

# МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ НА ТЯГОВІЙ ПІДСТАНЦІЇ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

**В.Г. Сиченко**

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. Ак. Лазаряна (ДНУТ) Кафедра “Електропостачання залізниць”, вул. Ак. Лазаряна 2, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна  
Тел./факс (0562) 471674, E-mail: elsnz@mail.ru

**Б.А. Рябокін**

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту ім. Ак. Лазаряна (ДНУТ) Кафедра “Електропостачання залізниць”, вул. Ак. Лазаряна 2, м. Дніпропетровськ, 49010, Україна  
Тел./факс (0562) 331911, E-mail: r\_boris\_a@mail.ru

**О.Д. Словак**

«СSoft Україна», м. Дніпропетровськ, 49010, Україна  
Тел./факс 0979363718, E-mail: slovak194@mail.ru

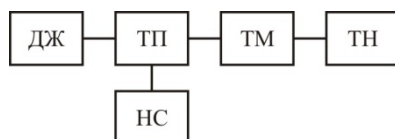
**Annotation** – In the article are reviewed the question of building a model DC traction substation and the results of modeling of electromagnetic processes are presented.

**Key words** - Electrified railway, DC, traction substation, simulation.

## ВСТУП

Тягова підстанція являється головною структурною ланкою енергетичного каналу тягового електропостачання постійного струму, в якій здійснюється перетворення електричної енергії для подальшого споживання. Можна відзначити два основних енергетичних процеси: зміна рівня напруги та перетворення електричної енергії (як випрямлення, так і інвертування).

За загальним принципом структурну схему тягового електропостачання можна представити наступним чином: ДЖ – джерело живлення (зовнішнє електропостачання), ТП – тягова підстанція, ТМ – тягова мережа, ТН – тягове навантаження, НС – нетягові споживачі (рис. 1).

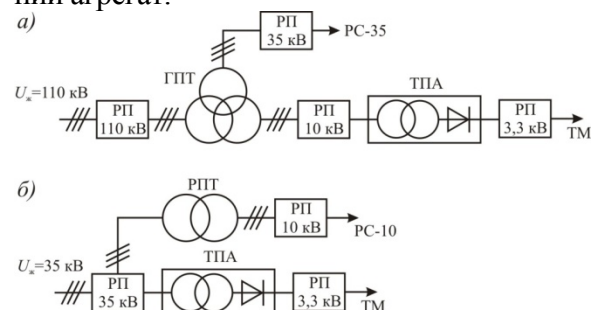


**Рис. 1.** Структурна схема тягового електропостачання



**Рис. 2.** Складові частини тягової підстанції

Кожен зі складових елементів структури ТП також має свої складові частини та схеми заміщення. Зокрема, тягова підстанція складається з таких складових (рис. 2): ГПТ – головний понижуючий трансформатор, ТТ – тяговий трансформатор, ПА – перетворювальний агрегат (напівпровідниковий тяговий випрямляч), а в залежності від рівня напруги зовнішнього електропостачання може бути відсутній ГПТ, в такому випадку з'являється додатковий районний трансформатор (РТ) для живлення нетягових споживачів. Більш розширено структуру тягових підстанцій постійного струму ілюструє рис. 3, де РП – розподільчий пристрій, РС – районні споживачі, ТПА – тяговий перетворювальний агрегат.



**Рис. 3.** Структурні схеми тягових підстанцій постійного струму: а) з двохступеневою трансформацією з напругою живлення більше 35 кВ; б) з одноступеневою трансформацією з напругою живлення 35 кВ і менше

З точки зору енергообмінних процесів структурну схему тягової підстанції (ТП) можна представити наступним чином (рис. 4):

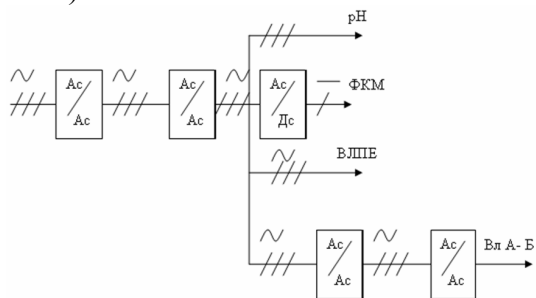


Рис. 4. Структурна схема тягової підстанції

### ПОБУДОВА МОДЕЛІ

На сьогодні день для розрахунку енергообмінних електромагнітних процесів у тяговій мережі широко застосовується імітаційне моделювання. У більшості математичних моделей ТП представляється у вигляді джерела постійної напруги, яке являється одночасно генератором гармонік [1-5]. Ця, найбільш застосовувана раніше модель, наведена на рис. 5.

