

Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

Б. І. Мокін, О. А. Паянок

**РЕГУЛЮВАННЯ СПЕКТРА
НАПРУГИ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ
ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ**

Монографія

Вінниця
ВНТУ
2017

УДК 621.311.1.018

М74

Рецензенти:

В. В. Назаров, доктор технічних наук, професор

М. Й. Бурбело, доктор технічних наук, професор

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 6 від 31 січня 2013 р.)

Мокін, Б. І.

М74 Регулювання спектра напруги тягових підстанцій електротранспорту : монографія / Б. І. Мокін, О. А. Паянок. – Вінниця : ВНТУ, 2017. – 116 с.

ISBN 978-966-641-691-2

В монографії аналізуються відомі підходи та роботи з розробки стаціонарних фільтрів вищих гармонік напруги та автоматичних регуляторів форми кривої напруги електричної мережі, рівнів гармонік напруги на тягових підстанціях електротранспорту міста. Описано розроблені авторами нові закони автоматичної фільтрації вищих гармонік напруги тягової підстанції електротранспорту та синтезовані авторами структури пристроїв автоматичного регулювання спектра напруги тягової підстанції. Книга розрахована на інженерно-технічних працівників трамвайно-тролейбусних управлінь міст України, в електрогосподарствах яких експлуатуються тягові підстанції міського електричного транспорту, студентів та аспірантів електротехнічних і транспортних спеціальностей вищих навчальних закладів.

УДК 621.311.1.018

ISBN 978-966-641-691-2

©Б. Мокін, О. Паянок, 2017

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	5
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ НАУКОВИХ РОЗРОБОК З ФІЛЬТРУВАННЯ ВИЩИХ ГАРМОНІК НАПРУГИ В СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ	9
1.1 Характеристика систем електропостачання міського електротранспорту	9
1.2 Огляд наукових робіт, присвячених розробці стаціонарних фільтрів вищих гармонік напруги електричної мережі	13
1.3. Огляд наукових робіт з розробки автоматичних регуляторів форми кривої напруги електричної мережі.....	20
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ СПЕКТРА НАПРУГИ ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ МІСТА.....	30
2.1 Методика інструментальних досліджень на тягових підстанціях електротранспорту міста	30
2.2 Особливості роботи випрямляча зі схемою випрямлення «дві зворотні зірки з роздільною котушкою»	33
2.3 Дослідження гармонічного складу напруг та струмів на шинах змінного струму тягових підстанцій електротранспорту міста	39
2.4 Дослідження гармонічного складу напруг в контактній мережі постійного струму тягових підстанцій міста	47
2.5 Обробка та узагальнення результатів експерименту	53
РОЗДІЛ 3 СИНТЕЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА СТРУКТУР АВТОМАТИЧНИХ РЕГУЛЯТОРІВ СПЕКТРА НАПРУГИ ТЯГОВОЇ ПІДСТАНЦІЇ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ.....	58
3.1 Синтез математичних моделей законів автоматичного фільтрування вищих гармонік напруги тягової підстанції електротранспорту	58

3.1.1 Математична модель системи автоматичного фільтрування вищих гармонік із використанням реакторів з підмагнічуванням	58
3.1.2 Математична модель системи автоматичного фільтрування вищих гармонік із використанням реакторів з дискретною зміною індуктивності.....	62
3.2 Вибір математичного апарату, придатного для розв'язання задачі синтезу структури автоматичного регулятора спектра напруги тягової підстанції.....	67
3.3 Синтез структур автоматичних регуляторів спектра напруги тягової підстанції.....	70
3.3.1 Синтез структури пристрою для автоматичного регулювання спектра напруги із використанням реакторів з підмагнічуванням постійним струмом	70
3.3.2 Синтез структури пристрою для автоматичного регулювання спектра напруги із використанням реакторів з дискретною зміною індуктивності.....	75
3.4 Рекомендації щодо синтезу структури стаціонарного фільтра гармонік напруги тягової підстанції	85
РОЗДІЛ 4 МІКРОПРОЦЕСОРНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИНТЕЗОВАНИХ СТРУКТУР ТА ОЦІНКА ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК	
4.1 Мікропроцесорна реалізація системи автоматичного фільтрування вищих гармонік в тяговій електромережі.....	89
4.1.1 Мікропроцесорна реалізація автоматичного регулятора спектра напруги із використанням реакторів з підмагнічуванням постійним струмом	89
4.1.2 Мікропроцесорна реалізація автоматичного регулятора спектра напруги із використанням реакторів з дискретною зміною індуктивності.....	93
4.2 Оцінка помилок реалізації заданих функцій розробленими пристроями	96
ЛІТЕРАТУРА	102

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АРСН	автоматичний регулятор спектра напруги
АФ	активний фільтр гармонік
АФГ	автоматичний фільтр гармонік
АЦП	аналогово-цифровий перетворювач
БГР	блок гальванічної розв'язки
ЕОМ	Електронно-обчислювальна машина
СЕП	система електропостачання
ЗНФ	заздалегідь налагоджуваний фільтр
ЗРС	засіб рухомого складу
МЕТ	міський електричний транспорт
ОВ	об'єкт вимірювання
ПН	перетворювач напруги (нормуючий)
ПС	перетворювач струму (нормуючий)
РДД	реактор дискретної дії
СКВ	середнє квадратичне відхилення
ТС	трансформатор струму
ТН	трансформатор напруги
ФАН	фільтр з автоматичним налагодженням
ШП	широко-імпульсний перетворювач
СРУ	мікропроцесор

ВСТУП

Однією з гострих проблем, що стоять сьогодні перед Україною, є питання стабільного енергозабезпечення в умовах економії енергоносіїв.

Впровадження на промислових підприємствах різноманітного роду нелінійних навантажень і, в першу чергу, пристроїв силової електронної перетворювальної техніки [1, 2] обумовлює суттєве погіршення якості електроенергії в електричних мережах. Саме тому проблема якості електричної енергії в системах електропостачання (СЕП) промислових підприємств, міст та сільського господарства набула ще більшої гостроти і продовжує залишатися визначальним фактором в забезпеченні надійності та ефективності електропостачання споживачів.

Пристрої силової електроніки мають суттєві переваги, оскільки сприяють вирішенню економічних проблем, дозволяючи полегшити вирішення енергетичної проблеми при сталих генеруючих потужностях, формують суттєвий внесок в ресурсозбереження.

Але застосування вказаних пристроїв загострює проблему якості електроенергії [3], складовою частиною якої є рівень вищих гармонік [2, 4].

Сучасні промислові підприємства містять навантаження, вольт-або вебер-амперні характеристики яких є нелінійними. Ці навантаження споживають із мережі струм, крива якого є несинусоїдальною, а в деяких випадках і неперіодичною. В результаті виникають нелінійні спотворення кривої напруги мережі або, іншими словами, несинусоїдальні режими, які обумовлюють вищі гармоніки, та є їх джерелами.

Несинусоїдальні режими несприятливо відбиваються на роботі силового електрообладнання, систем релейного захисту, автоматики, телемеханіки та зв'язку. Наявність вищих гармонік в електричних мережах СЕП приводить до низки небажаних явищ, серед яких:

- збільшення додаткових втрат в мережах та елементах електрообладнання;
- зниження експлуатаційного терміну служби електрообладнання;
- збої в роботі електронного обладнання та пристроїв релейного захисту і автоматики;

- погіршення показників технологічних процесів на промислових підприємствах;
- негативний вплив на лінії зв'язку та пристрої автоблокування на залізничних дорогах;
- поява небезпечних рівнів наведених напруг на проводах ліній електропередач тощо [5, 6].

Частково проблема вищих гармонік вирішується шляхом застосування в СЕП трансформаторів, одна з обмоток яких з'єднана в трикутник [7]. Завдяки використанню трансформаторів із схемою з'єднання обмоток Y/Δ або Δ/Y досягається компенсація гармонік, які є кратними трьом ($v = 3, 9, 15\dots$). Проте гармонічний склад напруги в мережі з нелінійним навантаженням може бути досить широким та різноманітним і застосуванням лише самих трансформаторів якість електроенергії вдається покращити недостатньо.

Особливий інтерес викликають гармоніки, частоти яких менші основної частоти пульсацій (неканонічні гармоніки). Пояснюється це тим, що традиційні методи зменшення амплітуд цих гармонік викликають необхідність підвищення потужності фільтруючого обладнання і, як наслідок, погіршення динамічних властивостей нелінійного навантаження [8].

Основними споживачами електроенергії в нашій країні є промисловість, комунальне господарство та транспорт. Досить вагомим споживачем електричної енергії є міський електричний транспорт, підвищення якості електроенергії для якого можна віднести до однієї із першочергових задач.

Однією із основних задач системи електропостачання наземного міського електротранспорту (МЕТ) є перетворення змінного електричного струму в постійний, оскільки міський електричний транспорт є переважно споживачем постійного струму.

Аналізуючи цю особливість більш детально, слід відзначити, що приймачами електричної енергії з нелінійними характеристиками є в першу чергу перетворювальні установки змінного струму в постійний. Саме силове напівпровідникове обладнання такого типу знайшло широке застосування в електрогосподарстві багатьох міст і експлуатується в ньому досить тривалий час. Застосування цих пристроїв в СЕП

електротранспорту загострює проблему якості електроенергії, складовою частиною якої є рівень вищих гармонік. Несинусоїдальні режими, які виникають в електричних мережах при роботі силових перетворювальних агрегатів тягових підстанцій, несприятливо відбиваються на роботі силового електрообладнання, систем релейного захисту, автоматики, телемеханіки та зв'язку.

