

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Воробьев Г.А., Похолков Ю.П., Королев Ю.Д., Меркулов В.И. Физика диэлектриков (область сильных полей). – Томск: Изд-во ТПУ, 2003. – 244 с.
2. Кучинский Г.С. Частичные разряды в высоковольтных конструкциях. – Л.: Энергия, 1979. – 223 с.
3. Койков С.Н., Цикин А.Н. Электрическое старение твердых диэлектриков и надежность диэлектрических деталей. – М.; Л.: Энергия, 1968. – 287 с.
4. Меркулов В.И., Почивалова А.В. Особенности разряда на границе раздела твердых слоистых диэлектриков // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 313. – № 2. – С. 91–94.
5. Лысенко А.Н. Электрическая прочность границы раздела полимерной композиционной изоляции: дис. ... канд. техн. наук. – Томск, 1986. – 168 с.
6. Электроизоляционные материалы // Каталог группы компаний по поставке электроизоляционных материалов. 2010. URL: <http://www.electroelmika.ru/catalog> (дата обращения: 25.01.2011).
7. ELCUT® Программа моделирования электромагнитных, тепловых и механических задач. Производственный кооператив ТОР, г. Санкт-Петербург, URL: <http://www.elcut.ru> (дата обращения: 02.10.2012).
8. Гефле О.С., Лебедев С.М., Похолков Ю.П. Барьерный эффект в диэлектриках. – Томск: Изд-во «ТМЛ-Пресс», 2007. – 172 с.
9. Резвых К.А. Расчет электростатических полей. – М.: Энергия, 1967. – 120 с.

Поступила 15.11.2012 г.

УДК 621.311.1.016

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Н.Н. Харлов, Т.Б. Акимжанов

Томский политехнический университет  
E-mail: rcr@tpu.ru

*Исследовано изменение активного сопротивления фильтровых реакторов при регулировании их индуктивности. Установлено, что в реакторах помимо омического сопротивления, зависящего от количества витков, имеются составляющие, зависящие от поверхностного эффекта, гистерезиса, вихревых токов. Также произведена оценка эффективности работы фильтрокомпенсирующих устройств на основе данных, полученных при их инструментальном обследовании. Сделан вывод о необходимости учета изменения перечисленных параметров при проектировании и настройке фильтрокомпенсирующих устройств. Показано, что эффективность работы фильтрокомпенсирующих устройств может быть объективно оценена в результате суточного мониторинга режимов.*

**Ключевые слова:**

*Высшие гармоники, фильтрокомпенсирующее устройство, реактор, эффективность фильтрации.*

**Key words:**

*Higher harmonics, filter device, reactor, filtration efficiency.*

Горнодобывающая промышленность относится к одной из наиболее энергоёмких отраслей экономики. Основными электроприёмниками при этом являются подъемные машины с электроприводом постоянного тока, работающие от управляемых выпрямителей. Работа управляемых выпрямителей сопровождается потреблением из питающей сети реактивной мощности и высших гармонических составляющих тока, который, протекая по элементам предвключенной сети, вызывает искажения питающего напряжения. Несинусоидальность тока и напряжения является причиной возникновения добавочных потерь электроэнергии, износа и сокращения срока службы изоляции и электрооборудования, ухудшения работы устройств релейной защиты и автоматики и снижения надежности, и, как следствие, – экономического ущерба [1–3].

Традиционным средством борьбы с высшими гармоническими составляющими тока и напряжения является применение фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), состоящих из реактора

и комплекта конденсаторов, настраиваемых на резонансную частоту. Схема одной из цепочек ФКУ приведена на (рис. 1).

Эффективность работы ФКУ обеспечивается его настройкой на одну из частот гармонических составляющих, т. е. на частоту, при которой входное сопротивление ФКУ имеет минимальное значение. Помимо соотношения между индуктивностью и емкостью, на величину входного сопротивления фильтра влияют также:

- поверхностный эффект в проводниках реактора;
- гистерезис, вызывающий потери в магнитопроводе реактора;
- вихревые токи в магнитопроводе реактора;
- зависимость индуктивного сопротивления от насыщения стали магнитопровода реактора.

