



ИНТЕР РАО
ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИЯ



V Всероссийская
научно-практическая конференция
**«Проблемы и перспективы развития
электроэнергетики и электротехники»,**
посвященная 55-летию КГЭУ

11–12 октября 2023 г. Казань

Материалы конференции

В двух томах

Том II

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
(ФГБОУ ВО «КГЭУ»)

V ВСЕРОССИЙСКАЯ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ
(С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ) КОНФЕРЕНЦИЯ,
ПОСВЯЩЕННАЯ ПРАЗДНОВАНИЮ 55-ЛЕТИЯ КГЭУ
«ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»

11–12 октября 2023 г.

МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИИ

В двух томах

Том 2

Под общей редакцией ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова

Казань
2023

УДК 621.3
ББК 31.2
П78

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор ФГБОУ ВО «КГЭУ» *И.В.Ившин*,
доктор технических наук, профессор филиала ФГБОУ ВО «УГНТУ»
в г. Салавате *Р.Г.Вильданов*

Редакционная коллегия:

Э.Ю.Абдуллазянов (гл.редактор), И.Г.Ахметова, Р.Р. Гибадуллин,
В.Р. Иванова

П78 **V Всероссийская научно-практическая (с международным участием) конференция, посвященная празднованию 55-летия КГЭУ: «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники»:** матер. конф. (Казань, 11–12 октября 2023 г.): в 2 т. / под общ. ред. ректора КГЭУ Э.Ю. Абдуллазянова. – Казань: КГЭУ, 2023. – Т. 2. – 358 с.

ISBN 978-5-89873-643-9 (т. 2)

ISBN 978-5-89873-644-6

В сборнике представлены материалы V Всероссийской научно-практической (с международным участием) конференции, посвященной празднованию 55-летия КГЭУ «Проблемы и перспективы развития электроэнергетики и электротехники» по следующим научным направлениям:

1. Проектирование и эксплуатация объектов электроэнергетики.
2. Энерго-и ресурсосбережение промышленных и коммунальных предприятий.
3. Энергосиловое оборудование, электропривод и автоматизация.
4. Малая энергетика, возобновляемые источники энергии, светотехника.
5. Перспективы развития электроэнергетики.

Предназначен для научных работников, аспирантов и специалистов, работающих в сфере энергетики, а также для студентов вузов энергетического профиля.

Ответственность за содержание материалов докладов возлагается на авторов.

УДК 621.3
ББК 31.2

ISBN 978-5-89873-643-9 (т. 2)
ISBN 978-5-89873-644-6

© Казанский государственный
энергетический университет, 2023

5. Гудфеллоу, Я. Глубокое обучение / Я. Гудфеллоу, И. Бенджио, А. Курвилль. – Москва : ДМК Пресс, 2018. – 652 с. – ISBN 978-5-97060-618-6.

6. Элбон, К. Машинное обучение с использованием Python / К. Элбон. – Санкт-Петербург : 2019. – 384 с. – ISBN 978-5-9775-4056-8.

УДК 621316

К РАЗРАБОТКЕ ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТАНОВОК ВЫСШИХ ГАРМОНИК НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОСЕТИ И ТОКА НЕЛИНЕЙНЫХ НАГРУЗОК

¹Тукшаитов Рафаил Хасьянович, ²Лозина Наталья Георгиевна,
¹Зарипов Рустам Котдусович

¹Казанский государственный технический университет

²Научно-исследовательский институт постоянного тока (СПб)

Аннотация: результаты изучения материалов целого ряда публикаций сделало необходимым разработать и предложить перечень показателей для характеристики фальтркомпенсирующих установок. На примере анализа данных установки Дж. Арриллага и соавт. [1] и вычисления ряда дополнительных ее показателей предложена определенная основа для сравнительной характеристики эффективности таких установок.

Ключевые слова: фальтркомпенсирующая установка, высшие гармоники, нелинейная нагрузка, эмиссия высших гармоник, добротность, резонансный контур.

TO THE DEVELOPMENT OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF FILTER COMPENSATING DEVICES OF HIGHER HARMONICS OF MAINS VOLTAGE AND CURRENT OF NONLINEAR LOADS

¹Tukshaitov Rafail Khasyanovich, ²Lozinova Natalia Georgievna
¹FSBEI HE KSPEU

²Scientific Research Institute of Direct Current (St. Petersburg)

Abstract: the results of studying the materials of a number of publications made it necessary to develop and propose a list of indicators for characterizing filter compensating installations. On the example of the data analysis of the installation by J. Arrillaga et al. [1] and the calculation of a number of its additional indicators, a certain basis was proposed for a comparative characteristic of the efficiency of such installations.

Keywords: filter compensating installation, higher harmonics, nonlinear load, emission of higher harmonics, Q-factor, resonant contour of the circuit.