Вже тривалий час проблема якості електропостачання споживачів, в тому числі і міського електричного транспорту, залишається предметом досліджень великого кола вчених та інженерів. Проте за межами їх уваги виявились питання дослідження впливу на форму кривої напруги змінного струму системи електропостачання гармонік, які виникають на стороні постійного струму внаслідок зміни в часі кількості засобів електротранспорту, під'єднаних до секцій контактної мережі постійного струму. Тому відомі на даний момент підходи та засоби фільтрування вищих гармонік не дозволяють в повній мірі розв'язати проблему забезпечення належної якості електропостачання міського електричного транспорту. Саме тому існує потреба в більш широких дослідженнях цієї проблеми, що, разом із вище перерахованими обставинами, визначає беззаперечну актуальність та необхідність підвищення якості електропостачання тягових підстанцій електрогосподарств багатьох міст шляхом розширення функціональних можливостей пристроїв регулювання рівнів вищих гармонік за рахунок удосконалення їхніх елементів та структур.

В монографії представлені матеріали досліджень, виконаних О. А. Паянком під час роботи над кандидатською дисертацією під науковим керівництвом Б. І. Мокіна.

РОЗДІЛ 1
АНАЛІЗ НАУКОВИХ РОЗРОБОК З ФІЛЬТРУВАННЯ
ВИЩИХ ГАРМОНІК НАПРУГИ В СИСТЕМАХ
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ МІСЬКОГО ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ

1.1 Характеристика систем електропостачання
міського електротранспорту

Система електропостачання міського електричного транспорту створюється для прийому, перетворення і розподілу електричної енергії, яка споживається засобами рухомого складу (ЗРС) [9]. Структурна схема СЕП МЕТ зображена на рис. 1. Джерелом електроенергії є підстанція 4 з номінальною напругою 110/10 кВ, яка живиться по повітряних лініях 3 від районної підстанції 2 з номінальною напругою 330/110 кВ електроенергетичної системи 1. Від підстанції 4 електроенергія кабельними лініями 5 подається на тягову підстанцію 6. На тяговій підстанції відбувається пониження рівня напруги живлення і випрямлення змінного струму, оскільки міський електричний транспорт є споживачем постійного струму.

Засіб електрорухомого складу 9 через рухомий контакт (струмоприймач) з'єднується із контактною мережею 8, а через колеса – з рейковою мережею 10. Контактна мережа з'єднується із додатною шиною тягової підстанції – додатною лінією живлення 7. Рейкова мережа з'єднується із від'ємною шиною підстанції – від'ємною лінією живлення 11.

Робота тягових мереж на відміну від загальнопромислових мереж відрізняються низкою особливостей. По-перше, тягові навантаження змінюються в дуже широких межах: від нуля до максимальних значень. Значення навантажень зумовлене роботою тягових електродвигунів і залежить від режиму руху, профілю шляху, кількості одиниць ЗРС на лінії, від метеорологічних умов. Якщо на ЗРС застосовується рекуперативне гальмування, то струми рекуперації в контактній мережі направлені зустрічно тяговим струмам, тобто струми рекуперації засобу рухомого складу розглядаються як струми генерації.

Окрім навантажень тягових двигунів, необхідно враховувати і навантаження власних потреб ЗРС, які пов'язані з освітленням, живленням апаратури управління, опалюванням, роботою двигунів вентиляторів і компресорів. Навантаження останніх суттєво змінюється в часі.

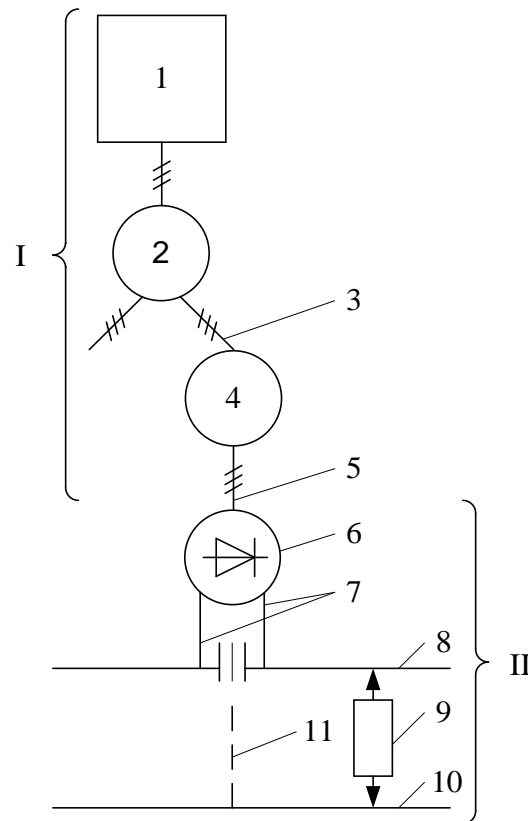


Рисунок 1 – Структурна схема СЕП МЕТ

На характер навантаження одного ЗРС за інших рівних умов впливає довжина перегонів між зупинками. Чим коротшими є перегони, тим більш нерівномірне тягове навантаження (часті пуски і зупинки). Тому навантаження в ЕПС МЕТ відрізняються більшою нерівномірністю, ніж навантаження ЗРС інших видів електричного транспорту (наприклад, магістральних залізниць).

Результуючі навантаження тягової мережі, ліній живлення і тягових підстанцій складаються з навантажень окремих транспортних одиниць і, отже, коливання навантажень останніх позначаються і на сумарних значеннях навантажень. Цей вплив залежатиме від числа ЗРС на лінії. Нерівномірність результуючих навантажень лінії або під-

станції зменшується із збільшенням числа транспортних одиниць на лінії.

Іншою характерною особливістю тягового навантаження ЗРС є безперервне переміщення його вздовж транспортного шляху у різних напрямках з швидкістю, що змінюється.

Характерною особливістю тягових мереж є безперервна зміна напруги на струмоприймачі ЗРС. Оскільки швидкість останнього залежить від підведеної до нього напруги, то регламентується значення мінімально допустимої напруги в тяговій мережі згідно з умовами нормальної роботи ЗРС в режимі тяги і значення максимально допустимої напруги в тяговій мережі – в разі наявності на ділянці засобу рухомого складу в режимі рекуперації [10]. Оскільки передача енергії в СЕП електричного транспорту постійного струму здійснюється при відносно низьких напругах, а самі тягові мережі характеризуються значною протяжністю, то значення допустимих втрат напруги до струмоприймача транспорту в тягових мережах більше, ніж значення допустимих втрат напруги на затискачах приймачів електричної енергії в загальнопромислових мережах (для тяги – $\Delta U_{\text{доп.}} = \pm 10\%$ від $U_{\text{ном.}}$, для загальнопромислових мереж – $\Delta U_{\text{доп.}} = \pm 5\%$ від $U_{\text{ном.}}$) [9].

Тягова мережа рейкового транспорту несиметрична, оскільки контактна мережа є секціонованою, а рейкова – ні. Параметри контактної і рейкової мережі істотно відрізняються. Рейкова мережа шунтується ґрунтом, що викликає протікання частини тягового струму в землю. Крім того, особливістю тягової мережі є її значна розгалуженість.

Перераховані вище особливості тягових навантажень і тягових мереж ускладнюють аналіз режимів роботи і розрахунок СЕП ЗРС, який через вищенаведені особливості не можна проводити як розрахунок СЕП загальнопромислового призначення.

Згідно з ДЕСТ 6962-75 [10] номінальну випрямлену напругу на шинах тягових підстанцій в системі сумісного електропостачання трамвая і тролейбуса прийнято рівною 600 В. Цей же стандарт нормує номінальну напругу на струмоприймачі електрорухомого складу, яка складає для трамвайно-тролейбусних мереж 550 В. На шинах тягових підстанцій з боку випрямленого струму номінальна напруга вища но-

мінімальної напруги тягових мереж на 10 % для покриття втрат в тягових мережах від навантажень електрорухомого складу.

Вказаним стандартом також встановлені максимальні та мінімальні напруги в тяговій мережі, які можуть допускатися в умовах експлуатації. Для трамвайно-тролейбусних мереж найбільша допустима напруга на шинах тягової підстанції та на струмоприймачі ЗРС при будь-яких експлуатаційних умовах становить 700 В; на дільницях із застосуванням рекуперації – 720 В. Найменша допустима напруга на струмоприймачі за будь-яких експлуатаційних умов є не меншою 400 В [11].

Випрямлена напруга на шинах тягової підстанції залежить від значень тягового навантаження. Особливістю тягового навантаження є зміна його в більш широких межах, аніж нетягового. Якщо тягове навантаження рівне нулю, то на вихідних шинах тягової підстанції встановлюється напруга холостого ходу, значення якої змінюється в залежності від загального режиму роботи енергосистеми, зокрема, від навантаження інших тягових підстанцій. При збільшенні тягового навантаження цієї підстанції та незмінній напрузі холостого ходу напруга на шинах зменшується. Від напруги на шинах залежить не лише напруга на струмоприймачі ЗРС, але й розподіл навантажень між тяговими підстанціями, що працюють паралельно (особливо в режимі рекуперації), втрати енергії в тяговій мережі, значення струмів короткого замикання в ній. Нормовані напруги тягових мереж і підстанцій зведені в табл. 1 [9].

