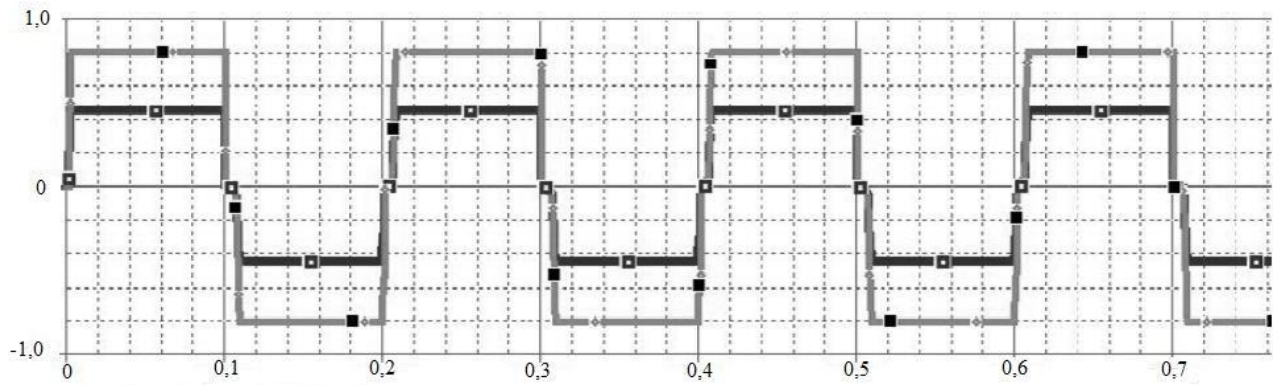


Рисунок 9.1 Модель силової частини системи стабілізації

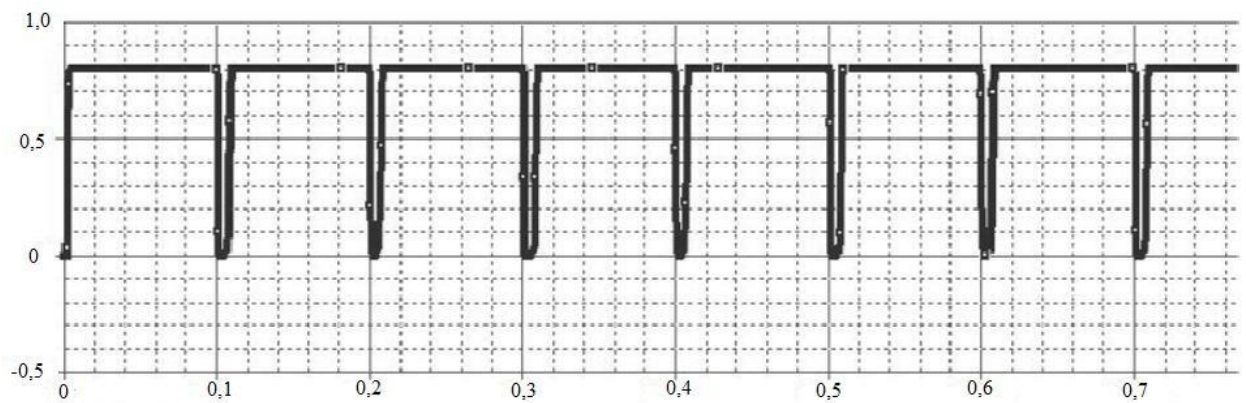
Діаграми, отримані в результаті моделювання в середовищі OrCAD 9.2 і показують роботу системи стабілізації. Таким чином, випрямляч, який працює в режимі широтно-імпульсного модулятора, дозволяє стабілізувати напругу в контактній мережі тягового електротранспорту.

Зворотній діод, що шунтує транзистор в *IGBT*-приладах, перешкоджає появі зворотної напруги на транзисторі при протіканні зворотнього струму в послідовному діоді ключа. Вимоги щодо швидкодії зворотнього діода не є жорсткими, що дозволяє в перспективі суттєво спростити технологію виготовлення *IGBT*-приладів для перетворювачів даного типу. Тому з'являється необхідність в застосуванні безообмоточних індуктивних снаберів[5,18].

