

РОЗДІЛ «ЕЛЕКТРОТЕХНІКА. ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА»

УДК 621.314.2:629:423.1-523.1

МУХА А.М., к.т.н., доцент

Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В.Лазаряна

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРИЧНИХ РЯДІВ СТРУКТУР СТАТИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ТЯГОВОГО ПРИВОДА БАГАТОСИСТЕМНИХ ЕЛЕКТРОВОЗІВ

Вступ. З метою підвищення конкурентоспроможності залізниць у порівнянні з іншими видами транспорту потрібно підвищувати прискорення і швидкості потягів, для чого необхідно підвищувати потужність електровозів з одночасним зменшенням його маси, оскільки більш потужне обладнання має більшу масу та габарити, що призведе до збільшення впливу на колію.

Особливо гостро стоїть вирішення цієї суперечної задачі для електровозів подвійного живлення, оскільки вони мають у своєму складі обладнання як для постійного, так і змінного струмів. Такі електровози доцільно будувати для залізниць України з метою ліквідації втрат часу при заміні електровозів у місцях стикування контактних мереж постійного струму напругою 3 кВ з мережею змінного струму на 25 кВ, а також зменшення експлуатаційних витрат.

Крім того, підвищення потужності електровозів постійного струму обмежено напругою контактної мережі в 3 кВ. Загальновідомий той факт, що підвищення напруги у контактній мережі постійного струму до рівня 6, 12 або 24 кВ дозволить підвищити пропускну спроможність та підвищити ефективність електричної тяги постійного струму [1].

Таким чином, є доцільним будувати багатосистемний електрорухомий склад (ЕРС). Під багатосистемним мається на увазі ЕРС, який зможе працювати як на постійному, так і змінному струмах при різних рівнях напруги у контактній мережі. Основою тягового привода таких електровозів є статичні перетворювачі, побудовані з використанням сучасної елементної бази.

Вихідними даними для аналізу властивостей статичних перетворювачів тягового привода перспективних багатосистемних електровозів приймаємо:

- 1) напруга у контактній мережі постійного струму 3 кВ та підвищена до рівня 6, 12 або 24 кВ;
- 2) напруга у контактній мережі змінного струму 25 кВ частотою 50 Гц;
- 3) кількість тягових двигунів 4 або 6, що відповідає односекційному електровозу;
- 4) тягові електродвигуни (ТЕД): трифазний асинхронний (АТД) або постійного (пульсуючого) струму послідовного збудження (ТД ПС).

Представлені вихідні дані зумовлюють можливість побудови перетворювачів за різними структурами, і визначення оптимальної із них є досить складною науково-практичною проблемою.

Така проблема досить успішно вирішується у інших галузях техніки за умови уніфікації складових частин перетворювачів [2].

Постановка задачі. Провести порівняння різних структур перетворювачів призначених для тягового привода багатосистемних електровозів, за умов мінімізації витрат на їх створення та експлуатацію, тобто використовуючи так звану цільову функцію C_N [2].

Результати роботи. При традиційних підходах у проектуванні, коли частота змінного струму приймається сталою і рівною 50 Гц, з підвищенням потужності підви-

щується маса локомотива. Маса тягового електропривода багатосистемних електро-
зів – це в основному маса тягових двигунів, трансформатора та напівпровідникових пе-
ретворювачів.

Сучасні тенденції у проектуванні локомотивів з переходом від колекторних ма-
шин постійного струму до асинхронних дозволяє зменшити масу тягових двигунів бі-
льше, ніж у два рази при однакових потужностях, що суттєво з урахуванням того, що,
наприклад, маса тягового двигуна ЭД141У1 дорівнює 4,75 т. Суттєве зменшення маси
тягового трансформатора можна досягнути за рахунок збільшення частоти струму.

Автором в роботах [3, 4] пропонується створювати статичні перетворювачі тяго-
вого привода з використанням трансформаторів підвищеної частоти та модульного
принципу будови перетворювача. В залежності від структури перетворювача тягового
привода багатосистемних електрозів пропонується наступна їх класифікація, яка вра-
ховує:

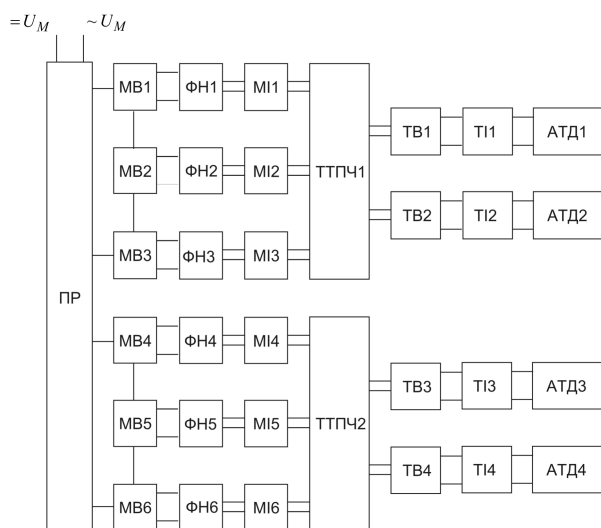
1) кількість та вид тягового двигуна: 4А – чотири асинхронних тягових двигуна
(АТД); 6А – шість АТД; 4Т – чотири двигуна постійного струму (ТДПС); 6Т – шість
ТДПС;

2) тип силового модуля: М1, М2, М3, М4, М5 або М6 (силовий модуль – складо-
ва частина тягового статичного перетворювача, яка за потужністю відповідає певній кі-
лькості тягових двигунів);

3) тип трансформатора підвищеної частоти: 1Ф – однофазний; 3Ф – трифазний;

4) схему з'єднання вхідних випрямлячів мережевого контура за формулою
 $m \times a$, де m – кількість паралельних груп послідовно з'єднаних мережевих випрямля-
чів; a – кількість послідовно з'єднаних мережевих випрямлячів.

Наприклад, тяговий статичний перетворювач для живлення чотирьох асинхрон-
них тягових двигунів, побудований з силових модулів типу М2 (тобто два тягових дви-
гуна на один силовий модуль) з використанням трифазних трансформаторів підвищеної
частоти, в складі якого використовуються шість мережевих випрямлячів, буде класифі-
ковано як 4А-М2-3Ф-2м3а (рис. 1).