Таблиця 1 – Нормовані напруги тягових мереж та підстанцій

Вид транспорту	Напруга, В				
	Тягова підстанція		Тягова мережа		
	$U_{\text{ном.}}$	$U_{\text{хх.}}$	$U_{\text{ном.}}$	$U_{\text{min.}}$	$U_{\text{max.}}$
Сумісне електропостачання трамваїв і тролейбусів	600	630	550	400	700; 720 (при рекуперації)

Характерна риса СЕП МЕТ – наявність нелінійних та нестационарних елементів. Ці елементи зумовлюють появу вищих гармонічних

складових у спектрі струму та напруги, а також несиметрію та невірноваженість струмів та напруг. Несиметрія та невірноваженість фаз в СЕП призводять до перетоків і рекуперації енергії не тільки між окремими елементами системи, але й окремими фазами. У більшості випадків елементи СЕП задовольняють таким припущенням: схеми заміщення елементів містять пасивні чи активні нелінійні та нестационарні елементи з зосередженими параметрами; процеси в елементах системи є детермінованими; використання блоків регулювання та контролю, які можна представляти функціональними моделями [12–17].

Особливості впливу вищих гармонік на основні елементи мережі та електроприводи розглянуто в [18–22].

1.2 Огляд наукових робіт, присвячених розробці стаціонарних фільтрів вищих гармонік напруги електричної мережі

В електричних системах фільтри застосовуються перш за все для того, щоб зменшити амплітуду струмів (напруг) однієї чи декількох фіксованих частот (паралельні фільтри) або для створення значного опору протіканню струму на обраній частоті (последовні фільтри) [23, 24]. Свого часу науковцями було запропоновано велику кількість способів та схемотехнічних рішень, які дозволяють поліпшувати якість електроенергії. Серед існуючих розробок фільтрокомпенсувальних пристроїв слід виділити три основних класи пристроїв: заздалегідь налагоджувані або пасивні фільтри (ЗНФ), фільтри з автоматичним налагодженням (ФАН) та активні фільтри (АФ) [24].

В залежності від кількості фаз ЗНФ в мережі змінного струму розрізняють однофазні та трифазні фільтри вищих гармонік. В підкласі трифазних фільтрокомпенсувальних пристроїв слід розрізняти симетричні, несиметричні та комбіновані трифазні фільтри з використанням різного роду вимикачів. Комбіновані фільтрокомпенсувальні пристрої складаються з декількох поєднаних трифазних конденсаторно-реакторних фільтрів, налагоджених на фільтрування декількох гармонік. Недоліком подібних пристроїв є складне налагодження їх на частоти гармонік. Використання в фільтрах вимикачів дає можливість формувати додаткові частотні характеристики пристроїв та підвищити надійність ЗНФ за рахунок зниження перенапруг при їх увімкненні.

Особливу увагу слід приділяти підкласу ЗНФ, які здійснюють фільтрування гармонік струму нульової послідовності, що виникають в перехідних режимах при коротких замиканнях в мережі змінного струму.

Схеми заздалегідь налагоджених фільтрокомпенсувальних пристроїв є досить розповсюдженими, їх структура не передбачає будь-яких пристроїв регулювання та управління. Цей клас пристроїв в залежності від апаратної реалізації дозволяє здійснювати компенсацію від однієї до чотирьох гармонічних складових різних частот [25, 26].

До класу заздалегідь налагоджуваних фільтрів належить підклас пристроїв, призначених для фільтрування гармонік струму в однофазній мережі. Типовим прикладом такого фільтра є однофазний фільтрокомпенсувальний пристрій для компенсації реактивної потужності [27], який виконує функції фільтра вищих гармонік струму. На рис. 2а, наведено принципову електричну схему цього пристрою, на рис. 2б можливу його модифікацію.

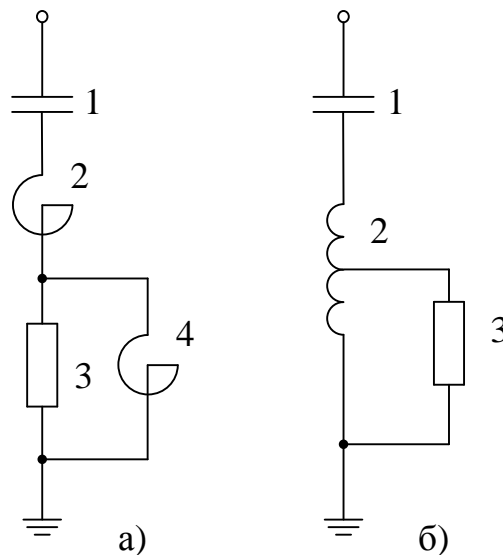


Рисунок 2 – Схема принципова електрична фільтра вищих гармонік:

а – однофазний фільтр вищих гармонік;

б – модифікація схеми фільтра

Пристрій складається з послідовно з'єднаних конденсаторної батареї 1, основного реактора 2, резистора 3 і додаткового реактора 4. Індуктивний опір додаткового реактора на основній гармоніці в 4–10

разів менший від активного опору резистора. Це дає змогу розвантажити резистор з від струму основної частоти, знизивши втрати енергії в резисторі в k^2+1 разів.

В роботі [28] описано фільтр вищих гармонік струму, який призначений для ослаблення всіх гармонік струму у вторинній мережі і однієї гармоніки в первинній мережі. Цей пристрій налагоджений в резонанс на частоту першої та п'ятої гармонік.

Досить розповсюдженими є фільтрокомпенсувальні пристрої, які здійснюють фільтрацію вищих гармонік в трифазній мережі змінного струму. До таких пристроїв належить фільтр гармонік струму [29], принципова електрична схема якого зображена на рис. 3, де 1 – конденсатор, 2 – реактор, 3 – додатковий індуктивний елемент.

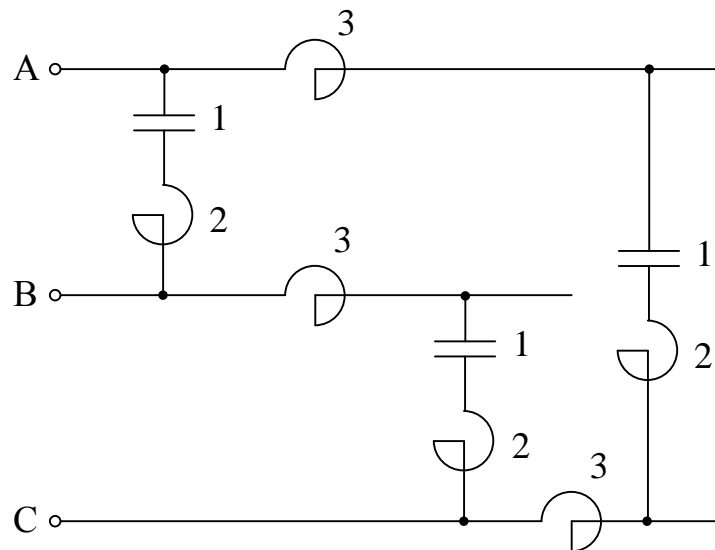


Рисунок 3 – Схема принципова електрична фільтра гармонік струму

Такий фільтр є трифазним дволанковим пристроєм, в якому кожна з фаз виконана з двох паралельно з'єднаних ланок, розділених між собою додатково введеним індуктивним елементом, наприклад, індуктивністю електричної мережі. При цьому перша ланка утворена віткою із послідовно з'єднаних конденсатора і індуктивності, а друга – з двох послідовно з'єднаних кіл двох інших фаз. Ефективність ослаблення гармонік досягається двократним фільтруванням гармонік в електричній мережі за рахунок двох ланок запропонованого фільтра.

Схожим за реалізацією схемотехнічним рішенням є несиметричний двочастотний трифазний фільтр гармонік, описаний в роботі [30]. Недоліком такого технічного рішення є несиметрія фільтра відносно вищих гармонік струму звукового спектра і підвищена чутливість до несиметричного паралельного резонансу із мережею живлення, що знижує надійність роботи фільтра, викликає несиметричні вищі гармоніки струму в мережі живлення та інших навантаженнях.

Ще один трифазний фільтрокомпенсувальний пристрій з досить простою реалізацією описано в роботі [31]. Фільтр має несиметричну структуру, що містить дві однакові трипроменеві «зірки», які складаються з двох конденсаторів та одного реактора. Тому для того, щоб параметри запропонованого фільтра були симетричними на основній частоті, необхідно, щоб створювана його елементами пульсуюча потужність основної гармоніки дорівнювала нулю.

В роботі [32] запропоновано силовий трифазний фільтр, який позбавлений недоліків попередніх схем несиметричних фільтрів. Фільтр не має несиметричних контурів замикання вищих гармонік звукової частоти. Це виключає несиметрію вищих гармонік в мережі, а також несиметричний паралельний резонанс фільтра із мережею живлення, що забезпечує підвищення надійності роботи фільтра і якості електричної енергії в мережі.