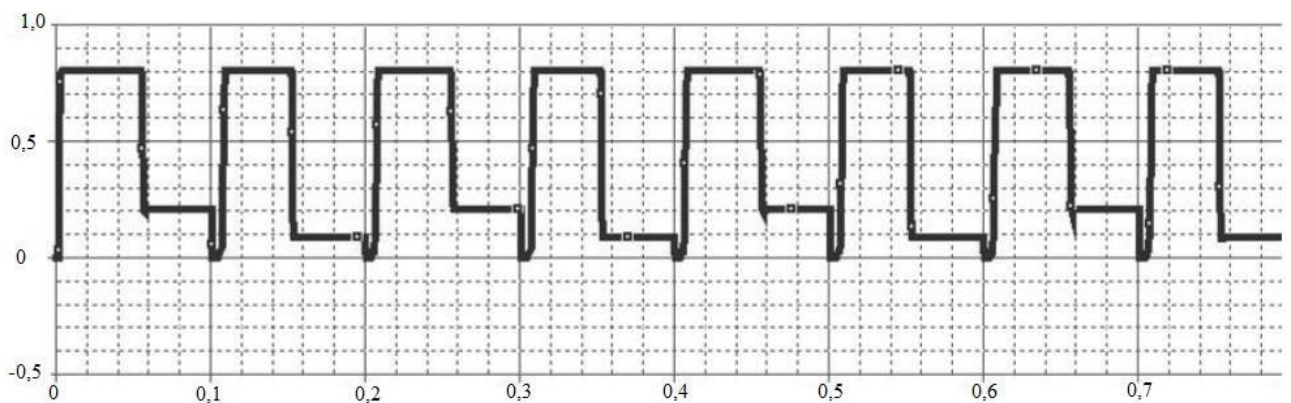
Також можливо застосовувати конденсатори визначеної ємності, але в цьому випадку треба враховувати відстань між виводом транзистора і місцем під'єднання і довжиною з'єднуючого проводу.



*a*



*б*



*в*

*a* - форма напруги на вході і на виході автотрансформатора; *б* - форма напруги на виході випрямляча при повністю відкритих модулях  $Z_5$ ,  $Z_6$ ; *в* - форма напруги на виході випрямляча при відкритих на 50% модулях  $Z_5$ ,  $Z_6$

Рисунок 9.2. Діаграми напруги при роботі системи стабілізації

Зворотній (крізний) струм виникає при перемиканні пари ключів, якщо вихідна лінійна напруга, що діє між ними, спрямована так, що струм у ключі, який

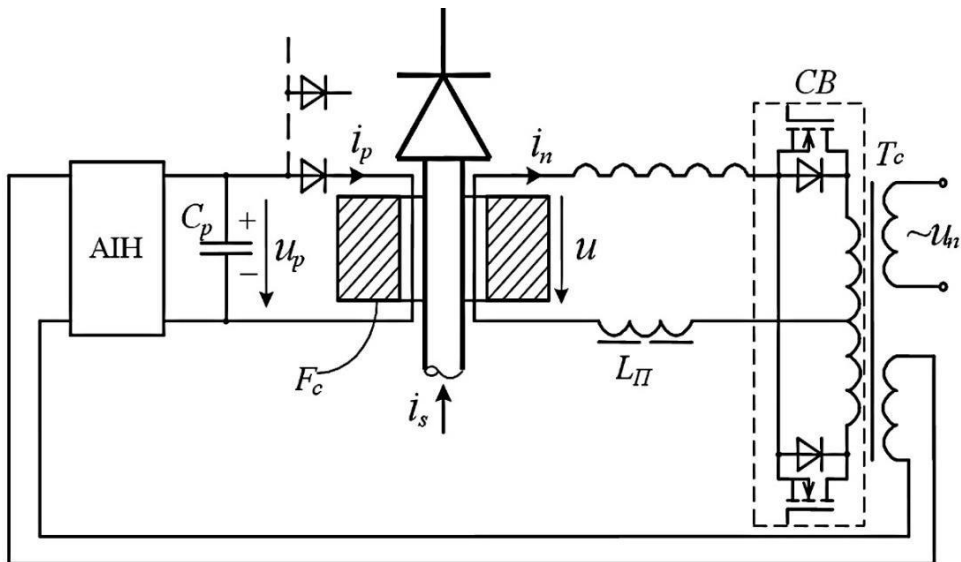
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата

виходить з роботи, спадає. В протилежному випадку має місце „жорстке” вимикання ключа, який виходить з роботи. Це приводить до переводу вхідного струму на ключ, що входить в роботу і який повинен бути підготовлений до цього завчасно, подачею сигналу управління на його відкриття.