Угол диэлектрических потерь  $\text{tg}\delta$  и диэлектрическая проницаемость  $\epsilon$  изоляции конденсаторов, используемых в конструкции ФКУ, до частот  $10^3$ – $10^4$  Гц сохраняются неизменными и не влияют на величину входного сопротивления фильтра [4].

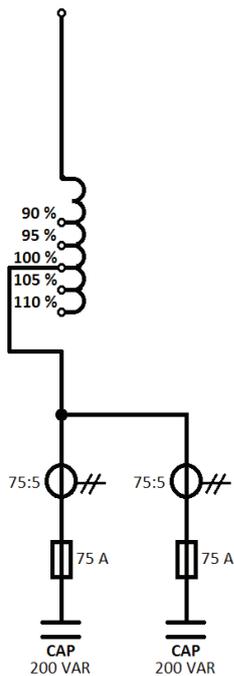


Рис. 1. Схема фильтрокомпенсирующего устройства

В связи с вышеизложенным возникает необходимость исследования влияния различных факторов на входное сопротивление реактора. Для практических нужд немаловажным мероприятием является достоверная оценка эффективности работы ФКУ путем инструментального обследования.

Цель работы – проанализировать технические характеристики фильтровых реакторов на основе паспортных данных и экспериментально исследовать эффективность настройки ФКУ.

В настоящей статье в качестве объекта исследования были приняты фильтровые реакторы серии ФРОС. Их заводские данные представлены в табл. 1. Данные реакторы предназначены для фильтров высших гармоник на стороне переменного тока систем электроснабжения промышленных пред-

приятий. Обмотки реактора обеспечивают регулирование индуктивности в отключенном состоянии ступенями не более чем по 1,5 % на ступень.

Результаты исследования эквивалентного сопротивления реактора в диапазоне регулирования обобщены в табл. 1. Из таблицы видно, что, например, для реактора ФРОС-100/6УЗ при частоте настройки на 5 гармонику нижний предел индуктивности составляет 12 мГн. При изменении ее до верхнего предела в 15 мГн (в среднем на 25 %), требуемое увеличение количества витков обмотки составляет  $\sqrt{1,25}$  [5]. Это вызывает повышение омического сопротивления на частоте настройки на 11,8 %.

Можно полагать, что на частоте высших гармоник, в данном случае на пятой гармонике, проявляется поверхностный эффект, вызывающий рост омического сопротивления реактора на величину  $\sqrt{5}$  [6], в результате активное сопротивление с учетом поверхностного эффекта повышается на 223,6 %. Расчет эквивалентного сопротивления, выполненный на основе данных о действующих токах и полных потерях на частоте настройки реактора, показывает, что при переключении реактора со ступени минимальной индуктивности на ступень максимальной индуктивности, эквивалентное активное сопротивление его возрастает на 92 %. Отсюда следует, что в действительности, при переключении реактора со ступени минимальной индуктивности на максимальную, сопротивление его повысится не на 11,8 %, а на 92 %.

Такое увеличение сопротивления имеет место из-за роста потокоцепления обмотки. Вследствие этого происходит нарушение настройки ФКУ.

Ниже приводятся результаты экспериментальной оценки эффективности работы таких фильтров на одном из горнодобывающих предприятий Российской Федерации.

На рассматриваемом предприятии эксплуатируются электродвигатели постоянного тока с номинальным напряжением 6 кВ, характеристики которых приведены в табл. 2.

Таблица 1. Технические данные фильтровых реакторов серии ФРОС. Повышение сопротивления фильтра, обусловленное изменением индуктивности реактора от ступени минимального значения до максимального