В перехідних режимах при коротких замиканнях в мережі змінного струму виникають вільні коливання, які ускладнюють стійку роботу вентилів випрямлячів. Ці коливання звичайно містять значну компоненту нульової послідовності. Принципові електричні схеми пристроїв, які дозволяють здійснювати фільтрування гармонік струму нульової послідовності та струму робочої частоти, наведені в роботі [33].

В роботі [34] описано комбінований трифазний фільтрокомпенсувальний пристрій. При відповідному підборі параметрів конденсаторів і реакторів фільтра пристрій забезпечує фільтрування трьох певних гармонік і всіх вищих гармонік звукового спектру.

В роботі [35] запропоновано модифікацію трифазного фільтрокомпенсувального пристрою, який представляє собою три несиметричних фільтри, увімкнених за схемою взаємного симетрування основ-

ної гармоніки. Наявність в кожному фільтрі додаткової умовно ідеальної демпферної ланки забезпечує шунтування вищих гармонік звукового спектра і зниження струмів можливого паралельного резонансу несиметричних фільтрів із мережею живлення. Пристрій має підвищену чутливість до несиметричного паралельного резонансу з мережею живлення, що знижує надійність його роботи.

В роботі [36] розглянуто принципи функціонування трифазного багатоланкового фільтрокомпенсувального пристрою. Принципова електрична схема цього пристрою зображена на рис. 4.

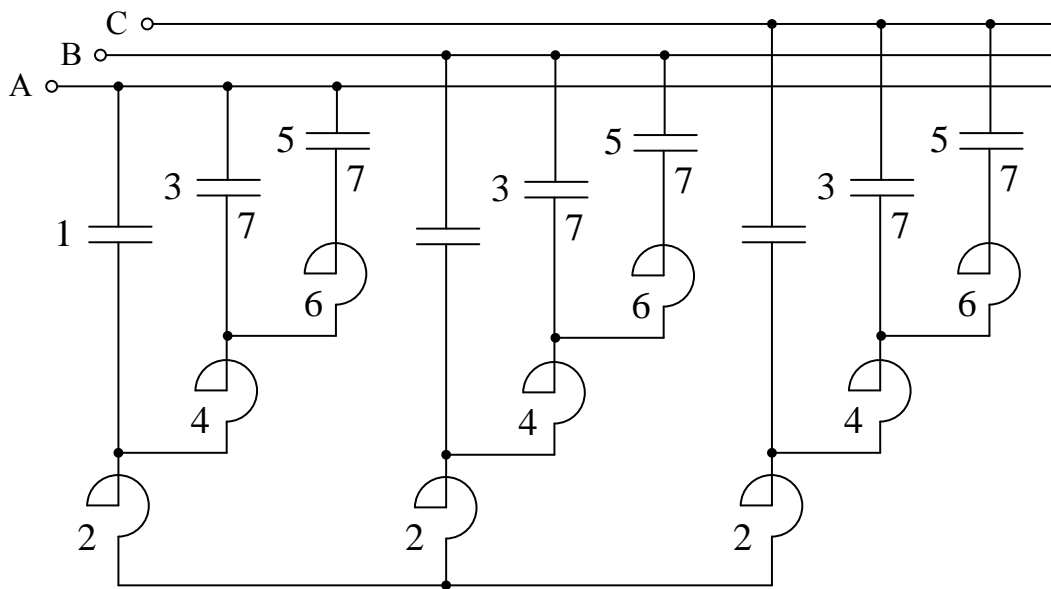


Рисунок 4 – Схема принципова електрична трифазного багатоланкового фільтрокомпенсувального пристрою

Пристрій містить декілька трифазних конденсаторно-реакторних фільтрів, кожен з яких підключений одним виводом до фази мережі, а іншим – до середньої точки попередньої ланки, причому перші ланки усіх трьох фаз з'єднані в зірку.

Струм вищої гармоніки, який фільтрується першим фільтром, проходить через реактор 2. Через цей же реактор 2 проходять струми, які фільтруються другим та третім фільтрами. Струм, який фільтрується третім фільтром, проходить через всі три реактора 6, 4 та 2. Таким чином, струм вищих гармонік, який проходить через реактори 2, рівний сумі струмів трьох гармонік. Струм вищих гармонік, який про-

ходить через реактори 4, рівний сумі струмів двох гармонік. Участь одного реактора (2 і 4) в фільтрації декількох вищих гармонік струму забезпечує зниження сумарної встановленої потужності реакторів. При цьому зменшуються і сумарні втрати електричної енергії в реакторах пристрою в цілому.

Пристрій, який в порівнянні із попереднім схемотехнічним рішенням дозволяє скоротити кількість одиниць реакторно-конденсаторного обладнання фільтрокомпенсувального пристрою, підвищити його ефективність компенсації вищих гармонік струму мережі, підвищити надійність, знизити капітальні та експлуатаційні затрати, описаний в роботі [37].

Опис схожого фільтрокомпенсувального пристрою запропоновано в роботі [38]. В цьому пристрої, який містить чотири групи однотипних взаємозамінних реакторів, забезпечується ефективна фільтрація 11-ої та 13-ої гармонік, що виключає необхідність застосування спеціальних силових фільтрів 13-ої гармоніки, і помітно знижує вимоги до точного налагодження пристрою на фільтрування 11-ої гармоніки. В даному пристрої зменшено ризик виникнення паралельного резонансу струмів між фільтрами вищих гармонік.

Обидва вищезгадані пристрої мають значну встановлену потужність реакторів, що обумовлює в них суттєві втрати електроенергії та зниження ККД. Крім того, ці пристрої є досить затратними та складними, що в свою чергу призводить до зниження надійності їх роботи.

Подібний до вище запропонованих фільтрокомпенсувальний пристрій описано в роботі [39]. Для створення пристрою використано типовий набір технічних засобів.

Використання в схемах фільтрів вимикачів дає можливість формувати такі частотні характеристики, які дозволяють уникнути паралельного резонансу фільтра із мережею. Схема такого пристрою, запропонованого в роботі [40], зображена на рис. 5.

В цьому пристрої при розімкнутих контактах вимикачів 5 і 6 в мережі живлення задіяно лише перший фільтр. При замкнутому положенні контактів вимикачів 5 і 6 має місце верхній рівень генерованої реактивної потужності. Коли задіяно лише вимикач 5 – обидва фільтри працюють незалежно, а у випадку спрацювання тільки вими-

кача 6, частотні характеристики пристрою є аналогічними характеристикам паралельно включеного фільтра вищих гармонік і шунтової батареї конденсаторів. Це дає змогу уникнути паралельного резонансу між фільтрами.

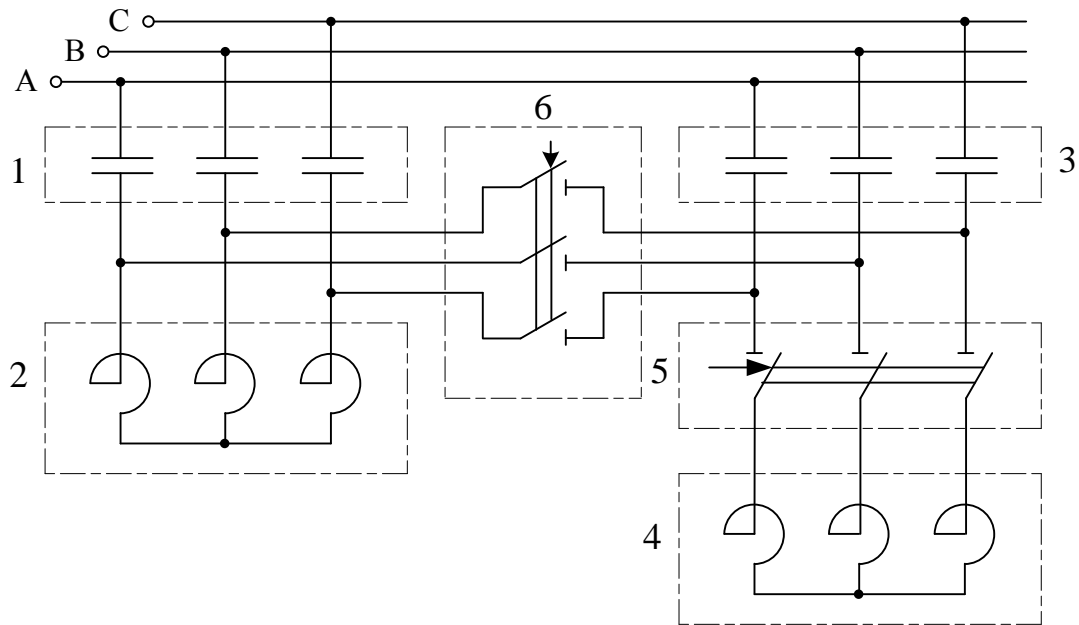


Рис. 5. Схема принципова електрична фільтрокомпенсувального пристрою

Ще одним відомим пристроєм покращення якості електроенергії даного класу є фільтрокомпенсувальний пристрій, запропонований в роботі [41]. Схема запропонованого пристрою містить два трифазних фільтрокомпенсувальних блоки, кожен з яких містить два трифазних конденсаторно-реакторних фільтри. Другий фільтрокомпенсувальний блок приєднаний до мережі живлення через контакти трифазного вимикача.