ПР – перемикач режимів (25 кВ 50 Гц або 3 (6, 12 або 24) кВ постійного струму);
МВ – випрямляч мережевого контуру; ФН – фільтр накопичувач; МІ – інвертор мере-
жевого контуру; ТТПЧ – трифазний трансформатор підвищеної частоти; ТВ – випрям-
ляч тягового контуру; ТІ – тяговий інвертор; АТД – асинхронний тяговий двигун

Рисунок 1 – Структура тягового перетворювача типу 4А-М2-3Ф-2м3а

Перетворювач, структурна схема якого представлена на рис.1 дозволяє реалізувати два основних напрямки покращення якості електричної енергії, що споживається.

- використання багатофазних перетворювачів, що працюють зі зсувом по фазі;
- використання при перетворенні електричної енергії підвищеної частоти.

Використання багатофазних систем з ланкою підвищеної частоти дозволяє зменшити масогабаритні показники фільтрів та трансформатора. Крім того, в подібних багатофазних системах є можливість керувати струмами та напругами, які перевищують максимально допустимі параметри одиночних силових елементів перетворювача.

Загалом автором проаналізовано 58 перетворювальних структур, які використовують ланки підвищеної частоти. Обрати оптимальну структуру за умов мінімізації витрат на її створення та експлуатацію є можливим використовуючи так звану цільову функцію C_N [4].

Нехай на множині X перетворювальних структур з різним класом вентилів задана функція попиту $\varphi(\lambda)$ на кожен тип $\lambda \in X$. Функція попиту чисельно дорівнює кількості пристроїв певного типу у загальному об'ємі пристроїв перетворювальних структур.

Попит у пристроях повинен бути задоволений з допомогою деякої сукупності параметричних рядів пристроїв. Ці пристрої мають наступні N значень головного параметра: U_1, U_2, \dots, U_N .

Позначимо параметричний ряд $U^N = (U_1, U_2, \dots, U_K, \dots, U_N)$, де N – кількість типів пристроїв у ряді, який досліджується; U_K – значення головного параметру K -го пристрою.

Значення U_K , $K = 1, 2, \dots, N$ обираємо з деякої множини можливих значень головного параметра. В якості головного параметра пропонується прийняти клас приладів, оскільки саме клас приладу визначає можливість роботи вентиля при тій або іншій напрузі на вході перетворювача.

Значення N , яке дорівнює п'яти (за кількістю можливих значень напруг контактної мережі), приймаємо в якості обмеження цільової функції C , яку розглядаємо як математичну модель оптимізації параметричних рядів пристроїв.

Цільова функція визначається в цілому за життєвий цикл заходу, який називається розрахунковим періодом. В якості початкового року розрахункового періоду приймаємо рік введення параметричного ряду в експлуатацію. Кінцевий рік розрахункового періоду визначається моментом завершення життєвого циклу заходу. Вираз для цільової функції запишемо наступним чином:

$$C(U^N) = \sum_{U \in U^N} Z^0(U) + \sum_{\lambda \in X} \varphi(\lambda) \min_{U \in U^N} Z(U, \lambda) (1 + E_H)^{t_p - t},$$

де $Z^0(U)$ – постійні витрати на пристрій одного типу, які не залежать від їх кількості в експлуатації (витрати на розробку, підготовку виробництва). Тобто $Z^0(U)$ – вартість виробництва одного екземпляра пристрою даного типу (капітальні витрати);

$\sum_{U \in U^N} Z^0(U)$ – вартість виробництва усіх типів пристроїв даного виду;

$Z(U, \lambda)$ – витрати на задоволення потреб у пристрої з головним параметром λ з

допомогою пристрою з головним параметром U , який відноситься до параметричного ряду пристроїв. Тобто, $Z(U, \lambda)$ – це поточні (експлуатаційні) витрати;

E_H – норматив приведення різночасових витрат до розрахункового року, $E_H = 0,1$;

t_p – порядковий номер розрахункового періоду;

t – порядковий номер t -го року експлуатації параметричного ряду пристроїв, починаючи від початкового розрахункового періоду. У нашому випадку розрахунковий і початковий роки збігаються. Тому $t_p = 1$. Відомо, що приведення витрат до початку розрахункового року здійснюється діленням витрат на коефіцієнт приведення, що у нашому випадку забезпечується від'ємним значенням різниці $(t_p - t)$, так як $t \geq t_p = 1$;

t_c – термін служби пристрою у роках (прийнято 10 років).

Задача оптимізації параметричного ряду полягає у мінімізації цільової функції за час розрахункового періоду. Цю задачу сформулюємо наступним чином: задано деяке число N_0 ; потрібно знайти члени ряду U_K , $K = 1, 2, \dots, N$ із умови:

$$U_N = \min U(U^N), \quad 0 < N \leq N_0$$

Враховуючі значення функції затрат $Z^\circ(U)$ параметричні ряди, наприклад, для перетворювальної структури 4Т(А)-М1-3Ф-12М1а потужністю 3000 кВт, запишуться:

$U_1^N = 30$	$\varphi(\lambda) = 0,3179$	$Z^\circ(U) = 57,865$
$U_2^N = 30; 60$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794$	$Z^\circ(U) = 57,865; 115,73$
$U_3^N = 30; 120$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794$	$Z^\circ(U) = 57,865; 121,647$
$U_4^N = 30; 240$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794$	$Z^\circ(U) = 57,865; 243,294$
$U_5^N = 30; 353$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,1588$	$Z^\circ(U) = 57,865; 364,941$
$U_6^N = 30; 60; 353$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794; 0,1588$	$Z^\circ(U) = 57,865; 115,73; 364,941$
$U_7^N = 30; 120; 353$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794; 0,1588$	$Z^\circ(U) = 57,865; 121,647; 364,941$
$U_8^N = 30; 240; 353$	$\varphi(\lambda) = 0,3179; 0,0794; 0,1588$	$Z^\circ(U) = 57,865; 243,294; 364,941$

Деякі результати розрахунків цільових функцій представимо на рис.2.

Результати визначення перетворювальних структур з мінімальним значенням цільової функції при різних потужностях перетворювача представлені у табл.1, 2 (структура з мінімальним значенням цільової функції позначена як «●» окремо для структур з силовими модулями М1, М2 та М3).