При достатньо високій швидкодії керованого напівпровідникового приладу ключа „жорстке” вимикання не викликає особливих проблем, в той час як різні струми викликають значні комутаційні втрати і струмове перевантаження керованих напівпровідникових приладів, що входять в роботу. Використовувати для їх обмеження спеціальні ультра-швидкодійні послідовні діоди не є можливим, оскільки вони мають великі падіння напруги у провідному стані. Прийнятним вирішенням цієї проблеми може, також, бути використання безобмоточних індуктивних снаберів.

Принцип дії індуктивного снабера з осердям, що насичується, відомий і полягає в тому, що при переході струму діода через нульове значення, послідовно включений з ним дросель виходить з насичення і створює ступінь малого струму, тривалість якого  $t_{CT}$  достатня для розсмоктування носіїв заряду в діоді. Суттєвого зворотнього струму при цьому не виникає. Однак ненасичений дросель перешкоджає наростанню струму в діоді при його наступному включенні, що веде до перенапруги на транзисторі, що вимикається. Для недопущення пробиття транзистора необхідно наситити осердя на інтервалі паузи в струмі діода шляхом підмагнічування осердя постійним струмом  $i_n$ . Однак, при цьому не контролюється напруга на дроселі на інтервалі розмагнічування  $i_p$ , яка прикладається до діода. Крім цього, при намагнічуванні-розмагнічуванні в ланцюгах снабера циркулює деякий запас енергії (енергії комутації), який в потужних перетворювачах доцільно не виділяти в елементах схеми у вигляді тепла, а повернути джерелу живлення. На рис. 9.3 наведена конструкція і схема індуктивного снабера, що вирішує вище вказані задачі.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
						49
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		



$F_c$  – феритове осердя;  $CB$  – синхронний випрямляч, що живить ланцюг підмагнічування;  $L_{\Pi}$  – фільтровий дросель в ланцюзі підмагнічування;  $C_p$  – фільтровий конденсатор в ланцюзі повернення енергії комутації;  $AИH$  – автономний інвертор напруги;  $T_c$  – трансформатор зв'язку з мережею

Рисунок 9.3- Конструкція и електрична схема безобмоточного індуктивного снабера

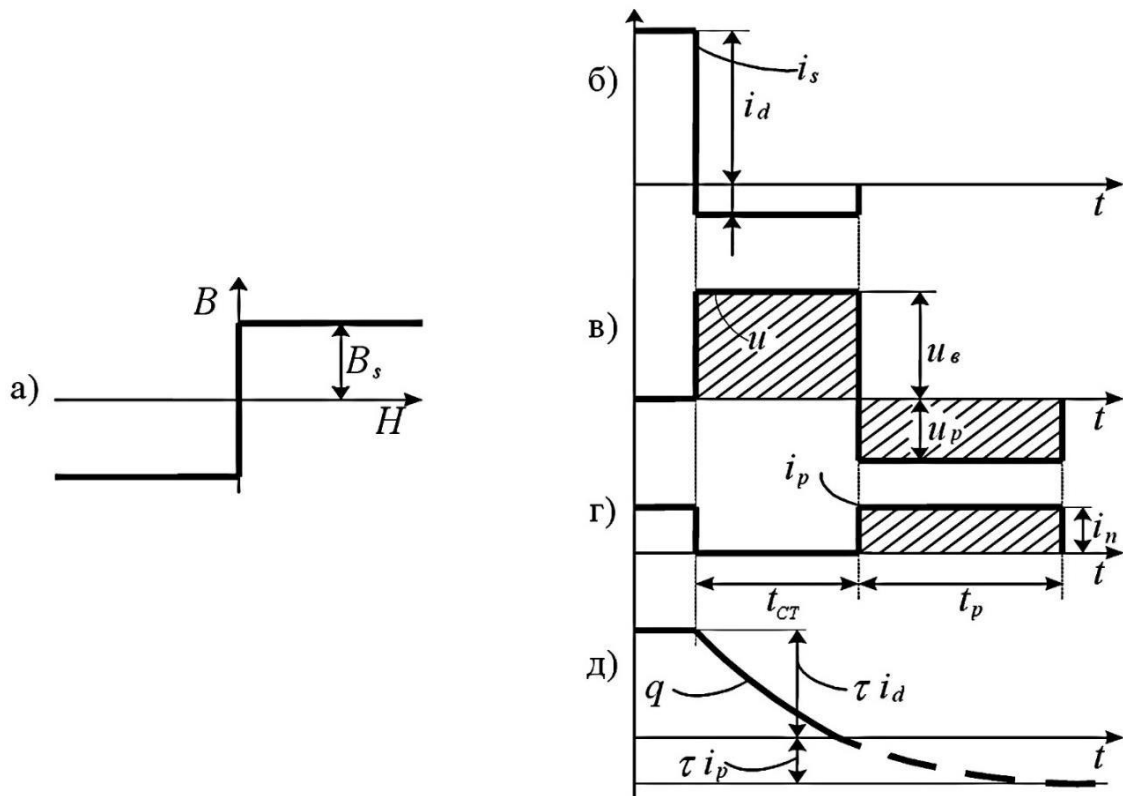
На провідник із струмом силового послідовного діода надівається феритове осердя  $F_c$  і в його вікно пропускається ще два провідника, що зв'язують осердя з ланцюгом підмагнічування і ланцюгом розмагнічування. Провідники підмагнічування шести осердь з'єднуються послідовно і через згладжуючий дросель  $L_{\Pi}$ , живляться постійним струмом  $i_n$  від синхронного випрямляча  $CB$ .