Одним из важных показателей качества электроэнергии в условиях широкого внедрения преобразовательной техники является уровень

несинусоидальности напряжения электросети в соответствии с требованиями ГОСТ 32144-2013, оцениваемый по коэффициенту его нелинейных искажений напряжения.

Рассмотрев более 50 публикаций [2–9 и др.], вышедших за последние 15 лет, посвященных разработке пассивных фильтркомпенсирующих установок (ФКУ) на основе моделирования, достаточно трудно, без специального анализа, дополнительных расчетов и результатов экспериментальной апробации, понять для каких целей предназначена та или иная их модель – для подавления высших гармоник (ВГ) напряжения электросети или тока нелинейных нагрузок]; только для подавления ВГ или и для компенсации сдвига фазы индуктивного тока в электросети (ЭС); применена дополнительная расстройка резонансной частоты и допустимая ее величина или она отсутствует; нужен ли дополнительный резистор в резонансном контуре или нет; при каких его значениях фильтр еще функционирует; отсутствует класс напряжений ЭС в точке подключения; величина потери мощности на ФКУ и ряд других сведений, что не позволяет раскрыть его функциональные возможности и оценить уровень достоверности приводимых данных. Большинство работ, практически за исключением [10], выполнено без экспериментальной апробации результатов моделирования ФКУ и оценки степени их эффективности. Такое положение не позволяет оперативно провести сравнительную оценку предложенных и новых моделей ФКУ [11] и способов снижения эмиссии ВГ в ЭС [12]. Для характеристики применяемых ФКУ можно отчасти воспользоваться также перечнем показателей предлагаемых использовать для выполнения их расчетов [6].

Многие вопросы у читателя могли бы не возникнуть, если бы авторы в публикациях приводили в обобщенном виде основные характеристики предлагаемых ФКУ.

В связи с изложенным на основе изучения и обобщения данных многих источников литературы разработан приближенный перечень показателей ФКУ, который в систематизированном виде представлен в табл. 1. Последовательность расположения показателей приведено с учетом приближенной оценки их информативной значимости.

Первые одиннадцать показателей ФКУ могут быть отнесены к основным, а остальные шесть – условно к дополнительным. Представление технических характеристик в обобщенном виде может облегчить и ускорить ознакомление с предлагаемыми моделями ФКУ, а также позволит оценить их эффективность.

Для наглядности изложения на рис. 1 приведена типовая схема ФКУ [1], которая отличается от последующих лишь значениями параметров

применяемых элементов и соответственно добротностью резонансных контуров. Форма представления характеристик таких ФКУ и его описание практически остается в литературе без изменения на протяжении последних 30 лет.

Таблица 1

Перечень основных и дополнительных показателей, характеризующих
фильтркомпенсирующую установку

№	Наименование показателя
1	Основное предназначение ФКУ
2	Класс напряжения в точке подключения, U, В
3	Количество фаз напряжения электросети
4	Номера подавляемых гармоник
5	Коэффициент эффективности подавления высших гармоник ($K_{эфф.}$)
6	Суммарная мощность нагрузок, ВА
7	Суммарная реактивная мощность фильтра, ВАр
8	Предельное значение коэффициента нелинейных искажений напряжения ($K_{U \text{ пред.}}$), %
9	Предельное значение коэффициента нелинейных искажений по току нагрузки ($K_{I \text{ пред.}}$)
10	Потери мощности на фильтре, Вт при принятом предельно допустимом значении $K_{U \text{ пред.}}$
11	Коэффициент использования конденсаторной батареи в фильтре, о.е.
12	Активное сопротивление реакторов (Γ_L), Ом
13	Отношение импеданса ЭС к сопротивлению реактора ($Z_{ЭС}/\Gamma_L$)
14	Значение емкости конденсаторов, мкФ
15	Значение индуктивности реакторов, мГ
16	Сопротивление дополнительных резисторов в резонансных контурах (РК), Ом
17	Добротность резонансных контуров
18	Отклонение частоты настройки РК ФКУ, %
19	Масса, кг
20	Габариты, мм

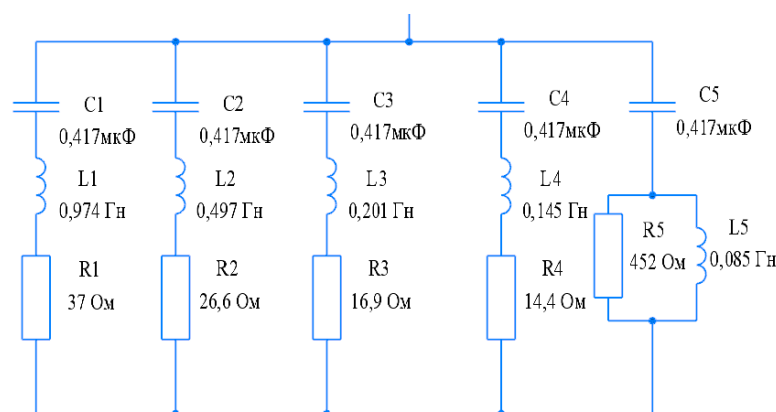


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема ФКУ [1]

Оценим, какую информацию можно получить на основе анализа представленных параметров ФКУ и результатов дополнительных вычислений (табл. 2).