Типы реакторов	Значения индуктивности в диапазоне регулирования, мГн			Номинальный ток, А			Полные потери при $t=115^\circ\text{C}$ в диапазоне регулирования индуктивности, Вт, не более				Диапазон изменения омического сопротивления, %		Изменение эквивалентного сопротивления реактора, Ом									
	Гармоника частоты настройки	Значения индуктивности в диапазоне регулирования, мГн		Действующее значение полного тока	Действующее значение по первой гармонике (50 Гц)	Действующее значение по гармонике частоты настройки	Ступень минимальной индуктивности		Ступень максимальной индуктивности		Диапазон регулирования индуктивности, %	Диапазон изменения омического сопротивления, %	Ступень минимальной индуктивности				Ступень максимальной индуктивности					
		Нижний предел, не более	Верхний предел, не менее				На частоте настройки	На частоте 50 Гц	На частоте настройки	На частоте 50 Гц			На частоте 50 Гц	На частоте настройки	Увеличение, %		Увеличение, %					
													Увеличение, %		Увеличение, %							
ФРОС-100/6УЗ	5	12	15	80	55	55	650	280	1250	400	25,0	11,8	0,093	0,215	232,1	223,6	8,5	0,132	0,413	312,500	223,607	88,893
ФРОС-160/6УЗ	5	9	11,2	105	75	75	975	400	1800	550	24,4	11,6	0,071	0,173	243,8	223,6	20,1	0,098	0,320	327,273	223,607	103,666
ФРОС-160/6УЗ	5	6	7,5	155	110	110	1550	550	2600	750	25,0	11,8	0,045	0,128	281,8	223,6	58,2	0,062	0,215	346,667	223,607	123,060
ФРОС-100/6УЗ	7	6	7,5	80	55	55	600	210	1000	350	25,0	11,8	0,069	0,198	285,7	264,6	21,1	0,116	0,331	285,714	264,575	21,139
ФРОС-100/6УЗ	7	4,5	5,7	105	75	75	850	300	1550	550	26,7	12,5	0,053	0,151	283,3	264,6	18,8	0,098	0,276	281,818	264,575	17,243
ФРОС-160/6УЗ	7	3	3,7	155	110	110	1300	400	2200	650	23,3	11,1	0,033	0,107	325,0	264,6	60,4	0,054	0,182	338,462	264,575	73,886

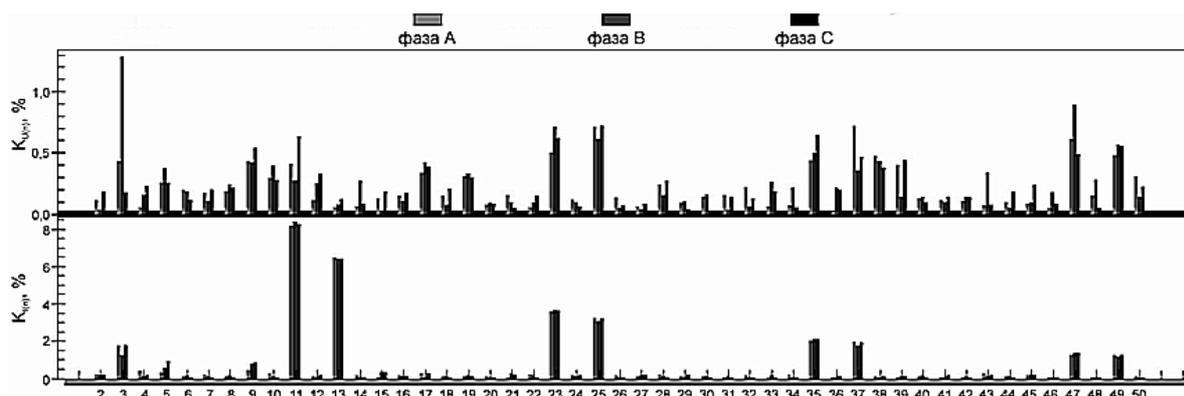


Рис. 2. Спектральный состав токов электродвигателя скипового подъема скипового ствoла (12-пульсная схема выпрямления)