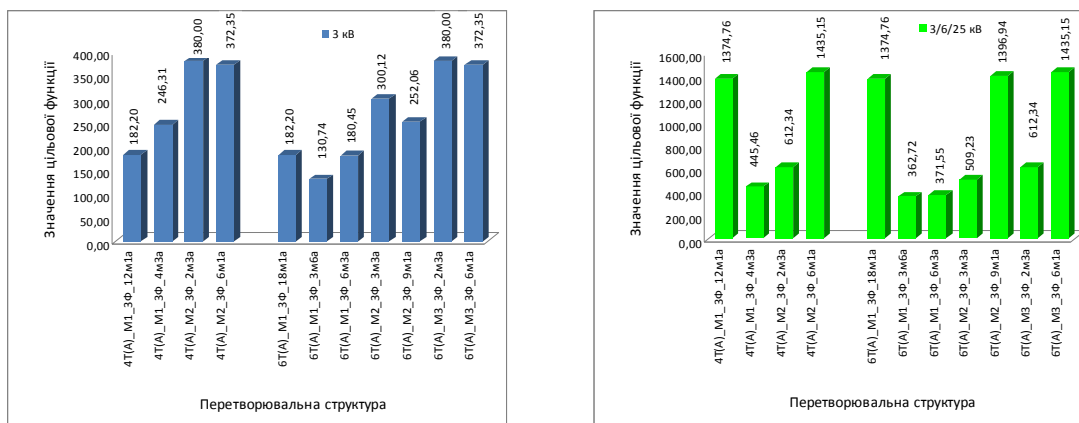


Рисунок 2 – Значення цільових функцій різних перетворювальних структур при потужності перетворювача 12000 кВт та різних напругах у контактній мережі

Таблиця 1 – Результати визначення перетворювальних структур з мінімальним значенням цільової функції, які призначені для живлення 4 ТЕД

Перетворювальна структура	Потужність, кВт	Напруга							
		3 кВ	3/6 кВ	3/12 кВ	3/24 кВ	3/25 кВ	3/6/25 кВ	3/12/25 кВ	3/24/25 кВ
4Т(А)-М1-3Ф-12м1а	3000								
	6000								
	9000	•							
	12000	•							
4Т(А)-М1-3Ф-4м3а	3000	•	•	•	•	•	•	•	•
	6000	•	•	•	•	•	•	•	•
	9000		•	•	•	•	•	•	•
	12000		•	•	•	•	•	•	•
4Т(А)-М2-3Ф-2м3а	3000	•	•	•	•	•	•	•	•
	6000		•	•	•	•	•	•	•
	9000		•	•	•	•	•	•	•
	12000		•	•	•	•	•	•	•
4Т(А)-М2-3Ф-6м1а	3000								
	6000	•							
	9000	•							
	12000	•							

Висновки.

1. Для побудови статичного перетворювача тягового привода багатосистемного електровоза з чотирма тяговими двигунами доцільно, з точки зору значення цільової функції, використовувати структури типу 3а, а саме 4Т(А)-М1-3Ф-4м3а (силовий модуль М1) та 4Т(А)-М2-3Ф-2м3а (силовий модуль М2).

2. У відповідності до табл.2 визначаємо, що для побудови статичного перетворювача тягового привода багатосистемного електровоза з шістьма тяговими двигунами доцільно, з точки зору значення цільової функції, використовувати структури 6Т(А)-М1-3Ф-3м6а (силовий модуль М1), 6Т(А)-М2-3Ф-3м3а (силовий модуль М2) та 6Т(А)-М3-3Ф-2м3а (силовий модуль М3).

Таблиця 2 – Результати визначення перетворювальних структур з мінімальним значенням цільової функції, які призначені для живлення 6 ТЕД

Перетворювальна структура	Потужність, кВт	3 кВ	3/6 кВ	3/12 кВ	3/24 кВ	3/25 кВ	3/6/25 кВ	3/12/25 кВ	3/24/25 кВ
6Т(А)-М1-3Ф-18м1а	3000								
	6000								
	9000								
	12000								
6Т(А)-М1-3Ф-3мба	3000			•	•	•	•	•	•
	6000	•		•	•	•	•	•	•
	9000	•	•	•	•	•	•	•	•
	12000	•		•	•	•	•	•	•
6Т(А)-М1-3Ф-6м3а	3000	•	•						
	6000		•						
	9000								
	12000		•						
6Т(А)-М2-3Ф-3м3а	3000	•	•	•	•	•	•	•	•
	6000	•	•	•	•	•	•	•	•
	9000		•	•	•	•	•	•	•
	12000		•	•	•	•	•	•	•
6Т(А)-М2-3Ф-9м1а	3000								
	6000								
	9000	•							
	12000	•							
6Т(А)-М3-3Ф-2м3а	3000	•	•	•	•	•	•	•	•
	6000		•	•	•	•	•	•	•
	9000		•	•	•	•	•	•	•
	12000		•	•	•	•	•	•	•
6Т(А)-М3-3Ф-6м1а	3000								
	6000	•							
	9000	•							
	12000	•							

ЛІТЕРАТУРА

1. Котельников А.В. Электрификация железных дорог. Мировые тенденции и перспективы / А.В.Котельников. – М.: Интекст, 2002. – 104 с.
2. Дубинец Л.В. Научное обоснование и разработка систем управления электроподвижным составом на основе применения герконовых устройств: дис. ... доктора техн. наук: 05.09.03 / Дубинец Леонид Викторович - Днепропетровск, 1991. – 356 с.
3. Дубинець Л.В. Обґрунтування вибору частоти тягового трансформатора багатосистемного електрорухомого складу / Л.В.Дубинець, А.М.Муха, О.Л.Маренич, О.А.Гусар // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2007. – Вип. 3/2007 (44), част.1. – С.28-29.
4. Муха А.М. Порівняльний аналіз перетворювальних структур тягового приводу перспективних багатосистемних електровозів з тяговими двигунами постійного струму / А.М.Муха // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2009. – Вип.27. – С.93-98.

УДК 681.513.5

САДОВОЙ А.В., д.т.н., профессор
ХМЕЛЬНИЦКИЙ Е.Д., к.т.н., доцент
КЛЮЕВ О.В., к.т.н., ст. преподаватель
ВОЛОШИН Ю.А.* , инженер

Днепродзержинский государственный технический университет
*ОАО „Днепровский металлургический комбинат”, г. Днепродзержинск

ВЫСШИЕ ГАРМОНИКИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ 10 кВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА И ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ РАБОТЫ СИЛОВЫХ РЕЗОНАНСНЫХ ФИЛЬТРОВ

Введение. Интенсивное внедрение вентильного электропривода привело к тому, что показатели качества электроэнергии (ПКЭ) неуклонно ухудшались, особенно в последнее десятилетие. Снижение ПКЭ отрицательно влияло на потребителей, в первую очередь – на устойчивость технологического процесса, а также надёжность электрооборудования в целом. Поэтому задача ограничения уровня и подавления высших гармоник весьма актуальна.