Шунтування діодів синхронного випрямляча низьковольтними польовими транзисторами необхідне для одержання високого к.к.д. у зв'язку з тим, що падіння напруги в ланцюзі підмагнічування складає всього 0,5 В.

Провідники розмагнічування шести осердь через відсікаючі діоди, що пропускають імпульс напруги розмагнічування, приєднуються паралельно до фільтрового конденсатора  $C_p$ , і далі через інвертор і трансформатор зв'язку енергія комутації повертається у живлячу мережу.

Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата

Струм підмагнічування  $i_n$  діє, співпадаючи з прямим струмом  $i_s=i_d$  силового діода. Приймаємо струм підмагнічування  $i_n$  і напругу розмагнічування  $u_p$  ідеально згладженими, а петлю гістерезиса матеріала осердя ідеально прямокутною (рис. 9.4 а). Тоді процеси у часі протікатимуть так, як показано на рис. 9.4 б-д.



а – ідеальна петля гістерезису;  $i_s$  – струм силового діода ключа;  $u$  – напруга на еквівалентному витку;  $i_p$  – струм в ланцюзі розмагнічування;  $q$  – заряд в діоді

Рисунок 9.4-Процеси в безобмоточному індуктивному снабері

Для спрощення схеми снабера можна виключити ланцюг розмагнічування з поверненням енергії комутації, замінюючи його резисторами з опором,  $R_p=u_p/i_n$  підключеним через відсікаючі діоди паралельно до зовнішнього виводу провідників підмагнічування кожного із шести осердь. При цьому втрати потужності в цих резисторах будуть складати біля 15 % від потужності втрат в силових ключах ВДП.

Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата

## ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

В даній дипломній роботі, проведений аналіз існуючих систем тягового електропостачання постійного струму показав, що підвищити якість електроенергії та забезпечити стабілізацію напруги на струмоприймачах ЕРС на розрахунковому рівні можна шляхом раціональної побудови силової частини системи тягового електропостачання при використанні оптимальних законів комутації напівпровідникових приладів, а також при реалізації іншого підходу до системи фільтрації та захисту. Таким чином зробивши відповідні дослідження, ефективність тягового електропостачання безпосередньо залежить від стабілізації напруги, а саме від якості електроенергії, яка подається безпосередньо на електрорухомий склад залізниці.

Вирішення цієї проблеми повинне базуватися на проведенні переоснащення господарства електропостачання та його модернізації. При оптимальному алгоритмі управління рівнем напруги можливо організувати процес перевезення вантажів і пасажирів з мінімальними втратами електроенергії. Вперше пропонується система електропостачання, коли на підстанції встановлюються чотири агрегати (Т1-Т4), обмеженої потужності, які використовуються яквольтододаткові до основного, замість стандартної компоновки проміжної тягової підстанції з двох агрегатів (ТА).

При використанні повністю керованих вольт додаткових агрегатів, з'являється можливість відмовитися від швидкодіючих вимикачів (ШВ) і встановлювати тільки роз'єднувачі і відокремлювачі. У разі перевантаження по струму або короткому замиканні в тяговій мережі, відключаються керуючі імпульси транзисторного випрямляча, потім відключаються роз'єднувачі. Перенапруга, що виникає при комутації, усувається поглинаючими пристроями. Як вольтододаткові агрегати, можна використовувати існуючі випрямлячі тягових агрегатів міського електротранспорту, з плавним регулюванням під навантаженням і збільшенням робочого струму.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		52