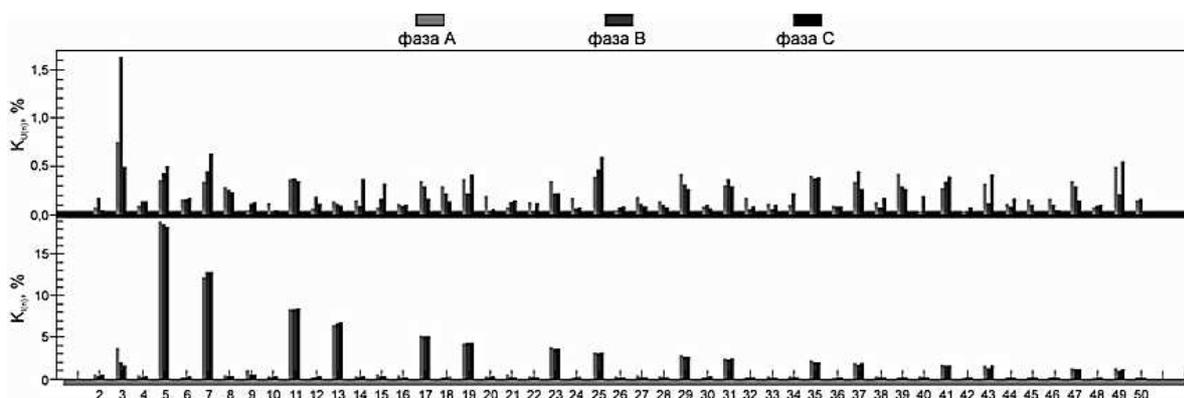


Рис. 3. Спектральный состав токов электродвигателя клетьевого подъема скипового ствoла (6-пульсная схема выпрямления)

Таблица 2. Характеристики электродвигателей производственных механизмов

Производственный механизм, потребитель	Марка двигателя	Номинальная мощность, кВт	КПД, %
Скиповый подъем клетьевого ствoла	П2Ш-630-215-4КУХЛ4	1500	85,7
Клетьевого подъем клетьевого ствoла	П2Ш-630-214-4КУХЛ4	850	85,4
Скиповый подъем скипового ствoла	П2Ш-300-253-7КУХЛ4	2800	90,9
Клетьевого подъем скипового ствoла	П2Ш-630-215-4КУХЛ4	1500	85,5

Выпрямительный агрегат, питающий скиповый подъем скипового ствoла, выполнен по 12-пульсной схеме и генерирует в сеть высшие гармоники следующего порядка (рис. 2): 11, 13, 23, 25, 35, 37. Клетьевого подъем скипового ствoла питается от выпрямителя, выполненного по 6-пульсной схеме; его работа сопровождается генерацией в сеть 5, 7, 11, 13, 17, 19 и 23 гармоник (рис. 3).

Как видно из рис. 2 и 3, наибольшее значение имеют высшие гармоники 5, 7, 11 и 13 порядков, для минимизации которых на секционных шинах установлены параллельные ФКУ, каждое из которых состоит из четырех фильтров настроенных на частоту 250, 350, 550 и 650 Гц.

Для данного ФКУ произведен расчет модуля входной проводимости на относительных частотах

гармонических составляющих от 0,5 до 16. Более детально данная зависимость показана на (рис. 4) в логарифмической системе координат.



Рис. 4. Зависимость модуля входной проводимости ФКУ от относительной частоты при использовании логарифмической шкалы

На рис. 4 видно, что максимумы частотной характеристики не всегда соответствуют относительной частоте, на которую должен быть настроен фильтр. Для точной настройки ФКУ возможно использовать отпайки фильтрового реактора.

Главным показателем эффективности работы ФКУ является соотношение между величиной тока гармонической составляющей частоты настройки фильтра и гармонической составляющей той же частоты, но потребляемой из питающей системы. Та-