Трифазні фільтри двох незалежних кіл пристрою з'єднані за неоднаковими комбінованими схемами, в кожній з яких забезпечується використання елементів для фільтрування двох вищих гармонік струму мережі.

Використання в фільтрах вимикачів дозволяє формувати різні модифікації частотних характеристик пристроїв. Проте під час їх ввімкнення виникають перенапруги небезпечного рівня, які можуть призведе-

сти до пошкодження конденсаторно-реакторних елементів та втрати ними працездатності.

Існує спосіб компенсації реактивної потужності і фільтрування вищих гармонік [42], який дає можливість підвищити надійність роботи пристрою шляхом зниження перенапруг при його ввімкненні. Це досягається шляхом почергового замикання вимикачів схеми.

Схожий за задумом спосіб управління фільтрокомпенсувальним пристроєм описаний в роботі [43]. В цьому пристрої з метою підвищення надійності при оперативних перемиканнях одного з фільтрів передбачено певну послідовність ввімкнення та вимкнення комутаційних апаратів.

Використання в схемах пристроїв в якості функціональних елементів вимикачів дозволяє підвищити надійність роботи окремих елементів системи, проте погіршує надійність роботи схеми в цілому.

1.3. Огляд наукових робіт з розробки автоматичних регуляторів форми кривої напруги електричної мережі

Зростання кількості навантажень нелінійного характеру збільшує гармонічні спотворення у всій системі електропостачання. Відповідно засоби компенсації гармонічних складових струму набувають все більшого значення як для виробників та постачальників електричної енергії, так і для її споживачів.

Заходи щодо наближення до синусоїдальної форми кривої напруги та струму мають вибиратися на основі вимірювання коефіцієнта спотворення форми кривої напруги та струму, гармонічних складових напруги та струму та частотних характеристик електромережі системи [44–49].

Існує декілька методів корекції гармонічного складу напруги електричних мереж. До таких методів відноситься і використання пасивних фільтрів. Проте будь-який пасивний фільтр придатний тільки для фільтрації гармоніки тієї частоти, для якої він був спроектований, тому для фільтрації гармонік інших частот потрібні інші індивідуальні фільтри. В разі зміни спектра гармонік в мережі виникатиме необхідність заміни або доповнення існуючих пасивних фільтрів. Саме в та-

ЛІТЕРАТУРА

1. Жежеленко И. В. Качество электрической энергии на промышленных предприятиях / И. В. Жежеленко, М. Л. Рабинович, В. М. Божко. – К. : Техника, 1981. – 160 с.
2. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий / И. В. Жежеленко. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 2000. – 332 с.
3. Основные аспекты проблемы качества электроэнергии в промышленных предприятиях // Эффективность и качество электроснабжения промышленных предприятий : тезисы докл. конф. – Жданов, 1983. – 64 с.
4. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.
5. Курбацкий В. Г. Контроль несинусоидальности напряжения в электрических сетях / В. Г. Курбацкий, Г. Г. Трофимов // Электричество. – 1991. – № 6. – С. 17–21.
6. Шидловский А. Е. Контроль качества электроэнергии и требования к средствам измерения / А. Е. Шидловский, М. П. Гринберг, Ю. С. Железко // Электричество. – 1982. – № 12. – С. 24–27.
7. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – 2-е изд. – Л. : Энергия, 1974. – 840 с.
8. Жежеленко И. В. Интергармоники в системах электроснабжения промпредприятий / А. И. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко // Вестник Приазовского гостехуниверситета. – 1999. – № 8. – С. 68–72.
9. Шевченко В. В. Электроснабжение наземного городского электрического транспорта / В. В. Шевченко, Н. В. Арзамасцев, С. С. Бодрухина. – М. : Транспорт, 1987. – 272 с.
10. ГОСТ 6962-75. Транспорт электрифицированный с питанием от контактной сети. Ряд напряжений. – Взамен ГОСТ 13109-54. – М. : Изд-во стандартов, 1976. – 3 с.
11. Байрыева Л. С. Электрическая тяга: городской наземный транспорт : учебник для техникумов / Л. С. Байрыева, В. В. Шевченко. – М. : Транспорт, 1986. – 206 с.

12. Денисюк С. П. Системи гарантованого електропостачання та питання економії електроенергії / С. П. Денисюк // Семінар «Синапс/НБУ – 2004». – 2004. – С. 1–21.

13. Денисюк С. П. Оптимизация электропотребления для энергосбережения в системах с преобразователями / С. П. Денисюк // Проблемы энергосбережения. – 1989. – № 2. – С. 49–52.

14. Ковалко М. П. Энергозбереження – пріоритетний напрямок державної політики України / М. П. Ковалко, С. П. Денисюк. – К. : Українські енциклопедичні знання, 1998. – 512 с.

15. Баланс энергий в электрических цепях / [В. Е. Тонкаль, А. В. Новосельцев, С. П. Денисюк и др.]. – К. : Наук. думка, 1992. – 312 с.

16. Аполлонский С. М. Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения / С. М. Аполлонский, Д. В. Вилесов, А. А. Воршевский // Электричество. – 1991. – № 4. – С. 1–6.

17. Шидловский А. К. Электромагнитная совместимость электроприёмников промышленных предприятий / А. К. Шидловский, Б. П. Борисов, Г. И. Вагин. – К. : Наук. думка, 1992. – 236 с.

18. Суходоля О. М. Оптимізація енергетичних режимів роботи асинхронних електроприводів механізмів безперервного транспорту : дис. канд. техн. наук : 05.09.03 / О. М. Суходоля ; НТУУ «КПІ». – К. : 1998. – 176 с.

19. Domijan A. A summary and evaluation of recent developments on harmonic mitigation techniques useful to adjustable speed drives / A. Domijan, E. Embriz-Santander // IEEE Transactions on Energy Conservation. – 1992. – V. 7, №1.

20. <http://www.is.svitonline.com/sukhodolya/publicat/naukov/garmoniky.htm>.

21. Пронин М. Активные фильтры высших гармоник. Направления развития [Электронный ресурс] / М. Пронин // Новости электротехники. – 2006. – № 2. – Режим доступа: <http://news.elteh.ru/arh/2006/38/15.php>.

22. Гречко Э. Н. Трехуровневые широтно-импульсные преобразователи / Э. Н. Гречко // Технічна електродинаміка – 2006. – № 5. – С. 33–37.

23. Домнин И. Ф. Перспективы применения полупроводниковых компенсаторов реактивной мощности в сетях электроснабжения про-

мышленных предприятий / И. Ф. Домнин, Г. Г. Жемеров, Е. И. Сокол // Технічна електродинаміка. – 2002. – № 1. – С. 37–42.

24. Стржелецки Р. Компенсация реактивной мощности и высших гармоник тока сети устройствами активной фильтрации в электротехнических системах с нелинейной нагрузкой / Р. Стржелецки, Р. Браницки, М. Гончарова // Технічна електродинаміка. – 1998. – № 5. – С. 11–16.

25. Арриллага Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Арриллага, Д. Бредли, П. Боджер. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.

26. Регулируемые компенсирующие устройства реактивной мощности : справочник / [И. Н. Богаенко, В. Я. Борисенко, Д. И. Розинский, Н. А Рюмшин]. – К. : Техніка, 1992. – 152 с.

27. А. с. 907686 СССР, МКИ Н 02 J 1/02. Фильтр высших гармоник тока / А. М. Берковский, Ж. И. Воронина, В. И. Емельянов, С. С. Клямкин, Ю. С. Крайчик, С. Я. Петров]. – № 2945930/24-07 ; заявл. 26.06.80 ; опубл. 23.02.82. Бюл. № 7.

28. А. с. 1436221 СССР, МКИ Н 02 М 1/12. Устройство для ослабления гармоник тока / Н. Д. Зиновьев, Н. И. Молин. – № 4098588/24-07 ; заявл. 07.08.86 ; опубл. 07.11.88. Бюл. № 41.

29. А. с. 616697 СССР, МКИ Н 02 М 1/12. Фильтр гармоник тока / Н. Д. Зиновьев, Н. И. Молин. – № 2421326/24-07 ; заявл. 19.11.76 ; опубл. 25.07.78. Бюл. № 27.

30. А. с. 1156190 СССР, МКИ Н 02 J 3/18, Н 02 J 3/01. Несимметричный двухчастотный трёхфазный фильтр / А. А. Яценко – № 3443080/24-07 ; заявл. 28.05.82 ; опубл. 15.05.85, Бюл. № 18.

31. А. с. 1350749 СССР, МКИ Н 02 J 3/18. Фильтрокомпенсирующее устройство / В. Г. Кузнецов, Б. П. Борисов. – № 3998325/24-07 ; заявл. 30.12.85 ; опубл. 07.11.87. Бюл. № 41.

32. А. с. 1159105 СССР, МКИ Н 02 J 3/18. Силовой трёхфазный фильтр / А. А. Яценко. – № 3624284/24-07 ; заявл. 15.07.83 ; опубл. 30.05.85. Бюл. № 20.

33. А. с. 505081 СССР, МКИ Н 02 J 1/02, Н 02 М 1/12. Фильтр гармоник тока / Г. А. Славин, А. М. Берковский. – № 1692484/24-07 ; заявл. 09.08.71 ; опубл. 28.02.76. Бюл. №8.