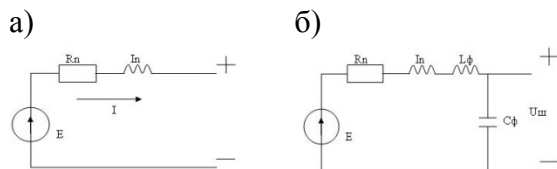


Рис. 5. Найбільш застосовувана раніше модель ТП: а) без урахування згладжуючого фільтру; б) з урахуванням згладжуючого фільтру.

Дослідження електромагнітних процесів в системі тягового електропостачання може бути виконане як теоретично (аналітичний опис в математичній формі), так і експериментально. З електротехніки відомо, що математичний опис електричних ланцюгів і процесів, що протікають в них, дозволяє вивчати електричні ланцюги на теоретичному рівні. Електричні апарати і машини, до яких відносяться випрямлячі, трансформатори і електродвигуни, мають в своїх ланцюгах складнішу взаємодію електричних сигналів, ніж в лінійних електричних ланцюгах, тому, для опису електромагнітних процесів, що про-

тікають в них, використовують математичні моделі – набір математичних виразів, що описують роботу певного класу пристроїв.

Наприклад, робота напівпровідникових перетворювачів (випрямлячів) заснована на перемиканні (комутації) груп вентилів так, щоб в кожен момент часу струм на виході перетворювача мав необхідну величину і протікав в потрібному напрямі. У всіх схемах процес комутації обумовлює споживання перетворювачем несинусоїдального струму, що є причиною спотворення форми кривої живлячої напруги. У свою чергу, спотворення форми кривої живлячої мережі приводить до появи в спектральному складі випрямленої або такої, що інвертується, напруги неканонічних гармонік із значними амплітудами.

Математична модель випрямляча будується на базі трифазного мостового випрямляча, який широко використовується в сучасних тягових випрямлячах для реалізації 6-и, 12-ти і 24-х пульсових схем випрямлення [6]. Метод моделювання заснований на описі перетворювача єдиною системою диференціальних рівнянь, справедливий для всіх структурних станів перетворювача, що і дозволяє досліджувати електромагнітні процеси.

У моменти часу, коли створюються умови провідності або замикання гілок, еквівалентні опори змінюються по величині, що викликає зміну коефіцієнтів схеми, а не її структури. Чисельна інтеграція диференціальних рівнянь дозволяє визначити форми кривих напруги і струмів в будь-якій точці перетворювача і, відповідно, ланцюзі живлячої і випрямленої напруги. Аналіз ЕМЗ в перетворювальних агрегатах, що отримують живлення від енергосистеми, в загальному випадку вже з несиметричною і несинусоїдальною живлячою напругою, значно утруднений і може проводитися тільки із застосуванням сучасної обчислювальної техніки. Крім того, ланцюги випрямлячів 12-ти і 24-х пульсових схем випрямлення використовують відповідно 2 і 4 трифазних мости, що значно ускладнює модель такого ви-

прямяча і збільшує об'єм оброблюваних даних.

Друга основна частина тягового перетворювача - реальний трансформатор являє собою неоднорідну, просторово розподілену структуру з нелінійними характеристиками [2]. У реальному трансформаторі магнітний потік проходить не тільки по сталі магнітопроводу, що має нелінійну характеристику намагнічування й петлю гістерезису, але й по повітрю, питомий магнітний опір якого постійний. Відгалуження потоку зі сталі в повітря, а також його об'ємний розподіл у повітрі залежать від багатьох факторів як конструкторції трансформатора, так і режиму його роботи.