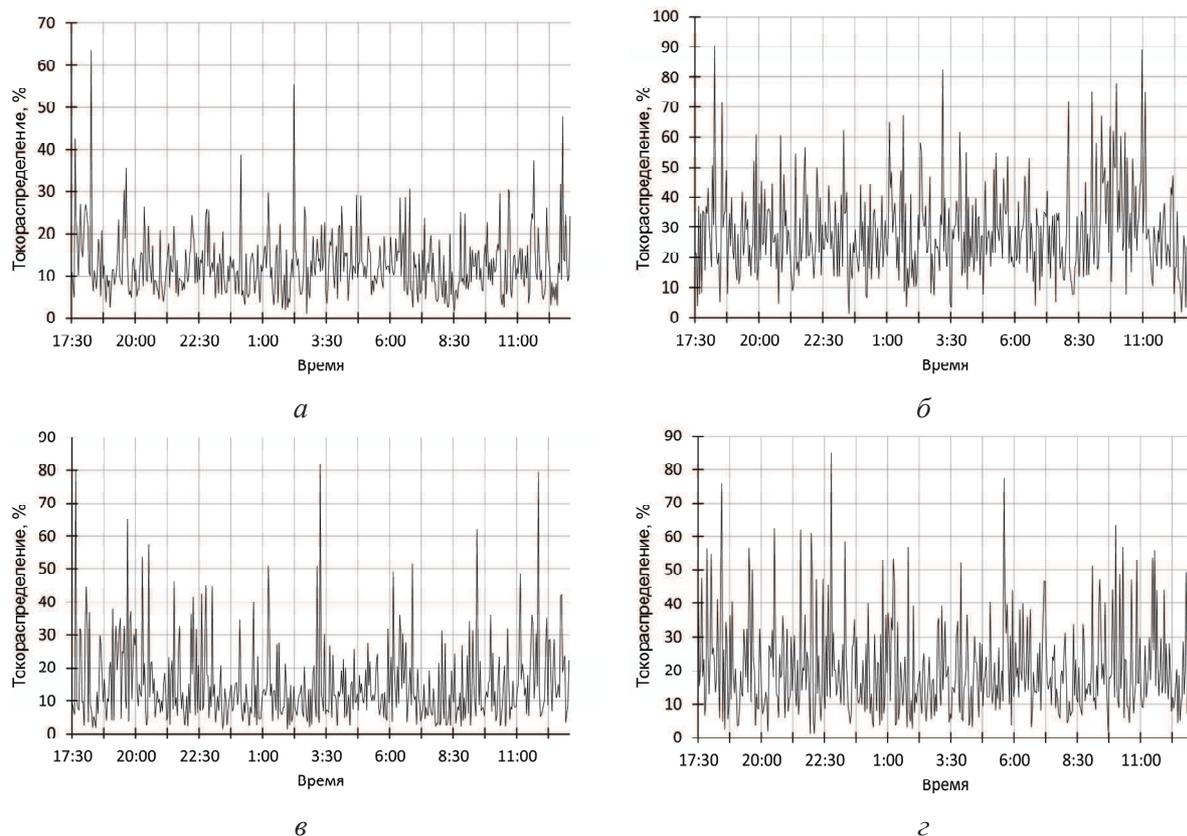


Рис. 5. Токораспределение для системы электроснабжения: а) пятая; б) седьмая; в) одиннадцатая; г) тринадцатая гармоника

ким образом, показателем эффективности ФКУ на частоте настройки является коэффициент токораспределения. В идеале, при правильной настройке фильтра, ток частоты настройки, потребляемый из системы, должен быть равен нулю, а ток частоты настройки, идущий через фильтр, должен быть равен току той же частоты, но создаваемый нелинейной нагрузкой. Такое соотношение будет иметь место тогда, когда реактивная составляющая проводимости фильтра на частоте настройки будет максимальна, а в идеале – стремиться к бесконечности.

На рис. 5, а показано соотношение между величиной тока пятой гармонической составляющей фильтра и тока пятой гармоники, потребляемой из питающей системы для фазы А. Видно, что в течение суток ток 5-ой гармоники фильтра остается значительно больше, чем ток той же гармоники, но потребляемый из системы, что говорит о достаточно хорошей настройке фильтра на частоте 250 Гц.

На рис. 5, б соотношение между токами седьмой гармоники фильтра и системы выглядит несколько хуже, поскольку ток седьмой гармоники, протекающий через фильтр, незначительно превосходит ток седьмой гармоники, потребляемый из системы. Это говорит о необходимости подстройки цепочки фильтра, настроенной на частоту 350 Гц.

Похожие результаты получены и для фильтров одиннадцатой и тринадцатой гармоник (рис. 5, в, г). Здесь также имеется незначительное различие между величиной токов, протекающих через фильтр и потребляемых из системы (табл. 3).