Исследованию спектра и уровня высших гармоник посвящено значительное количество работ, из которых можно выделить [1], где приведена объёмная статистика по высшим гармоникам в сетях промышленных предприятий. Однако экспериментальные данные в основном ограничиваются гармониками низких порядков (до 20-й), хотя в ряде случаев коэффициент несинусоидальности напряжений в распределительных сетях определяется гармониками более высоких порядков (до 40-й), в том числе и чётными гармониками. Поэтому теоретический и практический интерес представляет исследование методов ограничения гармоник высокого уровня, а также определения эффективности отдельных силовых фильтров по подавлению этих гармоник.

Постановка задачи. Исследование спектра и уровня гармоник высокого порядка, анализ эффективности фильтров по подавлению этих гармоник, а также выбор оптимальной комбинации включения силовых резонансных фильтров в распределительной сети 10кВ, питающей узел прокатных цехов, для различных режимов нагрузки прокатных станов.

Результаты работы. 1. *Характеристика узла электрооборудования 10кВ.* Рассматриваемый узел электрооборудования комбината напряжением 10кВ питает группу сортопрокатных цехов. Питание цеховых подстанций МС-4, МС-5 и ПС-3 выполнено от подстанции глубокого ввода КРЗ-5 от двух трансформаторов Т-3 и Т-4.

Одной из причин, привлёкших внимание к проблеме качества электроэнергии на комбинате, явилась серия серьёзных аварий в 2003-2004 г.г. при возникновении однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), сопровождавшихся пожарами в кабельных тоннелях. Тогда же возникла идея о связи возникающих ОЗЗ с уровнем высших гармоник. Поэтому одним из аспектов решения задачи повышения надёжности систем электрооборудования является снижение уровня высших гармоник [2], генерируемых тиристорными преобразователями, установленными в узле электропитания СПЦ-2.

В ходе проведения экспериментов достоверно установлена связь между уровнем высших гармоник и повреждением высоковольтных кабелей вследствие возникновения однофазных замыканий на землю. Нестандартность ситуации заключается в том, что величина коэффициента несинусоидальности значительно превышает норматив (до 9%), а наиболее выраженными в спектре являются гармоники очень высокого порядка, вплоть до 40-й. В то же время содержание канонических гармоник (5-й, 7-й, 11-й) не превышает 1,5...2%.

В ходе модернизации узла электроснабжения сортопрокатных цехов на подстанции КРЗ-5 было установлено фильтрокомпенсирующее устройство (ФКУ), включенное на III и IV секциях шин 10 кВ. Устройство ФКУ включает четыре индуктивно-емкостных силовых фильтра, настроенных в резонанс на 3-5-7-11-ю гармоники (табл.1).

2. *Анализ параметров силовых фильтров. Определение коэффициентов загрузки и эффективности.* Параметры силовых фильтров определены проектировщиками, поэтому в процессе проведения исследований можно было измерить величину активного сопротивления цепей фильтров без изменения других параметров. По данным табл.1 для каждого фильтра рассчитаны коэффициенты расстройки [1], которые оказались равными: $\alpha_3 = 0,0587$; $\alpha_5 = 0,0562$; $\alpha_7 = 0,0604$; $\alpha_{11} = 0,0624$.

Таблица 1 – Основные параметры фильтров

Номер фильтруемой гармоники	установленная генерируемая мощность, МВАр	Номинальный ток, А	Измеренная емкость фазы, мкФ	Индуктивность реактора фазы фильтра на номинальной отпайке, мГн
3	2.7/2.09	140	$53.8^{+5.4}_{-2.7}$	20.94±1.05
5	4.5/3.95	280	$109.6^{+11.0}_{-5.5}$	3.2±0.19
7	2.7/2.32	165	$65.8^{+6.6}_{-3.3}$	3.14±0.16
11	6.3/5.36	380	$153.8^{+15.4}_{-7.7}$	0.55±0.033

Добротность цепи фильтра ν -й гармоники определяется выражением

$$Q_{r\nu} = \sqrt{\nu} Q_r. \quad (1)$$

Предварительные расчёты по (1) дали $Q_{r3} = 38,2$, $Q_{r5} = 29,0$, $Q_{r7} = 40,8$, $Q_{r11} = 29,5$. Выражение для коэффициента загрузки i -го фильтра для ν -й гармоники $K_{i\nu}$ запишется в виде

$$K_{i\nu} = \frac{\beta}{\sqrt{\frac{1}{\nu_p Q_r^2} + \left(\alpha \pm \frac{\beta^2}{K_p \nu_p^2} \right)}}. \quad (2)$$

Величина относительного отклонения полного сопротивления фильтра от величины реактивного сопротивления фильтра при резонансе β определялась по формуле

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 + \frac{1}{\nu_p Q_r^2}}. \quad (3)$$

Определим значения параметра β и коэффициента K_p , равного отношению мощности батареи фильтра к мощности короткого замыкания (к.з.) в данной точке, приняв величину мощности короткого замыкания в точке подключения фильтров, т.е. на шинах 10 кВ подстанции КРЗ-5, равной 430 МВА (согласно расчётам проекта модернизации электроснабжения узла СПЦ-2): 3-я гармоника: $\alpha=0,0507$; $Q_r=38,2$;

$\beta=0,0508$; $K_p = 0,63 \cdot 10^{-2}$; 5-я гармоника: $\alpha=0,0486$; $Q_r=29,0$; $\beta=0,0510$; $K_p = 1,04 \cdot 10^{-2}$; 7-я гармоника: $\alpha=0,052$; $Q_r=23,6$; $\beta=0,0543$; $K_p = 0,63 \cdot 10^{-2}$; 11-я гармоника: $\alpha=0,0538$; $Q_r=17,1$; $\beta=0,0566$; $K_p = 1,46 \cdot 10^{-2}$.

Расчеты коэффициентов загрузки выполним для случаев положительного (K'_i , при $\alpha > 0$) и отрицательного (K''_i , при $\alpha < 0$) значения α в выражении (2): 3-я гармоника: $K'_i=0,163$; $K''_i=0,662$; 5-я гармоника: $K'_i=0,208$; $K''_i=0,256$; 7-я гармоника: $K'_i=0,232$; $K''_i=0,236$; 11-я гармоника: $K'_i=0,234$; $K''_i=0,239$.