Для дослідження роботи трансформатора застосовується ідеалізована універсальна модель, з якої можна одержати схеми конкретних випрямлячів як окремі випадки. В якості такої ідеалізованої моделі трансформатора в керованому випрямлячі приймається трифазний чотирьохстрижневий трансформатор приведення до схеми з постійними параметрами. Така модель дає найбільш загальний випадок і описується найбільш загальними рівняннями, з яких, як часткові випадки, можна одержати інші схеми керованих трансформаторів.

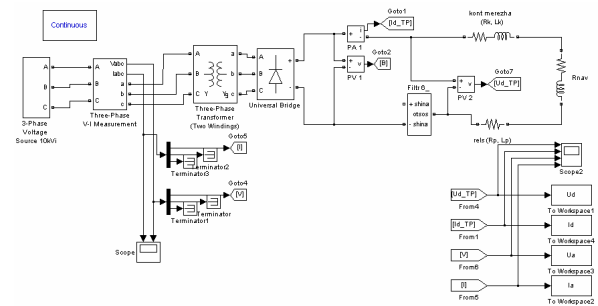
Побудова моделі тягової підстанції в програмному середовищі Simulink (MatLab) не вимагає створювати повну схему заміщення об'єкту поелементно, що складається лише з джерел живлення та лінійних чи нелінійних пасивних елементів, а можливо застосовувати уже існуючі блоки елементів, такі як трансформатор чи випрямляч, в які необхідно тільки ввести відповідні дані обладнання [7].

При моделюванні використовувалась дещо спрощена схема тягової підстанції: первинним джерелом живлення прийнято джерело з напругою, рівною можливій первинній напрузі тягового агрегату; районні споживачі не враховувались. При моделюванні тягової підстанції було прийнято незмінне навантаження (8 км тягової мережі, незмінний опір та ін-

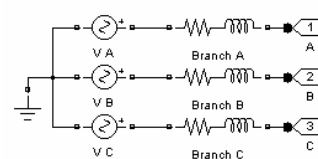
дуктивність електровозу) та декілька можливих схем виконання: без пасивного фільтру, з пасивним, активним та гібридним фільтрами на стороні 3,3 кВ, з 6-пульсовою мостовою та 12-пульсовою двомостовою послідовного типу схемами випрямлення, а також з вольтододатковим випрямлячем. Крім того, моделювання було проведено для схем з рівнем первинної напруги тягових агрегатів 10 кВ і 35 кВ: ідеальним джерелом та джерелом, наближеним до реального.

Модель тягової підстанції складається з силових блоків (трифазне джерело 3-Phase Voltage Source, трансформатор, мостові випрямлячі, активні і реактивні елементи, що заміщують контактну мережу, тягове навантаження та пасивний фільтр) та вимірювальних, логічних і МА-тематичних блоків, за допомогою яких вимірюються сигнали (напруга, струм тощо) і виконуються розрахунки.

На рис. 6 представлена модель тягової підстанції постійного струму з 6-ти пульсовою схемою випрямлення. Аналогічно наведеній моделі також були створені моделі підстанцій з 12-пульсовими перетворювачами та різними первинними напругами живлення (10 кВ і 35 кВ).