34. А. с. 1220054 СССР, МКИ Н 02 J 3/18. Комбинированное трёхфазное фильтрокомпенсирующее устройство / А. А. Яценко. – № 3629613/24-07 ; заявл. 27.07.83 ; опубл. 23.03.86. Бюл. №11.

35. А. с. 1275640 СССР, МКИ Н 02 J 3/18. Трёхфазное фильтрокомпенсирующее устройство / А. А. Яценко. – № 3862148/24-07с; 3862152/24-07с; заявл. 28.02.85; опубл. 07.12.86. Бюл. №45.

36. А. с. 1206878 СССР, МКИ Н 02 J 3/18. Трёхфазное многозвенное фильтрокомпенсирующее устройство / А. А. Яценко, В. В. Тропин. – № 3627676/24-07 ; заявл. 29.07.83 ; опубл. 23.01.86. Бюл. № 3.

37. А. с. 1050036 СССР, МКИ Н 02 J 3/18. Фильтрокомпенсирующее устройство / В. С. Иванов, А. П. Цаллагов. – № 3461023/24-07 ; 3862152/24-07 ; заявл. 25.06.82; опубл. 23.10.83. Бюл. №39.

38. А. с. 1683123 СССР, МКИ Н 02 J 3/18. Фильтрокомпенсирующее устройство / А. А. Яценко, В. В. Вахнина. – № 4434970/07 ; заявл. 02.06.88 ; опубл. 07.10.91. Бюл. № 37.

39. А. с. 1665455 СССР, МКИ Н 02 J 3/18. Фильтрокомпенсирующее устройство / А. А. Яценко. – № 4434969/07 ; заявл. 02.06.88 ; опубл. 23.07.91, Бюл. № 27.

40. А. с. 1127041 СССР, МКИ Н 02 J 3/18. Фильтрокомпенсирующее устройство / А. А. Яценко, С. И. Егоров. – № 3654713/24-07 ; заявл. 16.08.83 ; опубл. 30.11.84. Бюл. № 44.

41. А. с. 1141508 СССР, МКИ Н 02 J 3/18. Фильтрокомпенсирующее устройство / А. А. Яценко, С. И. Егоров. – № 3654712/24-07 ; заявл. 16.08.83 ; опубл. 23.02.85. Бюл. № 7.

42. А. с. 1610539 СССР, МКИ Н 02 J 3/18. Трёхфазный силовой демпфированный фильтр / А. А. Яценко. – № 4443678/24-07 ; заявл. 17.06.88 ; опубл. 30.11.90. Бюл. № 44.

43. А. с. 1467667 СССР, МКИ Н 02J 3/18. Способ управления фильтрокомпенсирующим устройством / В. И. Бронников, А. А. Грицук, Л. И. Жуков, М. А. Упчер. – № 4166444/24-07 ; заявл. 24.12.86 ; опубл. 23.03.89. Бюл. № 11.

44. Железко Ю. С. Влияние потребителя на качество электроэнергии в сети и технические условия на его присоединение / Ю. С. Железко // Промышленная энергетика. – 1991. – № 8.

45. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов – К. : Наук. думка, 1985. – 268 с.

46. Бортник И. М. Электротехническое оборудование для обеспечения качества электроэнергии / И. М. Бортник // Электротехника. – 1981. – № 3. – С. 6–9.

47. Железко Ю. С. Стратегия снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях / Ю. С. Железко // Электричество. – 1992. – № 5. – С. 6–12.

48. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк. – К : Наук. думка, 1992. – 240 с.

49. Справочник по электроснабжению и электрооборудованию : в 2 т. Т 1. Электроснабжение / Под общ. ред. А. А. Фёдорова. – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 568 с.

50. Шри Карв. Активные фильтры гармоник [Электронный ресурс] / Шри Карв // Энергосбережение. – 2004. – № 4. – Режим доступа: http://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=2561

51. А. с. 498706 СССР, МКИ Н 02J 3/18, Н 02М 1/12. Устройство для регулирования линейного фильтра / Е. М. Берлин, И. С. Скосырёв, Н. И. Иванов, В. Е. Чекмарёв. – № 2028325/24-07 ; заявлено 29.05.74 ; опубл. 28.02.76. Бюл. № 8.

52. А. с. 505118 СССР, МКИ Н 02Р 13/04, Н 02М 1/12. Устройство для регулирования линейного фильтра / Е. М. Берлин, И. С. Скосырёв, Н. И. Иванов, В. Е. Чекмарёв. – № 2028325/24-07 ; заявлено 29.05.74 ; опубл. 28.02.76. Бюл. №8.

53. А. с. 54506 СССР, МКИ Н 02Р 13/04, Н 02М 1/12. Устройство для регулирования линейного фильтра / Е. М. Берлин, И. С. Скосырёв, Н. И. Иванов. – № 2028325/24-07 ; заявлено 05.06.76 ; опубл. 28.02.76. Бюл. № 12.

54. А. с. 618825 СССР, МКИ Н 02М 1/12. Устройство регулирования фильтра / Е. М. Берлин, Н. И. Иванов, В. Е. Чекмарёв. – № 2122574/24-07 ; заявлено 08.04.75 ; опубл. 05.08.78. Бюл. № 29.

55. А. с. 1053218 СССР, МКИ Н 02J 3/18, Н 02J 1/02. Устройство для управления фильтром высших гармоник / Б. И. Мокин, Н. А. Головатюк,

В. Н. Белоус. – № 3467069/24-07 ; заявлено 09.07.82 ; опубл. 07.11.83. Бюл. № 41.

56. Мокин Б. И. Микропроцессорная реализация блока выделения превалирующих гармоник адаптивной системы управления резонансным фильтром / Б. И. Мокин, Н. А. Головатюк, В. Н. Белоус // Изв. Вузов. Энергетика. – 1988. – № 10. – С. 44–48.

57. А. с. 1077006 СССР, МКИ Н 02J 3/18. Способ автоматического регулирования резонансного фильтра / А. И. Дорошенко, В. А. Николенко. – № 3514462/24-07 ; заявл. 25.10.82 ; опубл. 28.02.84. Бюл. № 8.

58. А. с. 1111226 СССР, МКИ Н 02J 1/00. Устройство для определения знака расстройки LC-фильтра / Ю. С. Крайчик, В. Т. Минин. – № 3539749/24-07 ; заявл. 14.01.83 ; опубл. 30.08.84. Бюл. № 32.

59. А. с. 1458926 СССР, МКИ Н 02J 3/18. Способ управления фильтром высших гармоник в системе электроснабжения / В. И. Розенов, А. Н. Кириченко. – № 4174762/24-07 ; заявл. 05.01.87 ; опубл. 15.02.89. Бюл. № 6.

60. А. с. 674148 СССР, МКИ Н 02J 1/02. Устройство для автоматического регулирования LC-фильтра / В. А. Андронов, Ж. И. Воронина, Ю. С. Крайчик, И. Б. Набутовский. – № 1850261/24-07 ; заявл. 22.11.72 ; опубл. 15.07.79. Бюл. № 26.

61. А. с. 1108561 СССР, МКИ Н 02 J 1/02. Устройство для автоматического регулирования LC-фильтра / А. В. Болотов, Г. Г. Трофимов, В. В. Сысоев, В. Я. Экштут. – № 3590113/24-07 ; заявл. 19.05.83 ; опубл. 15.08.84. Бюл. № 30.

62. А. с. 1601690 СССР, МКИ Н 02 J 1/02. Устройство для автоматического регулирования LC-фильтра / И. М. Винер, Г. Г. Трофимов. – № 4631096/24-07 ; заявл. 10.10.88 ; опубл. 23.10.90. Бюл. № 39.

63. А. с. 1713013 СССР, МКИ Н 02 J 1/02. Устройство для автоматического регулирования LC-фильтра / И. М. Винер, Г. Г. Трофимов, Р. Д. Абилов. – № 4734732/07 ; заявл. 07.09.89 ; опубл. 15.02.92. Бюл. № 6.

64. А. с. 1598038 СССР, МКИ Н 02 J 1/02. Устройство для автоматического регулирования LC-фильтра / И. М. Винер, Г. Г. Трофимов. – № 4624737/24-07 ; заявл. 10.10.88 ; опубл. 07.10.90. Бюл. № 37.

65. А. с. 1576975 СССР, МКИ Н 02 J 1/02. Устройство для автоматического регулирования LC-фильтра / Г. Г. Трофимов, И. М. Винер. – № 4412701/24-07 ; заявл. 21.04.88 ; опубл. 07.07.90. Бюл. № 25.

66. А. с. 1543494 СССР, МКИ Н 02 J 1/02. Устройство для автоматического регулирования частоты настройки силового резонансного фильтра / О. Р. Гаршина, В. В. Сысоев, Б. А. Уляшев, С. Н. Кручинин. – № 4374112/24-07 ; заявл. 02.02.88 ; опубл. 15.02.90. Бюл. № 6.

67. А. с. 1403278 СССР, МКИ Н 02 М 1/14. Способ подавления низкочастотных гармоник на выходе выпрямителя / Д. А. Ассуиров, С. В. Петров, А. Г. Кришталь. – № 4130410/24-07 ; заявл. 28.07.86 ; опубл. 15.06.88. Бюл. № 22.