Таблица 2

Основные и дополнительные показатели технической характеристики ФКУ [1]

№	Показатели ФКУ	Номер гармоники				
		5	7	11	13	17
1	Предназначение	Для подавления гармоник напряжения (тока)				
2	$F_{рез.}$, Гц	250,0	349,9	550,1	648	846
3	Отклонение частоты настройки, $\pm$, %	0	0,014	0,01	0,07	0,5
4	Количество фаз напряжения	3				
5	Реактивная мощность (Θ), ВАр при 230 В и 35 кВ	7,0/160	7,0/160	7,0/160	7,0/160	7,0/160
6	L , мГн	974	497	201	145	85
7	C , мкФ	0,417	0,417	0,417	0,417	0,417
8	X_c , Ом	7630	7630	7630	7630	7630
9	Характеристическое сопротивление РК (ρ), Ом	1530	1091	694	590	451
10	$R_{кон.}$, Ом	37,0	26,6	16,9	14,4	452
11	Добротность РК (Q)	41	41	42	41	1,0
12	$Z_{наг.}$, Ом/ $P_{ном.}$, Вт при 230 В	370/145	266/201	169/316	144/371	-

Из сопоставления данных табл. 2 и табл. 1 следует, что в представленном в [1] виде описания и представления ФКУ не позволяют выявить целый ряд ее показателей и, соответственно, дать обстоятельную характеристику. Несмотря на это, попытаемся провести анализ на основе представленных данных и результатов дополнительного вычисления ряда параметров и показателей.

Прежде всего, отметим, что в ФКУ резонансные контуры (РК) настроены на 5, 7, 11 и 13 гармоники с достаточно высокой точностью (погрешность не более 0,01-0,1 %).

Пятое звено является комбинированным устройством, состоящим из РК и РС-фильтра верхних частот с частотой среза (846 Гц) равной резонансной частоте РК. Широкополосный фильтр с резонансной частотой 846 Гц, настроен на 17 гармонику, и имеет небольшую добротность, равной единице. Высокое совпадение частот РК с частотой номера гармоники обусловлено только тем, что они получены расчетным путем. Пренебрежение авторами 5 и 9 гармониками косвенно свидетельствует о том, что ФКУ предназначен для работы в трехфазной сети.

Положительным моментом анализируемой работы является представление значений элементов РК без завышения точности их представления на 2-3 порядка, имеющее место в других работах. Третью значащую цифру в числах целесообразно было дополнительно округлить и представить нулем. При этом вносимая дополнительная погрешность не будет превышать 0,2-1,0 %, которой вполне можно пренебречь.

Теряет определенный смысл использовать подход [1] к выбору добротности РК. Авторы данной работы вначале осуществляют завышение значений характеристического сопротивления РК до 500–1500 за счет использования катушек с большой индуктивностью, а далее, дополнительно применяют резисторы с завышенными сопротивлениями (14–37 Ом), чтобы осуществить обратное понижение добротности РК до выбранного уровня (до 41). Результаты моделирования АЧХ фильтров показывает, что при таком подходе по мере применения разных сопротивлений в РК избирательность их существенно меняется.

Из анализа эквивалентной схемы подключения ФКУ к ЭС и нелинейным нагрузкам можно прийти к выводу, что подавление ВГ напряжения ЭС и тока нагрузки возможно только в том случае, если значение сопротивления РК ($R_{кон.}$) будет значительно меньше импеданса ЭС ($Z_{эс}$) и одновременно удовлетворять следующему неравенству:

$$Z_{эс} \gg R_{кон.} \ll Z_{наг}, \quad (1)$$

где $Z_{наг}$ импеданс нагрузки в точке присоединения.

Выполнение этого неравенства практически возможно при исключении дополнительного резистора $R_{кон.}$ в РК. Поэтому применения его целесообразно избегать [1, 4, Вал]. В этом случае сопротивление контура сводится только к сопротивлению реактора (r_L). Из этого неравенства также следует, что при его выполнении происходит одновременное подавление ВГ напряжения не только ЭС, но и тока нагрузок в пределах определенной их мощности.

Поскольку импеданс ЭС даже в конце однофазной линии остается незначительным (порядка 0,5 Ом на основной частоте), то для обеспечения эффективного ослабления ВГ напряжения ЭС и тока нагрузки сопротивление реактора r_L должно быть значительно меньше 0,5 Ом, что далеко не всегда выполнимо. Последние сведения фирмы производители реакторов обычно не приводят.