Коэффициент эффективности работы фильтра $K_{эв}$ характеризует относительное уменьшение гармоники напряжения в сети и определяется отношением проводимости сети к эквивалентной проводимости сети и фильтра. Выражение для $K_{эв}$ имеет вид

$$K_{эв} = \frac{\beta_r K_{iv}}{K_p v^2}, \quad (4)$$

недостаток которого состоит в том, что параметр добротности Q_r не входит сюда в явном виде. Анализ показывает, что эффективность работы фильтра тем выше, чем меньше величина $K_{эв}$, т.е. чем меньше остаточное напряжение гармоники в сети, где установлен силовой фильтр этой гармоники. По выражению (4) с учетом указанных выше значений параметров (K_p , Q_r , α , β) рассчитаны величины коэффициента эффективности (также с учетом знака для коэффициента α): 3-я гармоника: $K'_3=0,142$; $K''_3=0,574$; 5-я гармоника: $K'_5=0,039$; $K''_5=0,048$; 7-я гармоника: $K'_7=0,034$; $K''_7=0,035$; 11-я гармоника: $K'__{11}=0,004$; $K''_{11}=0,0041$.

Анализ зависимостей $K_{iv}(Q_r)$ и $K_{эв}(Q_r)$ позволяет сделать ряд важных выводов:

1. На величину загрузки фильтра K_{iv} существенное влияние оказывает мощность батареи конденсаторов (через коэффициент K_p), поэтому при положительном значении α фильтры 5-й и 11-й гармоник необходимо проектировать с большой батареей конденсаторов ($K_p \geq 0,4 \cdot 10^{-2}$), что в нашем случае и выполняется.

2. При положительных значениях отклонения $\alpha > 0$ и мощных конденсаторных батареях эффективность фильтров 5-й и 7-й гармоник в пределах $K_3=0,04 \dots 0,06$. Эффективность фильтра 11-й гармоники очень высока ($K_3=0,004$), так как батарея конденсаторов имеет значительную мощность. Эффективность фильтра 3-й гармоники сравнительно низкая – $K_3 = 0,15 \dots 0,22$.

3. Расчёт частотных характеристик распределительной сети 10кВ узла СПЦ-2.

Расчет и анализ частотных характеристик выполним в координатах: реактивная проводимость y – номер гармоники v . Выражение для эквивалентной проводимости схемы имеет вид

$$Y_{\Sigma v} = Y_{cv} + \sum_{p=1}^n Y_{фv}. \quad (5)$$

Здесь y_{cv} – проводимость сети без фильтров и конденсаторной батареи для v -й гармоники; $y_{фv}$ – проводимость фильтра для v -й гармоники, которая суммируется по всем n фильтрам.

Запишем выражение для y_{cv} через сопротивление короткого замыкания сети в точке подключения силовых фильтров X_k , т.е. на шинах 10 кВ:

$$y_{cv} = \frac{1}{vX_k} - \frac{1}{X_{c1}}, \quad (6)$$

которое более удобно представить в виде

$$y_{cv} = \frac{1 - v^2\delta}{vX_k} = \frac{y'_{cv}}{X_k}. \quad (7)$$

В выражении (6) X_{c1} – емкостное сопротивление прямой последовательности собственно сети на промышленной частоте. Введем коэффициент δ , равный отношению сопротивлений:

$$\delta = X_k / X_{c1}. \quad (8)$$

Емкостное сопротивление X_{c1} определим по результатам измерений токов однофазного замыкания на землю через полученные значения емкости сети, питающейся от трансформатора Т3 ($C_\Sigma = 13,5$ мкФ), и участка сети, питающейся от трансформатора Т4 ($C_\Sigma = 7,2$ мкФ).

Соответственно имеем:

$$X'_{c1} = \frac{1}{2\pi f C'_\Sigma} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 13,5 \cdot 10^{-6}} = 236 \text{ Ом}, \quad X''_{c1} = \frac{1}{2\pi f C''_\Sigma} = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 7,2 \cdot 10^{-6}} = 442 \text{ Ом}.$$

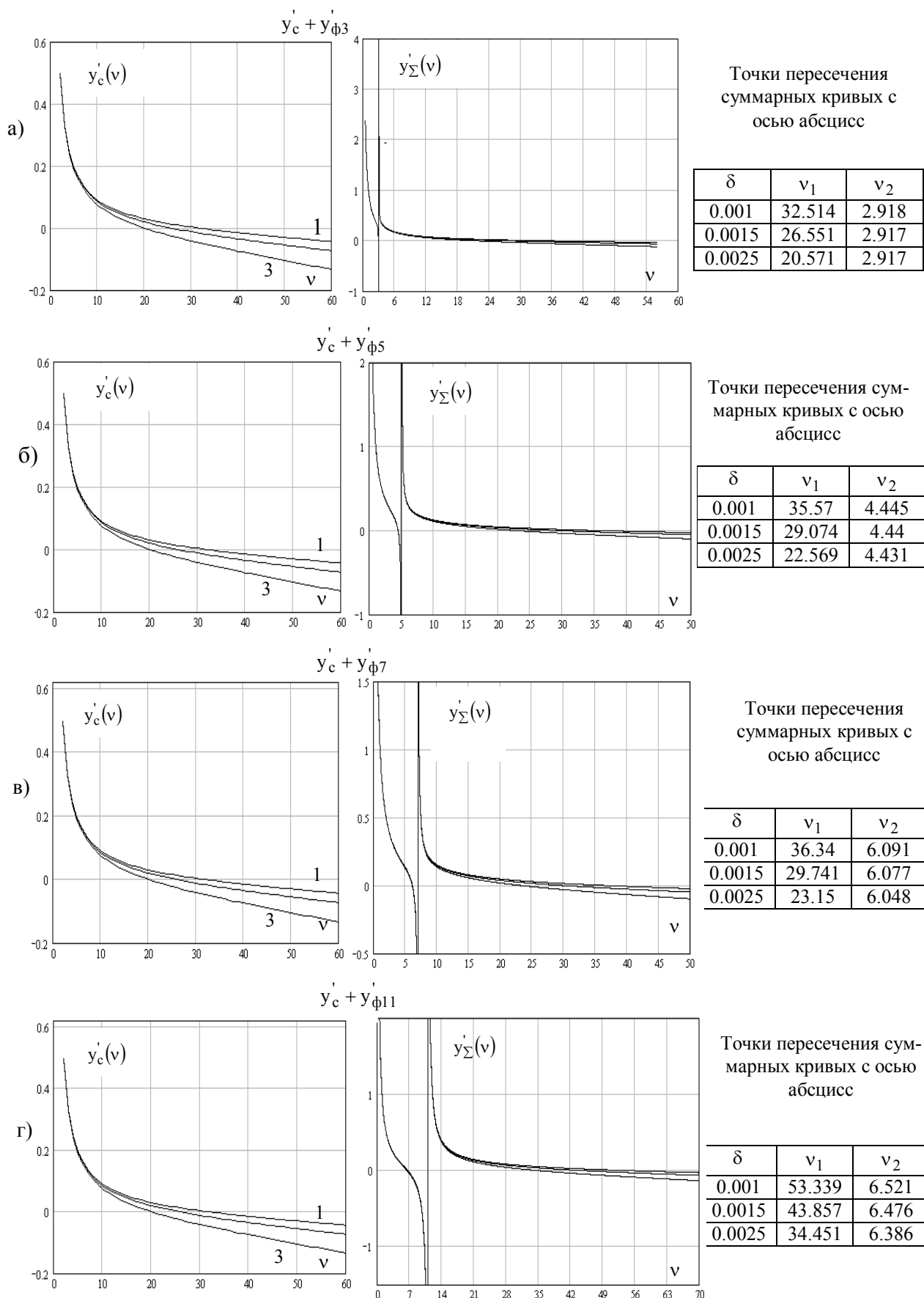
По данным лаборатории защиты (из расчета ТКЗ на стороне 150 кВ и 10 кВ подстанции КРЗ-5) величина сопротивления короткого замыкания изменяется в пределах 0,3...0,4 Ом для разных режимов питания. Тогда согласно (8) величина коэффициента δ колеблется в пределах 0,01...0,03, поэтому именно для этих значений и выполним расчет частотных характеристик сети.