68. А. с. 1415363 СССР, МКИ Н 02 М 1/14. Способ подавления низкочастотных гармоник пульсаций выходного напряжения тиристорного выпрямителя / Я. В. Щербак, Н. Н. Страхов, И. Ф. Домнин. – № 4122758/24-07 ; заявл. 24.09.86 ; опубл. 07.08.88. Бюл. № 29.

69. Пат. 23356 Україна, МКИ Н 02 J 1/02. Спосіб виключення впливу вищих гармонічних складових на мережу живлення / В. М. Назаренко, В. О. Удовенко, заявник і патентовласник В. М. Назаренко. – № 96124849 ; заявл. 24.12.96 ; опубл. 31.08.98. Бюл. № 4.

70. Пат. 54784 Україна, МКИ Н 02 J 3/00. Спосіб перетворення вторинного потоку енергії вищих гармонік і пристрій для його здійснення / Е. А. Бекіров, заявник і патентовласник Е. А. Бекіров. – № 2002042851 ; заявл. 09.04.2002 ; опубл. 17.03.2003. Бюл. № 3.

71. Пат. 54783 Україна, МКИ Н 02 J 3/00. Спосіб перетворення вторинного потоку енергії вищих гармонік і пристрій для його здійснення / Е. А. Бекіров, заявник і патентовласник Е. А. Бекіров. – № 2002042850 ; заявл. 09.04.2002 ; опубл. 17.03.2003. Бюл. № 3.

72. Пат. 49681 Україна, МКИ Н 02 J 3/00. Спосіб перетворення вторинного потоку енергії вищих гармонік і пристрій для його здійснення / Е. А. Бекіров, заявник і патентовласник Е. А. Бекіров. – № 2002021140 ; заявл. 12.02.2002 ; опубл. 16.09.2002. Бюл. № 9.

73. Пат. 49682 Україна, МКИ Н 02 J 3/00. Спосіб перетворення вторинного потоку енергії вищих гармонік і пристрій для його здійснення / Е. А. Бекіров, заявник і патентовласник Е. А. Бекіров. – № 2002021141 ; заявл. 12.02.2002 ; опубл. 16.09.2002. Бюл. № 9.

74. Загайнов Н. А. Тяговые подстанции трамвая и троллейбуса / Н. А. Загайнов, Б. С. Финкельштейн, Л. Л. Кривов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1988. – 328 с.

75. Прохорский А. А. Тяговые и трансформаторные подстанции / А. А. Прохорский. – М. : Транспорт, 1978. – 530 с.

76. Мокін Б. І. Дослідження гармонічного складу напруг та струмів на вході змінного струму тягових підстанцій електротранспорту міста / Б. І. Мокін, О. А. Паянок // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. – Кременчук : КДПУ, 2008. – Вип. 4/2008 (51), ч. 2. – С. 57–61.

77. Паянок О. А. Дослідження гармонічного складу напруг в контактній мережі постійного струму тягових підстанцій міста / О. А. Паянок // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2008. – № 1. – С. 84–89.

78. Засорин С. Н. Электронная и преобразовательная техника : учебник для вузов железнодорожного транспорта / С. Н. Засорин, В. А. Мицкевич, К. Г. Кучма. – М. : Транспорт, 1981. – 319 с.

79. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 1984. – 160 с.

80. Трофимов Г. Г. Определение и оценка погрешностей приборов для измерения высших гармоник в электрических сетях / Г. Г. Трофимов, Ю. Е. Решетов // Изв. Вузов. Энергетика. – 1980. – № 5.

81. Криксунов В. Г. Спектральний аналіз електричних сигналів / В. Г. Криксунов. – К. : Техніка, 1971. – 196 с.

82. Трофимов Г. Г. Гармонический анализ графоаналитическими методами и их погрешности в расчётах электрических сетей / Г. Г. Трофимов, Б. А. Ульяшев, И. Я. Фишер // Вопросы снижения потерь и повышения качества электроэнергии в электрических сетях энергосистем : сб. науч. тр. – Алма-Ата, 1981.

83. А. с. 1219978 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Амплитудно-фазовый анализатор периодических напряжений / В. П. Будейкин, Ю. К. Рыбин. – № 3671603/24-21 ; заявл.05.12.83 ; опубл.23.03.86. Бюл. № 11.

84. А. с. 1396081 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Амплитудно-фазовый анализатор гармоник периодических напряжений / В. П. Будейкин,

Ю. К. Рыбин. – № 4075015/24-21 ; заявл. 03.06.86 ; опубл.15.05.88. Бюл. № 18.

85. А. с. 978064 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Анализатор амплитуды и фазы гармоник периодических напряжений / Л. Е. Быкова, С. С. Кузнецкий. – № 2796234/18-21 ; заявл. 17.07.79 ; опубл.30.11.82. Бюл. № 44.

86. А. с. 1352393 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Анализатор гармоник электрической сети / А. М. Енин, В. Е. Сфремов. – № 3971504/24-21 ; заявл.18.07.85 ; опубл.15.11.87. Бюл. № 42.

87. А. с. 636555 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Анализатор спектра электрических напряжений / Ф. В. Чегодаев, Р. А. Ахмеджанов. – № 2341912/18-21 ; заявл. 05.04.76 ; опубл.05.12.78. Бюл. №45.

88. А. с. 1629869 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Анализатор гармоник / В. И. Розенов , Ю. М Хворых. – № 4453278/21 ; заявлено 03.06.88 ; опубл. 23.02.91. Бюл. № 7.

89. А. с. 1444677 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Анализатор гармоник / В. И. Розенов, Ю. М Хворых. – № 4204132/24-21 ; заявл. 09.01.87 ; опубл. 15.12.88. Бюл. № 46.

90. А. с. 995009 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Анализатор спектра / В. В. Молоток, Б. П. Разживин. – № 2629522/18-21 ; заявл. 19.06.78 ; опубл. 07.02.83. Бюл. № 5.

91. А. с. 512434 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Амплитудно-фазовый анализатор периодических напряжений / А. А. Кирдякин, Н. В. Лисецкий. – № 2005641/26-21 ; заявл.19.03.74 ; опубл. 30.04.76. Бюл. №16.

92. А. с. 734581 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Анализатор спектра / О. Л. Карасинский. – № 25443441/18-21 ; заявл. 21.11.77 ; опубл. 15.05.80. Бюл. № 18.

93. А. с. 1226328 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Параллельный анализатор спектра / Ю. С. Важнов, М. К. Веневцев, И. К. Пелешук. – № 3796167/24-21 ; заявл. 02.10.84 ; опубл. 23.04.86. Бюл. № 15.

94. А. с. 1257548 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Способ определения амплитуды и частоты гармонических составляющих сигнала / Б. И. Егурнов. – № 3710531/24-21 ; заявл. 06.03.84 ; опубл. 15.09.86. Бюл. № 34.

95. А. с. 838608 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Анализатор спектра параллельного действия / А. В. Дементьев, Н. Н. Синегубов,

В. И. Трухов. – № 2820460/18-21 ; заявл. 06.09.79 ; опубл. 15.06.81. Бюл. № 22.

96. А. с. 1396080 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Способ гармонического анализа электрического сигнала и устройство для его осуществления / С. Ю. Кудараускас, А. А. Бразайтис, Ю. И. Куксас, Г. Н. Глазко. – № 3927540/24-21 ; заявл. 05.07.85 ; опубл. 15.05.88. Бюл. № 18.

97. А. с. 924605 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Анализатор частотного спектра / Н. Ф. Воллернер, А. Н. Форда, О. Т. Чигирин, Ю. Т. Чигирин. – № 2989477/18-21 ; заявл. 08.10.80 ; опубл. 30.04.82. Бюл. № 16.

98. А. с. 924607 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Устройство для следящего спектрального анализа / В. А. Анисимов, В. В. Губарев. – № 2998928/18-24 ; заявл. 29.10.80 ; опубл. 30.04.82. Бюл. № 16.

99. А. с. 1246018 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Анализатор частотного спектра / Н. Ф. Воллернер, А. Н. Форда, О. Т. Чигирин, Ю. Т. Чигирин. – № 3343007/24-21 ; заявл. 02.10.81 ; опубл. 23.07.86. Бюл. № 27.

100. А. с. 900209 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Анализатор частотного спектра / М. М. Таран. – № 2930692/18-21 ; заявл. 30.05.80 ; опубл. 23.01.82. Бюл. № 3.

101. А. с. 1303950 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Амплитудно-фазовый анализатор гармоник периодических напряжений / В. А. Мечников. – № 3967781/24-21 ; заявл. 21.10.85 ; опубл. 15.04.87. Бюл. № 14.

102. А. с. 1237987 СССР, МКИ G 01 R 23/16. Анализатор спектра / В. В. Брайко, И. П. Гринберг. – № 3772210/24-21 ; заявл. 16.07.84 ; опубл. 15.06.86. Бюл. № 22.

103. Fluke 1735 Three-Phase Power Quality Logger [Electronic resource]. – 2013. – № 1, Vol. 1. – Access mode: <http://www.testequipmentdepot.com/fluke/powermeter/1735.htm> / (last access: 12.03.13). – Title from the screen.