## СПИСОК БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бадер М.П. Повышение энергетической эффективности и электромагнитной совместимости системы тягового электроснабжения. / М.П. Бадёр // Материалы международного симпозиума Eltrans`2003, СПб.; ПГУПС, 2003. – с. 257-259.
2. Барковский Б. С. Двенадцатипульсовые полупроводниковые выпрямители тяговых подстанций / Б. С. Барковский, Г. С. Магай, В. П. Маценко. – М. : Транспорт, 1990. – 127 с.
3. Панасенко Н. В. Обратимый преобразователь вольтодобавочного типа для тяговых подстанций электрифицированных железных дорог / [Н. В. Панасенко, В. В. Божко, Ю. П. Гончаров, и др.]. – Киев. : Залізничний транспорт України, 2007.– № 4. – С. 76–80.
4. Болтовский Б. И., Таназлы Г. И. OrCAD. Моделирование «Поваренная книга». М.: Солонпресс, 2005. 200с.
5. Гончаров Ю. П. Перетворювач з вольтододатком на повністю керованих напівпровідникових приладах для тягових підстанцій постійного струму / [Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Божко та інш.]. // Електротехніка і Електроенергетика, 2007.– №2.– С. 4–11.
6. Гончаров Ю. П. Тяговий випрямляч з реверсивним вольтододатком на двохопераційних напівпровідникових приладах / Ю. П. Гончаров, М. В. Панасенко, В. В. Божко. – К. : Технічна електродинаміка. Інститут електродинаміки НАН України, 2008. – Ч.2. –С. 16–21.
7. Пат. 51917 Україна, МПК(2009) H02M 7/00. Перетворювальний агрегат для тягової підстанції постійного струму / Божко В. В., Панасенко М. В., Гончаров Ю.П., Сиченко В.Г.; заявники та власники патенту автори; заявл. 15.01.2010 ; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 15.
8. Бурков А. Т. Электронная техника и преобразователи / А. Т. Бурков. – М. : Транспорт, 2001.– 464 с.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		53

9. Автоматическое регулирование напряжения в системе электроснабжения постоянного тока 3,0 кВ: курс лекций / Б. А. Аржанников, Л. А. Фролов. — Екатеринбург: УрГУПС, 2009. — 48 с
10. Божко В.В. Стабілізуючі перетворювальні агрегати вольтододааткового типу підвищеної ефективності для тягового електропостачання постійного струму електрифікованих залізниць. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, Харків – 2010.
11. Гончаров Ю. П. Перетворювальна техніка. Ч.2 / [Ю. П. Гончаров, О. В. Будьоний, В. Г. Морозов, М. В. Панасенко та ін.]. – Харків. : Фоліо, 2000.– 360 с.
12. Разработка системы стабилизации напряжения тяговой подстанции городского электротранспорта. С.В. Шапиро, С.Р. Муфтиев Уфа : УГАТУ, 2010, Вестник УГАТУ Т. 14, № 5(40). С. 79-85
13. Бадер М.П. Электромагнитная совместимость – М.:УМК МПС, 2002. - 464 с.
14. Москатов Е. А. Силовая электроника. Теория и конструирование. К: МК-Пресс ; СПб.: Корона — Век, 2013. 256 с.
15. Исембергенов Н. Т. Преобразователь частоты на двух транзисторах для электротехнологии//XIV Международная конференция «Электромеханика, электротехнологии, электротехнические материалы и компоненты». Алушта, 2012.
16. Болтовский Б. И., Таназлы Г. И. OrCAD. Моделирование Поваренная книга». М.: Солонпресс, 2005. 200с.
17. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MATLAB 6.0 / С. Г. Герман-Галкин. – СПб. : Корона-принт, 2001. – 320 с.
18. Лагута І.І. Перетворювальний агрегат з коефіцієнтом потужності близьким до 1 для тягової підстанції системи електропостачання постійного струму напруги 3 кВ / І.І. Лагута, М.В. Панасенко, М.В.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		54

Хворост.Днепропетровск.Тезисы.докладов.І.международ.научн.практ.конференция.,„Трансэлектро-2007”. ДИИТ, 2007.

19. **Тези конференцій.** Федянович С. Ю., Бобирь О. Д. Удосконалення режиму напруги в тяговій мережі при підвищенні швидкості руху[текст]/ Всеукраїнський конкурс студентських наукових робіт з галузі «Енергетика» II тур: матеріали наук.-практ. конф.,(Маріуполь, 25-26 березня, 2020р.) 10 стр./ М-во осв. і науки України вул. Університетська 7, Маріуполь, 2020-20 с.

					02.15. ЕС 1921.РД.2020-ПЗ	Арк
Змн.	Арк	№ докум.	Підпис	Дата		55