Реактивная проводимость фильтра v -й гармоники определяется по выражению

$$y_{\phi v} = \frac{1}{X_k} \frac{K_p}{\frac{v}{v_p^2} - \frac{1}{v}} = \frac{y'_{\phi v}}{X_k}. \quad (9)$$

Функция эквивалентной проводимости $y'_\Sigma(v)$ имеет полюсы на частотах гармоник v_p , на которые настроены фильтры, а также при $v = \infty$. Нули функции имеют место при $v = 0$, а также при частоте гармоники, большей, чем наибольшая частота настройки фильтров. Появление нулей функции $y'_\Sigma v$ означает возможность резонансных повышений напряжения на частотах соответствующих гармоник.

По выражению (7) рассчитаны и построены частотные характеристики сети для значений параметра δ , равных $1 \cdot 10^{-2}$; $1,5 \cdot 10^{-2}$; $2,5 \cdot 10^{-2}$. По выражению (9) рассчитаны частотные характеристики фильтров 3-5-7-11-й гармоник. По выражению (5) рассчитаны и построены эквивалентные частотные характеристики (сеть+ фильтр). Частотные характеристики приведены на рис.1, там же указаны точки пересечения кривых с осью абсцисс, т.е. значения v_1 и v_2 резонансных частот для различных параметров δ . Как правило, нуль частотной характеристики находится в диапазоне $v = 18 \dots 35$. Подключение силовых фильтров резко изменяет вид частотной характеристики сети, поэтому возможно возникновение нулей функции $y'_\Sigma v$, т.е. появление резонанса токов на тех частотах, для которых фильтры не предусмотрены. Следовательно, задачей дальнейших экспериментальных исследований является выбор наилучшей комбинации включения силовых фильтров для максимального подавления гармоник.



1 – $\delta = 0.001$; 2 – $\delta = 0.0015$; 3 – $\delta = 0.0025$

Рисунок 1 – Частотные характеристики сети с фильтрами 3(а), 5(б), 7(в) и 11(г) гармоник

4. *Экспериментальное исследование работы силовых фильтров и выбор оптимальной комбинации их включения.* Использование той или иной схемы питания подстанции МС-4, МС-5 и ПС-3 определяется в основном технологическими факторами прокатных цехов.

Для каждой режимной схемы измерялись: уровень гармоник (процентное содержание $U_v^{\%}$) от $v=3$ до $v=40$ при отключенном ФКУ; уровень гармоник $U_v^{\%}$ при различных вариантах включения силовых фильтров; уровень напряжения на шинах $U_{ш}$; диапазон колебания коэффициента несинусоидальности $K_{нс}^{\%}$; величина тока в цепи фильтра. Уровень гармоник записывался в виде диапазона изменения либо фиксированной величиной.

Для определения эффективности фильтрокомпенсирующих устройств целесообразно рассчитать частотные характеристики сети при включении фильтров в различных комбинациях. Это позволяет уже на этапе проектирования определить частоты, на которые должны быть настроены силовые резонансные фильтры, и избежать излишних затрат на установку фильтров с низкой эффективностью. Результаты проведенных экспериментальных исследований подтверждают данные выводы.

Проанализируем частотную характеристику (рис.2) для случая включения фильтров Ф-5+Ф-11. Первый нуль частотной характеристики находится в зоне 4-й гармоники, второй – в зоне 7-й гармоники. Это – полюса характеристики, следовательно, следует ожидать в эксперименте увеличения $U_4^{\%}$ и $U_7^{\%}$, что и отражено в табл.2 (значения: $U_4^{\%} = 0,7...1,1\%$; $U_7^{\%} = 0,8...1,6\%$).

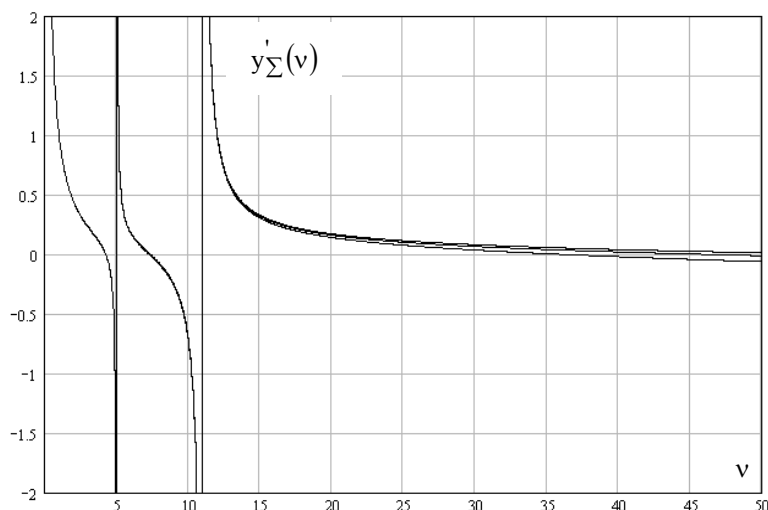
Аналогичные рассуждения для случая включения Ф-5+Ф-7+Ф-11 (рис.3). В обоих случаях последний нуль частотной характеристики находится в зоне 30-й-50-й гармоник, однако фильтр Ф-11 с мощной батареей конденсаторов практически полностью подавляет эти высокие гармоники.