**Рис. 6.** Модель тягової підстанції постійного струму з 6 пульсовим випрямлячем та тяговою мережею



**Рис. 7.** Модель трифазного джерела живлення 10 (35) кВ

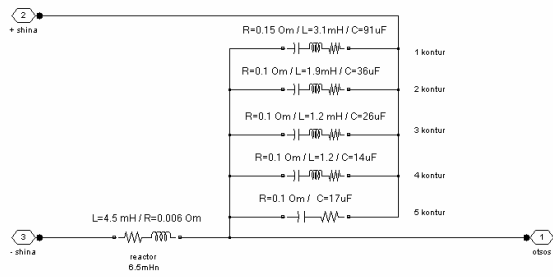


Рис. 8. Модель типового пасивного фільтру для 6-пульсової схеми випрямлення

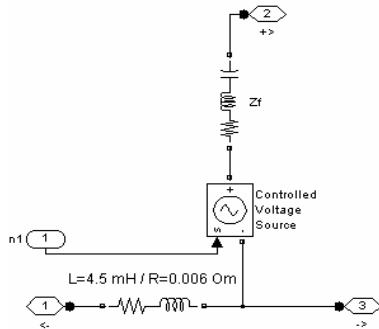


Рис. 9. Модель активного фільтру

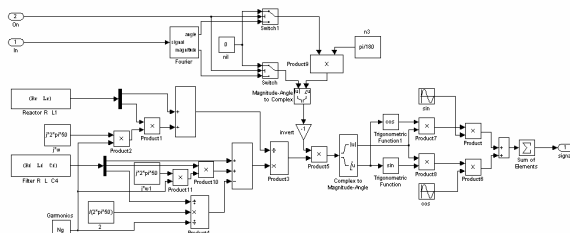


Рис. 10. Схема функціонування активного фільтру (керування та розрахунок)

РЕЗУЛЬТАТИ МОДЕЛЮВАННЯ  
Результати моделювання представлені на рисунках 11 – 18.

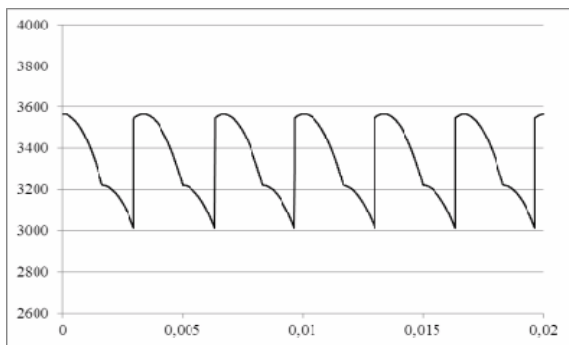


Рис. 11. Напряга 3,3 кВ при 6-пульсовій схемі випрямлення, ідеальному джерелі живлення 10 кВ без пасивного фільтру