Для обеспечения неравенства (1) значение $R_{наг}$, исходя из значения $R_{кон.}$ первого звена (37 ом) [1], должно быть на порядок больше, то есть не

менее 370 Ом. При этом эффективность всех звеньев ФКУ при U равном 230 В будет проявляться только при мощности нагрузок не более 145-371 Вт (табл. 2). Следовательно, и по этому показателю ФКУ непригоден для практического применения.

Сравнительно небольшая суммарная реактивной мощность ФКУ (всего 35 ВАр) при подключении его к ЭС напряжением 230 В свидетельствует о том, что он также не осуществляет компенсацию индуктивной составляющей тока ЭС. Таким образом, работоспособность ФКУ и повышение ее эффективности может быть обеспечены только при выполнении неравенства (1).

Выводы.

1. Разработан приближенный перечень показателей, предназначенный для характеристики эффективности предлагаемых фильтркомпенсирующих установок.

2. Предложено неравенство для оперативной оценки степени работоспособности фильтркомпенсирующих установок.

3. На основе детального анализа фильтркомпенсирующей установки Дж. Арриллага показано, что она предложена без апробации на основе моделирования, является не пригодной для использования в электросетях.

Список литературы

1. Арриллага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических сетях: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. 320 с.
2. Колмаков В.О. Схемотехническое обеспечение качества электрической энергии в сетях с нелинейными электроприемниками массового применения // Автореферат дисс. на соиск. канд. техн. наук. Красноярск, 2015. 20 с.
3. Xiao Y. The method of fordesignning the third order filter // Proc. 8th IEEE Int. Conf. Harmonics and Quality of Power. Oct. 1998. Pp. 139-142.
4. Колмаков В.О. Надежность фильтркомпенсирующих устройств различной топологии // Вестник КрасГАУ. 2017. № 8. С. 55-61.
5. Довгун В.П., Егоров Д.Э., Новиков В.В., Звягинцев Е.С. Параметрический синтез широкополосных силовых фильтров // Электричество. 2018. № 12. С. 14-21.
6. Шандрыгин Д.А. Проектирование фильтркомпенсирующих устройств для электроэнергетических систем с тяговой нагрузкой // В сборнике: Борисовские чтения. Мат. III Всерос. научно-техн. конф. с Международным участием. Отв. за выпуск Е.С. Володин. Красноярск, 2021. С. 186-191.

7. Смирнов С.С. Свойства активных мощностей гармоник искажающих нагрузок // Электричество. 2010. № 9. С.45-49.

8. Валеев И.М., Альзаккар А.М.-Н. Гармоники и их влияние при определении метода компенсации реактивной мощности в электрических сетях // Вестник КГЭУ, 2020. № 1 (45). С. 24-39.

9. Коверникова Л.И., Нгуен Чи Тхань, Хамисов О.В. Оптимизационный подход к определению параметров пассивных фильтров // Электричество. 2012. № 1. С.43-49.

10. Герман Л.А., Субханвердиев К.С., Герман В.Л. Автоматизация электроснабжения тяговой сети переменного тока // Часть 1 и 2. М.: ФГБУ ДПО. Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте, 2021. 194 с.

11. Кулешова Г.С. Разработка и моделирование фильтркомпенсирующих устройств на основе индуктивно-емкостных элементов // Автореферат диссертации на соиск. канд. тех. наук. М., 2023. 20 с.

12. Тукшаитов Р.Х., Зарипов Р.К. Об одном эффективном способе снижения уровня эмиссии светодиодными лампами в электросеть высших гармоник промышленной частоты // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. 2023. № 1. С. 70-74.

УДК 621.313.3

СИНТЕЗ ОПТИМИЗИРОВАННОЙ ДВУХКОНТУРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОЗИЦИОННЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ

Федотов Владимир Владимирович, Рожков Вячеслав Владимирович
филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ»,

Смоленск, Россия

fedotov.smol67@gmail.com, umo@sbmpei.ru

Аннотация: рассматривается вариант упрощения классической трехконтурной системы подчиненного регулирования для позиционных электроприводов за счет отказа от контура скорости. Выполнен синтез регулятора положения для варианта двухконтурной системы управления. В широком диапазоне регулирования положения средствами имитационного моделирования получены лучшие показатели качества регулирования по сравнению со стандартными настройками. Предложена оригинальная структура регулятора положения. Показаны ограничения на отработку малых углов позиционирования в предлагаемой структуре. Разработаны рекомендации по расширению диапазона регулирования положения в предлагаемом варианте.

Ключевые слова: позиционный электропривод, двухконтурная система управления, точность, быстродействие, компьютерное моделирование.