Эксперименты показали, что аналитические расчеты выполнены с приемлемой точностью, так как резонансным частотам всегда соответствует повышенное значение уровня напряжения $U_v^{\%}$ на данной частоте.

Включение одиночных фильтров не позволяет снизить величину $K_{нс}$ до нормативного значения в 5%, поэтому необходимо выбирать наиболее эффективную их комбинацию, когда максимальное снижение величины $K_{нс}$ обеспечивается при меньшем количестве включенных фильтров.

Выводы по результатам включения фильтров в разных комбинациях выполнены на основе анализа только лучших вариантов: **Ф-5+Ф-7** – при всех схемах электропитания величина коэффициента несинусоидальности колебалась в диапазоне 3,5...4,2%, однако гармоники высокого порядка ($v \geq 30$) подавляются не полностью; **Ф-5+Ф-11** – диапазон коэффициента несинусоидальности равен 2,2...2,9%, однако снижается проводимость сети для 7-й гармоники, уровень напряжения составляет $U_7^{\%} = 1,0...2,0\%$ (табл.2); **Ф-5+Ф-7+Ф-11** – диапазон коэффициента несинусоидальности равен 2,0...2,6%, однако возрос уровень 4-й гармоники до $U_4^{\%} = 1,0...1,2\%$. Ниже приведены варианты, которые не могут быть рекомендованы по разным причинам:

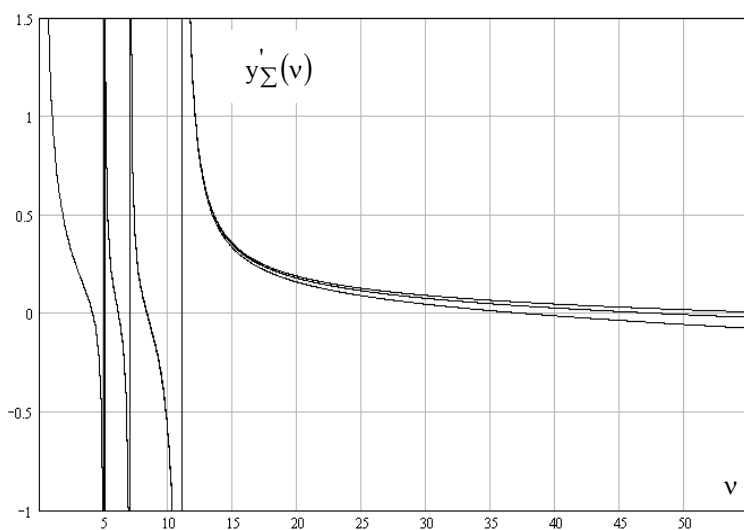
Ф-3+Ф-11 – диапазон колебаний $K_{нс}^{\%}$ составляет 2,8...4,2%, однако значительно возрастает уровень низких гармоник: $U_5^{\%} = 1,8...2,6\%$; $U_6^{\%} = 0,8...1,5\%$; $U_7^{\%} = 1,0...1,7\%$, высшие гармоники подавляются удовлетворительно.



Точки пересечения суммарных кривых с осью абсцисс

δ	0.001	0.0015	0.0025
ν_1	4.246	4.239	4.225
ν_2	7.356	7.324	7.259
ν_3	55.682	45.74	35.862

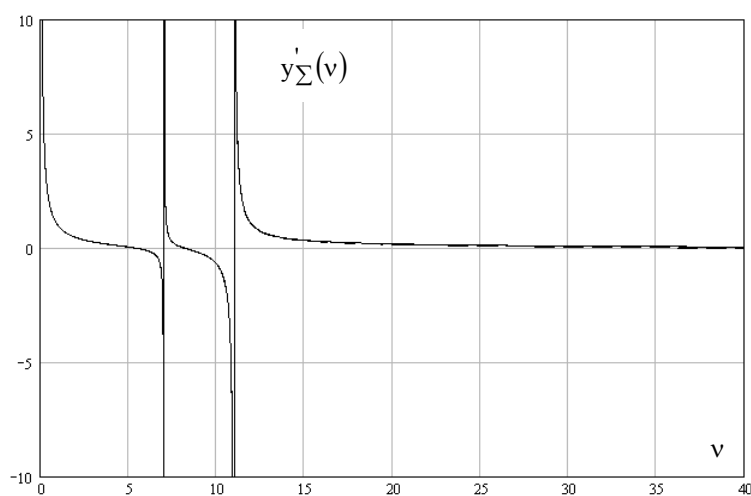
Рисунок 2 – Эквивалентная частотная характеристика сети с фильтрами Φ -5+ Φ -11



Точки пересечения суммарных кривых с осью абсцисс

δ	0.001	0.0015	0.0025
ν_1	4.1	4.093	4.078
ν_2	6.1	6.091	6.074
ν_3	8.33	8.31	8.282
ν_4	58.291	47.898	37.464

Рисунок 3 – Эквивалентная частотная характеристика сети с фильтрами Φ -5+ Φ -7+ Φ -



Точки пересечения суммарных кривых с осью абсцисс

δ	0.001	0.0015	0.0025
ν_1	5.336	5.314	5.271
ν_2	8.13	8.114	8.082
ν_3	56.131	46.11	36.153

Рисунок 4 – Эквивалентная частотная характеристика сети с фильтрами Φ -7+ Φ -11

Таблица 2 – Значения высших гармоник напряжения на III секции шин при различной комбинации включения ФКУ (от трансформатора Т-3 питаются МС-5 плюс две секции ПС -3), $I_{нагр}=1,1-1,3$ кА