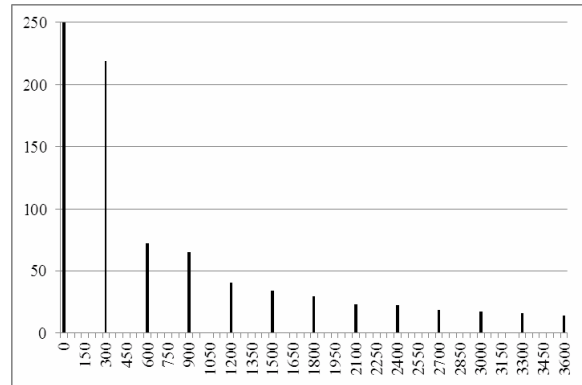


Рис. 12. Гармонійний склад напряги 3,3 кВ

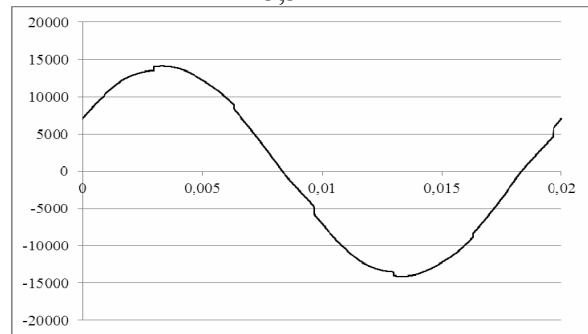


Рис. 13. Напряга 10 кВ при 6-пульсовій схемі випрямлення

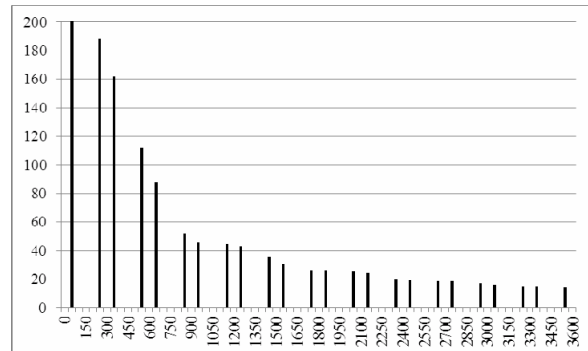


Рис. 14. Гармонійний склад напряги 10 кВ

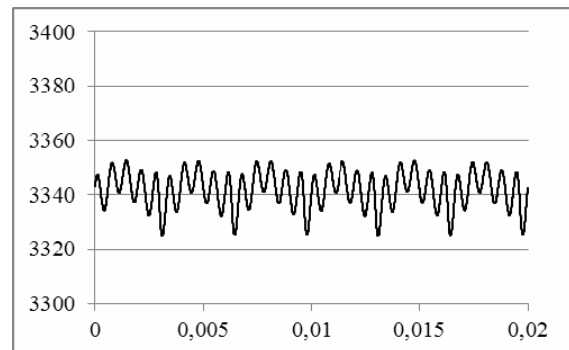


Рис. 15. Напряга 3,3 кВ при 6-пульсовій схемі випрямлення з пасивним фільтром та ідеальному джерелі живлення 10 кВ

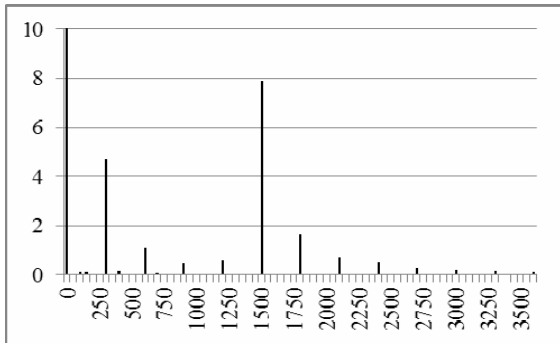


Рис. 16. Гармонійний склад напруги 3,3 кВ

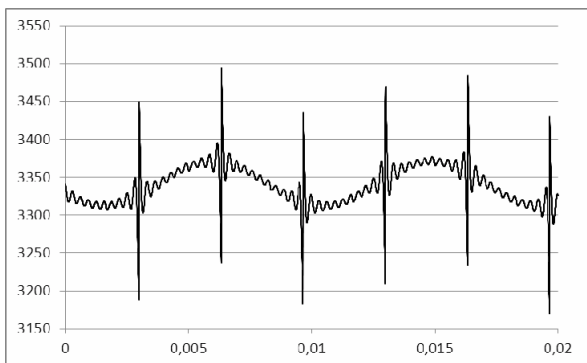


Рис. 17. Напруга 3,3 кВ при 6-пульсовій схемі випрямлення з активним фільтром та ідеальному джерелі живлення 10 кВ

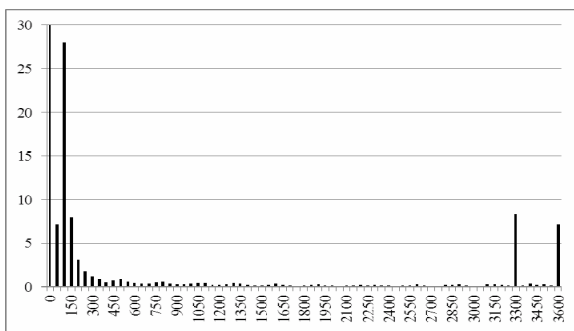


Рис. 18. Гармонійний склад напруги 3,3 кВ

Узагальнені результати моделювання наведені на рисунках 19 – 27.