104. Fluke 1736/B Portable 3-Phase Power Logger, Basic Version, Excludes Current Probes [Electronic resource]. – 2013. – № 2, Vol. 1. – Access mode: <http://www.testequipmentdepot.com/fluke/power-quality/three-phase-loggers/3-phase-energy-logger-fluke-1736-b.htm> / (last access: 13.03.13). – Title from the screen.

105. Трехвыводные стабилизаторы напряжения [Электронный ресурс]. – 2013. – Режим доступа: <http://www.ruselectronic.com/news/stabilizatory-naprjazhjenija> (дата звернення: 22.01.2013). – Назва з екрана.

106. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – Взамен ГОСТ 13109-67. – М. : Изд-во стандартов, 1997. – 80 с.

107. Oscilloscopes [Electronic resource]. – 2013. Access mode: <http://www.tek.com/oscilloscope/> (last access: 24.02.13). – Title from the screen.

108. TBS1000 Series Digital Oscilloscope [Electronic resource]. – 2013. Access mode: <http://www.tek.com/oscilloscope/tbs1000-digital-storage-oscilloscope/> (last access: 24.02.13). – Title from the screen.

109. Шевченко В. В. Электрическая тяга: городской наземный транспорт : учебник для техникумов / В. В. Шевченко. – М. : Транспорт, 1990. – 212 с.

110. Тимофеев Д. В. Режимы в электрических системах с тяговыми нагрузками / Д. В. Тимофеев. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1972. – 296 с.

111. Сердюк Т. Н. Электромагнитная совместимость системы тягового электроснабжения с рельсовыми цепями / Т. Н. Сердюк, В. И. Гаврилюк // Залізничний транспорт України : спец. вип. – 2005. – № 3/2. – С. 176–180.

112. Минин Г. П. Несинусоидальные токи и их измерение / Г. П. Минин. – М. : Энергия, 1979. – 112 с.

113. Избранные вопросы несинусоидальных режимов в электрических сетях предприятий / И. В. Жежеленко, Ю. Л. Саенко, Т. К. Бараненко [и др.] ; под. ред. И. В. Жежеленко. – М. : Энергоатомиздат, 2007. – 294 с.

114. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. – 5-е изд., перераб. и доп. / И. В. Жежеленко – М. : Энергоатомиздат, 2004. – 360 с.

115. Мокин Б. И. Автоматические регуляторы в электрических сетях / Б. И. Мокин, Ю.Ф. Выговский. – К. : Техніка, 1985. – 104 с.

116. Валеев Г. С. Четырехстержневой дугогасящий реактор с подмагничиванием / Г. С. Валеев, О. А. Петров, Е. Д. Панова // Электрические станции. – 1983. – № 3. – С. 50–52.

117. Дорожко Л. И. Сравнительный анализ различных конструкций управляемых реакторов / Л. И. Дорожко, Л. В. Лейтес // Электротехника. – 1991. – № 2. – С. 18–24.

118. Управляемые подмагничиванием дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю для сетей 6–35 кВ / А. М. Брянцев, А. И. Лурье, А. Г. Долгополов [и др.] // Электричество. – 2000. – № 7. – С. 59–68.

119. Бродовой Е. Н. Управляемые дугогасящие реакторы для электрических сетей 6–35 кВ / Е. Н. Бродовой, А. М. Брянцев, Н. Д. Дарвин // Электротехника. – 1995. – № 4. – С. 37–38.

120. Бродовой Е. Н. Перспективы применения магнито-вентильных управляемых реакторов в энергетических системах / Е. Н. Бродовой, А. М. Брянцев, В. В. Ильиничнин // Электротехника. – 1991. – № 2. – С. 2–4.

121. Едокунин Г. А. Анализ внутренних перенапряжений в сетях 6–10 кВ и обоснование необходимости перевода сетей в режим с резистивным заземлением нейтрали / Г. А. Едокунин, Г. Д. Кадзов, С. С. Титенков // Труды ОАО «НИИ Электрокерамика». – СПб. : НИИ Электрокерамика, 2001. – С. 77–83.

122. А. с. 989597. СССР, МКИ Н 01 F 29/14. Электрический реактор с подмагничиванием / А. М. Брянцев. – № 3325229/24-07 ; заявл. 30.07.81 ; опубл. 15.01.83. Бюл. № 2.

123. Обабков В. К. Многокритериальность показателя эффективности функционирования сетей 6–35 кВ и проблема оптимизации режимов заземления нейтрали / В. К. Обабков // Режимы заземления нейтрали сетей 3–6–10–35 кВ : доклады научно-технической конференции. – Новосибирск, 2000. – С. 33–41.

124. Иванов В. Н. Проектирование аналоговых систем на специализированных БИС / В. Н. Иванов, В. В. Иванов. – Л.: Румб, 1988. – 139 с.

125. Тетельбаум И. М. Практика аналогового моделирования динамических систем : справочное пособие / И. М. Тетельбаум, Ю. Р. Шнейдер. – М. : Энергоатомиздат, 1987. – 384 с.

126. Захаров В. Н. Системы управления. Задание. Проектирование. Реализация. / В. Н. Захаров, Д. А. Поспелов, В. Е. Хазацкий. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергия, 1977. – 424 с.
127. Захаров В. Н. Автоматы с распределенной памятью / В. Н. Захаров. – М. : Энергия, 1975. – 136 с.
128. Паянок О. А. Математична модель закону керування фільтром вищих гармонік / Б. І. Мокін, В. В. Грабко, О. А. Паянок // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2006. – Вип. 3/2006 (38), ч. 2. – С. 115–116.
129. Цифровые и аналоговые интегральные микросхемы : справочник / С. В. Якубовский, Л. И. Ниссельсон, В. И. Кулешова [и др.] ; под ред. С. В. Якубовского. – М. : Радио и связь, 1990. – 496 с.
130. Электронные схемы на операционных усилителях : справочник / В. И. Щербаков, Т. И. Грездов. – К. : Техника, 1983. – 213 с.
131. Микропроцессорные автоматические системы регулирования. Основы теории и элементы / В. Г. Коньков, В. А. Суханов, О. В. Шевяков ; под ред. В. В. Солодовникова. – М. : Высшая шк., 1991. – 256 с.
132. Сташин В. В. Проектирование цифровых устройств на однокристалльных микроконтроллерах / В. В. Сташин, А. В. Урусов, О. Ф. Мологонцева. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 224 с.
133. Франке К. Введение в микро-ЭВМ / К. Франке. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.
134. Проектирование микропроцессорной электронно-вычислительной аппаратуры : справочник / В. Г. Артюхов, А. А. Будняк, В. Ю. Лапий [и др.]. – К. : Техника, 1988. – 263 с.
135. Однокристалльные микро-ЭВМ. Семейство МК48. Семейство МК51. / Г. П. Липовецкий, Г. В. Литвинский, О. Н. Оксинь [и др.]. – М. : Бином, 1992. – 344 с.
136. Гребнев В. В. Однокристалльные микро-ЭВМ семейства AT89 фирмы Atmel / В. В. Гребнев. – СПб. : ЭФО, 1998. – 76 с.
137. К вопросу о погрешностях измерительных трансформаторов тока / В. А. Любинова, Г. А. Вендерович // Современные проблемы преобразовательной техники. – К. : Наукова думка, 1980. – С. 91–94.

138. Чумаченко І. В. Мікроконтролерні прилади: структура і використання : навчальний посібник / І. В. Чумаченко, М. Д. Кошовий, В. В. Лопатин. – Харків : Нац. аерокосмічний ун-т «ХАІ», 2001. – 277 с.
139. Федорков Б. Г. Микросхемы ЦАП и АЦП: функционирование, параметры, применение / Б. Г. Федорков, В. А. Телец. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
140. Resource control device for the group of switching apparatuses / [Mokin B. I., Grabko V. V., Mokin O. B., Grabko V. V.] – The international exhibition of invention research and technological transfer “INVENTICA – 2002” (Official catalog). – IASI, Romania. – 2002. – P. 37.
141. Дунаев Б. Б. Точность измерений при контроле качества / Б. Б. Дунаев. – К. : Техніка, 1981. – 152 с.
142. Волковец А. И. Теория вероятностей и математическая статистика / А. И. Волковец, А. Б. Гуринович. – Мн. : БГУИР, 2003. – 68 с.
143. Основи метрології та вимірювальної техніки : у 2 т. / [М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник та ін.] ; за ред. Б. Стадника. – Львів. : Видавництво Національного університету «Львівська політехніка», 2005. – Т. 1 : Основи метрології, 2005. – 530 с.
144. Новицкий П. В. Оценка погрешностей результатов измерений / П. В. Новицкий, И. А. Зограф. – 2-е изд. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1991. – 304 с.

Наукове видання

**Мокін Борис Іванович
Паянок Олександр Анатолійович**

**РЕГУЛЮВАННЯ СПЕКТРА НАПРУГИ
ТЯГОВИХ ПІДСТАНЦІЙ ЕЛЕКТРОТРАНСПОРТУ**

Монографія

Редактор С. Малішевська
Оригінал-макет – О. Паянок

Підписано до друку 11.05.2017 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. др. арк. 6,7.
Наклад 300 (1-й запуск 1–75) пр. Зам № 2017-062.

Видавець та виготовлювач –
Вінницький національний технічний університет,
ІРВЦ ВНТУ,
21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95,
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Тел. (0432) 59-85-32.
press.vntu.edu.ua; email: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.