Частота ν	$U_v\%$					
	ФКУ–откл. $K_{нс}=(4.5-7.7)\%$ $U_{ш}=10.0$ кВ	ФКУ–5,7 $K_{нс}=(3.7-5.2)\%$ $U_{ш}=10.15$ кВ $I_5=210$ А $I_7=120$ А	ФКУ–5,11 $K_{нс}=(2.0-3.1)\%$ $U_{ш}=10.3$ кВ $I_5=220$ А $I_{11}=300$ А	ФКУ–5,7,11 $K_{нс}=(1.9-2.6)\%$ $U_{ш}=10.25$ кВ $I_5=220$ А $I_7=125$ А $I_{11}=300$ А	ФКУ–3,11 $K_{нс}=(2.5-4.5)\%$ $U_{ш}=10.2$ кВ $I_3=110$ А $I_{11}=300$ А	ФКУ–7,11 $K_{нс}=(6.5-11.2)\%$ $U_{ш}=10.3$ кВ $I_7=190$ А $I_{11}=320$ А
3	0.3	0.1	0.3	0.3-0.4	0.1	0.3
4	0.0	0.1	0.7-1.1	1.2	0.1	0.5-1.0
5	0.8-1.1	0.3-0.4	0.5-0.8	0.3-0.7	0.7-2.8	5.1-11.2
6	0.3	0.2	0.2	0.1	1.5-2.2	0.4
7	0.5-0.7	0.2	0.8-1.6	0.2-0.5	0.9-1.4	0.2
8	0.2	0.2	0.5-0.8	0.2	0.5	0.4
10	0.1	0.2	0.3	0.2	0.1	0.2
11	0.3	0.5-0.6	0.1	0.1	0.1	0.1
12	0.2	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
13	0.3	0.3-0.4	0.1	0.1	0.2	0.1
15	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
17	0.7-1.0	0.3-0.5	0.2	0.2	0.1	0.3
19	0.9-1.1	0.3-0.4	0.2	0.2	0.0	0.3
20	0.2	0.2	0.1	0.1	0.0	0.2
21	0.6-0.9	0.3	0.2-0.4	0.2	0.0	0.3
22	0.4-0.6	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1
23	3.1-3.6	0.5-0.9	0.2	0.3	0.1	0.3
24	0.3	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1
25	2.3-28	0.6-0.8	0.3	0.2	0.1	0.2
26	0.6-1.2	0.3-0.4	0.1	0.1	0.0	0.1
27	0.8-1.2	0.5-0.6	0.2	0.1	0.1	0.1
28	0.6-1.0	0.5-0.7	0.1	0.2	0.0	0.2
29	1.8-3.9	0.6-0.9	0.2	0.2	0.1	0.3
30	1.1-1.8	0.4-0.6	0.1	0.1	0	0.2
31	0.9-1.6	0.7-0.9	0.1	0.1	0.1	0.1
32	0.3-0.5	0.4-0.6	0.1	0.1	0.1	0.1
33	0.2	0.4-0.6	0.1	0.1	0.1	0.1
34	0.2	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1
35	0.4-0.5	0.7-1.1	0.2	0.1	0.0	0.3
36	0.2	0.7-0.8	0.1	0.1	0.0	0.2
37	0.2-0.4	0.6-0.9	0.1	0.1	0.0	0.1
38	0.2-0.4	0.7-0.8	0.2	0.1	0.0	0.1
39	0.1	0.5-0.7	0.1	0.1	0.0	0.3
40	0.1	0.2-0.6	0.2	0.1	0.1	0.2

Особое место занимает сочетание фильтров Ф-7+Ф-11 и Ф-3+Ф-7+Ф-11. известно, что фильтры Ф-7 и Ф-11 снижают проводимость сети на 5-й гармонике, поэтому следует ожидать значительного увеличения напряжения $U_5\%$ и коэффициента несинусоидальности. Проанализируем рис.4: первый нуль частотной характеристики находится в зоне 5-й гармоники, поэтому в табл.2 наблюдаем резкое увеличение $U_5\%$ до 11,2%. Ток фильтра Ф-7 увеличивается до 180А при номинальном значении $I_{ном}=165$ А, в отдельных экспериментах ток раскачивался, достигая величины 200А. Следовательно работа в таком режиме исключается.

Относительно установки отдельной батареи конденсаторов без реактора следует заметить следующее. В сетях, содержащих высшие гармоники, установка косинусных БК (без реактора) недопустима, так как срок службы батарей резко падает из-за перегрузки их токами гармоник. Однако, если имеется у потребителя дефицит реактивной мощности, то установка такой батареи возможна, но при условии, что в сети эксплуатируются силовые резонансные фильтры. Положительный эффект от установки таких БК заключается в том, что решается задача повышения коэффициента мощности, и одновременно резонансные частоты гармоник высокого порядка 30-й...50-й смещаются в зону 20-й...30-й гармоник. С точки зрения влияния ВГ на изоляцию высоковольтных кабелей это явление – положительное. Однако дальнейшие исследования показали, что включение фильтра Ф-11, имеющего мощную конденсаторную батарею (6.3 МВАр), практически полностью подавляет гармоники очень высокого порядка, т.е. в установке отдельной БК нет необходимости.

Выводы: 1. Экспериментальные исследования для различных режимов нагрузки показали, что удовлетворительными являются сочетания фильтров Ф-5+Ф-7 и Ф-5+Ф-11, тогда коэффициент несинусоидальности находится в пределах 3,0...4,5%. Включение фильтров в сочетаниях Ф-5+Ф-7+Ф-11 и Ф-3+Ф-5+Ф-7+Ф-11 позволяет снизить коэффициент несинусоидальности напряжения до 1,5...2% (при норме 5%).

2. Исследованием установлено, что недопустимо включение фильтров в сочетаниях Ф-7+Ф-11 и Ф-3+Ф-7+Ф-11, так как коэффициент несинусоидальности напряжения возрастает до 10...12%, а фильтр Ф-7 перегружается током 5-й гармоники до 200А.

3. Исследования показали низкую эффективность фильтра 3-й гармоники: ни в одном из режимов не было зафиксировано значительного уровня тока данной гармоники.

4. Исследования гармоник очень высокого порядка (30-й и выше) показали, что необходимость в установке отдельной конденсаторной батареи без реактора отпадает, так как фильтр 11-й гармоники с мощной БК практически полностью подавляет эти гармоники.

5. Генерация реактивной мощности ФКУ позволяет поднять коэффициент мощности узла от $\cos\varphi = 0,65...0,72$ до величины $\cos\varphi = 0,95...0,98$, создавая в отдельные периоды режим работы сети с опережающим косинусом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промышленных предприятий / Игорь Владимирович Жежеленко. – К.: Техніка, 2000. – 236с.
2. Железко Ю.С. Стратегия снижения потерь и повышение качества электроэнергии в электрических сетях / Юрий Станиславович Железко // Электричество. – 1992. – №5. –С.18-23.