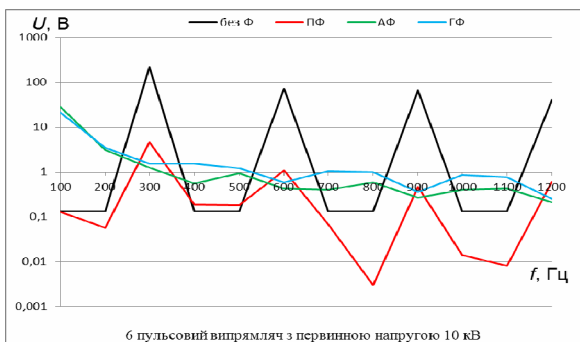


Рис. 19. Спектр випрямленої напруги 3,3 кВ з різними типами фільтрів вищих гармонік

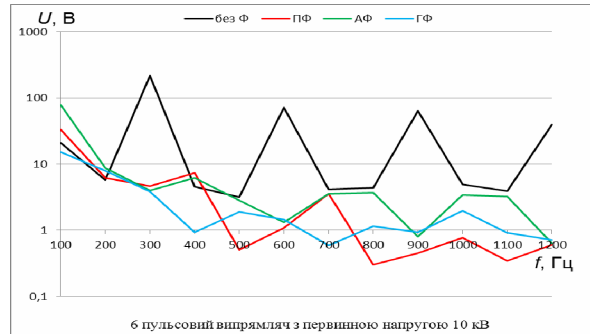


Рис. 20. Спектр випрямленої напруги 3,3 кВ при джерелі живлення, наближеному до реального

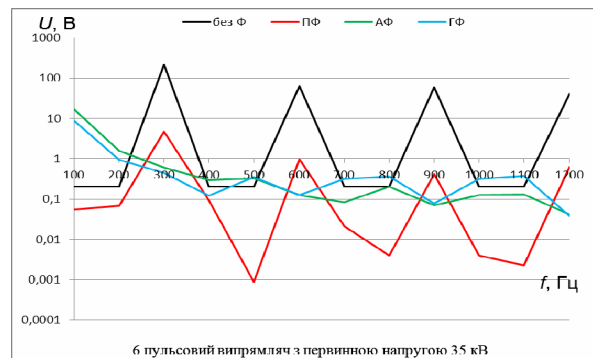


Рис. 21. Спектр випрямленої напруги 3,3 кВ з різними типами фільтрів вищих гармонік

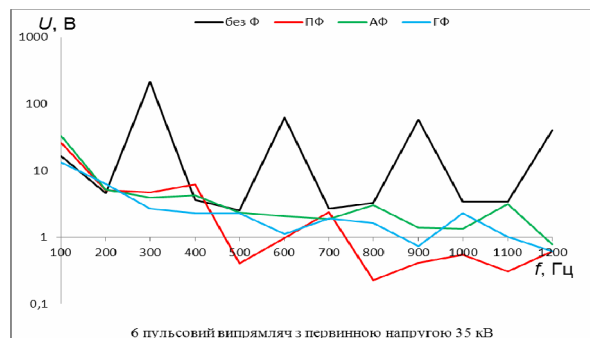


Рис. 22. Спектр випрямленої напруги 3,3 кВ при джерелі живлення, наближеному до реального

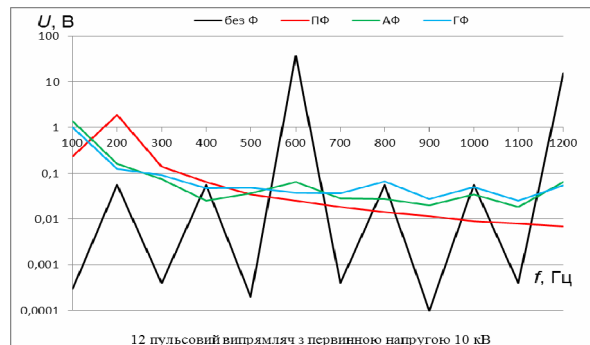
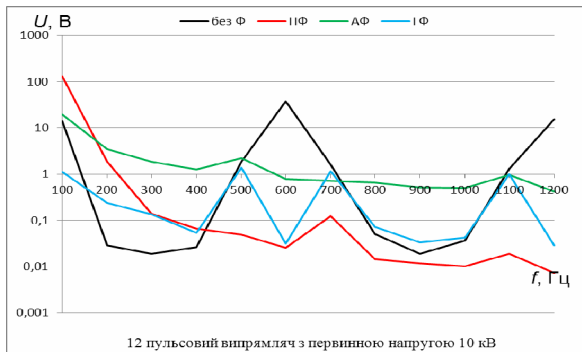