Таблица 3. Средние значения токораспределения в течение суток

Гармоника частоты настройки фильтра	5	7	11	13
Среднее значение токораспределения ФКУ 1, %	12,6	28,4	14,8	20,3
Среднее значение токораспределения ФКУ 2, %	9,8	16,9	8,7	13,5

Из табл. 3 видно, что фильтр седьмой гармоники пропускает в питающую систему в среднем 28,4 % тока. Это говорит о необходимости уменьшения сопротивления ФКУ путем переключения отпайки реактора на ступень ниже. Эффективность второго ФКУ выше, чем первого.

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. При проектировании ФКУ для систем электроснабжения следует учитывать влияние на сопротивление реактора потерь на гистерезис, вихревые токи, поверхностный эффект, что поможет произвести более точный выбор параметров ФКУ при проектировании систем электроснабжения с нелинейной нагрузкой.
2. Инструментальная оценка эффективности работы ФКУ по показателю коэффициента токо-

распределения позволяет определить точность настройки фильтра, выявить фильтры, работающие с низкой эффективностью, произвести их подстройку.

*Авторы благодарят проф. Ушакова В.Я. за полезные советы, инженеров Регионального центра ресурсосбережения ЭНИИ ТПУ Боровикова В.С. и Волкова М.В. за предоставленные исходные данные.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аррилага Дж., Брэдли Д., Боджер П. Гармоники в электрических системах / пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с., ил.
2. Боровиков В.С., Волков М.В., Иванов В.В., Литвак В.В., Мельников В.А., Погонин А.В., Харлов Н.Н. Опыт корпоративного обследования электрических сетей Сибири. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2010. – 228 с.
3. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.
4. Стефанов К.С. Техника высоких напряжений. – Л.: Энергия. Ленингр. отд-ние, 1967. – 496 с.
5. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей: Справочная книга. 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 488 с.
6. Базуткин В.В., Дмоховская Л.Ф. Расчеты переходных процессов и перенапряжений. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 328 с.

*Поступила 28.01.2013 г.*

УДК 621.3.011.7

## ПРИМЕНЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ПРИ РЕШЕНИИ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

А.А. Сытник, К.Н. Ключка, С.Ю. Протасов

Черкасский государственный технологический университет, г. Черкассы, Украина  
E-mail: chdtu-cherkasy@ukr.net

*Показана возможность идентификации параметров электрических цепей с применением интегральных уравнений Вольтерры второго рода. Предположено, что использование интегральных динамических моделей электрических цепей в ряде случаев позволяет получать более точный результат по сравнению с традиционными методами, основанными на применении дифференциальных уравнений. Показано, что предложенный метод может быть эффективно использован при решении задач параметрической идентификации электрических цепей, при измерении входных и выходных сигналов на фоне высокочастотных помех, в том числе и шумовых.*

#### Ключевые слова:

*Электрические цепи, идентификация параметров, интегральные динамические модели.*

#### Key words:

*Electrical circuits, identification of parameters, integral dynamic models.*

#### Введение

Под идентификацией в общей теории систем понимают определение вида и количественных характеристик операторов, описывающих данную систему. При этом предусматривается, что на систему можно подавать определенные тестовые воздействия и измерять отклики на такие воздействия. Полученная информация служит основой для приближенного построения соответствующего оператора.

Если в качестве оператора, описывающего электрическую цепь, принята ее электрическая принципиальная схема, то задачей идентификации может служить определение параметров схемы. Подобная же задача возникает при диагностике цепи, то есть при определении неисправных элементов.

Задача идентификации электрических цепей является актуальной в связи с необходимостью контролировать их функционирование в процессе

эксплуатации, который, как правило, сопровождается естественным изменением параметров цепей. В таком случае фактические значения параметров определяются путем обработки экспериментальных данных, полученных при непосредственном измерении токов или напряжений в точках контроля, количество которых ограничено. Кроме того, методы идентификации применяются для получения макромоделей современных сложных электрических и электронных цепей, что позволяет упростить задачи математического моделирования при проектировании устройств и создании систем управления.

#### Постановка задачи

Традиционный подход при решении задачи параметрической идентификации предусматривает в большинстве случаев нахождение коэффициентов дифференциального уравнения электрической цепи оптимизационными методами [1]. Учитывая