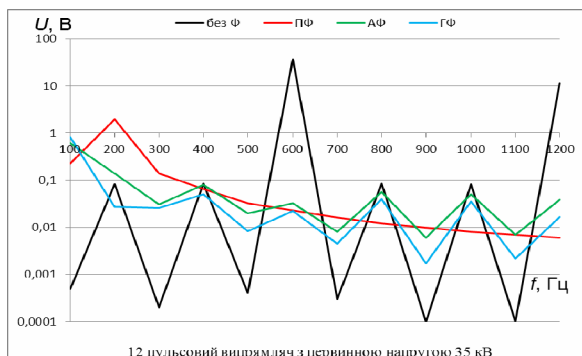
Рис. 23. Спектр випрямленої напруги 3,3 кВ з різними типами фільтрів вищих гармонік

## ВИСНОВКИ

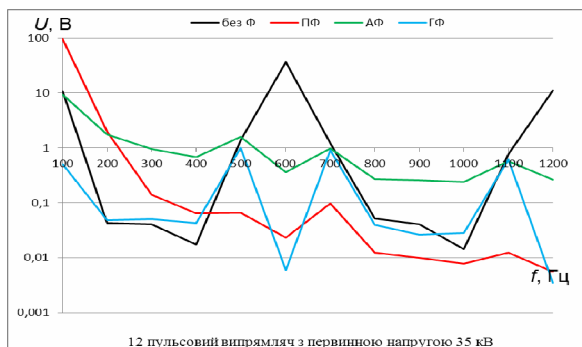
Розроблена модель дозволяє виконувати варіантні дослідження електромагнітних процесів на тяговій підстанції постійного струму різної структури та з різним обладнанням. Адекватність моделі підтверджена результатами експериментальних досліджень.



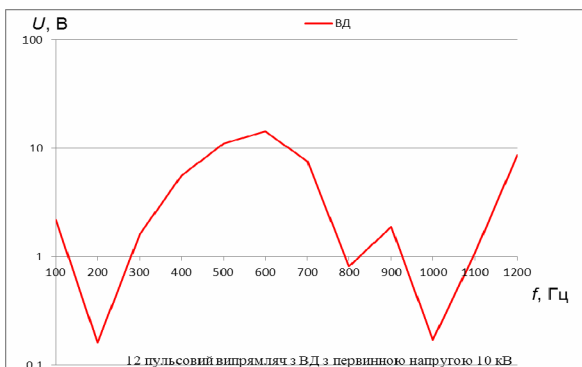
**Рис. 24.** Спектр випрямленої напруги 3,3 кВ з різними типами фільтрів вищих гармонік при джерелі живлення, наближеному до реального



**Рис. 25.** Спектр випрямленої напруги 3,3 кВ з різними типами фільтрів вищих гармонік



**Рис. 26.** Спектр випрямленої напруги 3,3 кВ при джерелі живлення, наближеному до реального



**Рис. 27.** Спектр випрямленої напруги 3,3 кВ при наявності вольтододатка

[1] Марквардт, К.Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог. – М.: Транспорт, 1982. – 528 с.

[2] Булгаков А.А. Новая теория управляемых выпрямителей. – М.: Наука, 1970. – 320с.

[3] Моченов М.Г. Переходные процессы при регулировании напряжения // Тр. ВНИИЖТ вып. 206, «Исследование устройств энергоснабжения электрифицированных железных дорог». – 1961. –с. 4-33.

[4] Сербиненко Д.В., Хлопков М.С. Электромагнитные процессы в тяговой сети и их влияние на показатели качества электрической энергии // Вестник ВНИИЖТ – 2003. № 3. с. 23-34.

[5] Урманов Р.Н. Математическое моделирование тяговых подстанций с мостовыми выпрямителями // Транспорт Урала – 2005 – №1.

[6] Бадер М.П. Электромагнитная совместимость. – М.: УМК МПС, 2002. – 638 с.

[7] Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, Simpowersystems и Simulink. – М.: ДМК-Пресс; СПб.; Питер, 2008. – 288 с.: ил.