



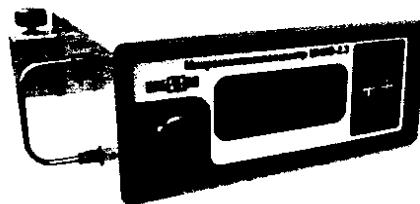
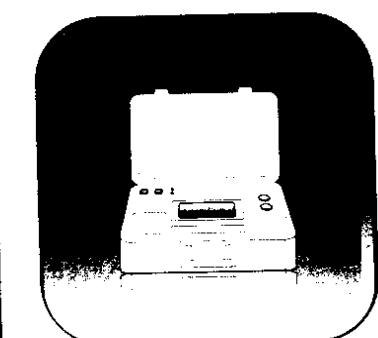
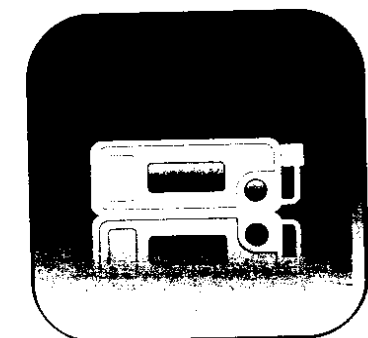
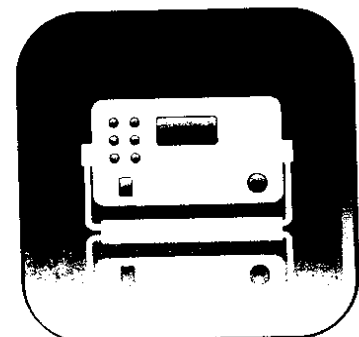
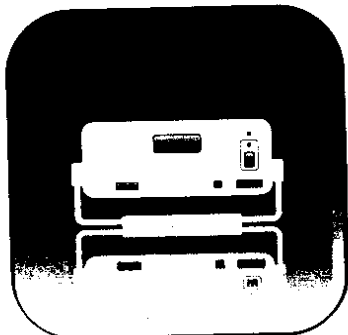
ЭНЕРГЕТИК · 3 2011

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ ПРОИЗВОДСТВЕННО-МАССОВЫЙ ЖУРНАЛ

СКБ-ЭП®

20 лет на рынке КИПиА

“Обнаружение неисправностей трансформаторов приборами ООО «СКБ ЭП»”



МИКО-2.3

Приборы **МИКО-2.3** и **ПКР-1** позволяют не только **получать достоверные данные** о трансформаторах, но и **выполнять это гораздо быстрее аналогичных устройств.**

ПКР-1



664033, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 130, оф. 235
 тел./факс: +7(3952) 42-89-21, 42-34-38, 755-607
 web: www.skbpribor.ru, skbep.pf e-mail: skbpribor@yandex.ru

Компьютерное моделирование управляемых шунтирующих реакторов различных типов и сравнение их технических характеристик

ЕВДОКУНИН Г. А., доктор техн. наук, СПбГПУ

ДМИТРИЕВ М. В., канд. техн. наук, ЗАО «Завод энергозащитных устройств» 197342, Санкт-Петербург, Красногвардейский пер., д. 8

mvdm@ya.ru

КАРПОВ А. С., НИКОЛАЕВ Р. Н., ШЕСКИН Е. Б., инженеры, СПбГПУ

Предлагается усовершенствованная методика компьютерного моделирования установившихся и переходных процессов в силовых трансформаторах и управляемых шунтирующих реакторах (УШР), которая учитывает реальную конфигурацию и размеры магнитной системы трансформатора или реактора, параметры обмоток, свойства стали. Работа программных комплексов, созданных на базе этой методики, иллюстрируется на примере решения важной практической задачи — сравнения технических характеристик двух различных по принципам действия реакторов: УШР и УШРТ (трансформаторного типа).

Ключевые слова: управляемые шунтирующие реакторы, электромагнитные переходные процессы, компьютерное моделирование, управляемые линии электропередачи.

Управляемые шунтирующие реакторы всё более широко используются в энергосистемах России и за рубежом (число установленных реакторов напряжением 110 кВ и выше превысило 50 трёхфазных групп). Наиболее распространены разработанные в России УШР с подмагничиванием постоянным током [1, 2]. Найдут применение в сетях высших классов напряжений и УШРТ [3, 4]. Основное их назначение — плавное регулирование реактивной мощности на электрических станциях и подстанциях для поддержания заданного уровня напряжения без коммутаций реакторных выключателей.

Управляемые шунтирующие реакторы, установленные на воздушных линиях (ВЛ) электропередачи, обеспечивают ограничение вынужденной составляющей напряжения на линии при одностороннем включении ВЛ, а также способствуют снижению токов подпитки в случае ОАПВ. При необходимости УШР, размещаемые на электропередачах большой протяжённости, могут снабжаться системой автоматического регулирования реактивной мощности, что позволяет повысить предел передаваемой активной мощности по условию статической устойчивости [5].

Для плавного регулирования реактивной мощности в режиме как её потребления, так и генерации широко используется параллельное соединение УШР с

нерегулируемой конденсаторной батареей. Применение УШР существенно влияет на технико-экономические показатели работы электропередачи в целом за счёт снижения потерь активной мощности и улучшения качества напряжения [6].

Методика моделирования УШР

Упрощённая конструкция однофазного УШР, представленная на рис. 1 для целей его моделирования [7–9], содержит магнитную систему, состоящую из двух полустержней 1, верхнего 2 и нижнего 3 горизонтальных ярем и двух боковых ярем 4. Обмотки управления (ОУ) 5 размещены на полустержнях, соединены попарно встречно и подключены к регулируемому источнику постоянного напряжения. Сетевая обмотка (СО) 6 охватывает два соседних полустержня с ОУ.

На рис. 2 представлено плоское изображение магнитной системы (см. рис. 1) — разрез магнитопровода и обмоток в центральном сечении. Здесь же показаны принятые положительные направления потоков в элементах магнитной системы, соответствующие определённым направлениям тока в обмотках. Магнитная цепь задаётся узлами и наиболее важными ветвями (путями) распределения магнитного потока, которые должны с минимальной погрешностью

аппроксимировать реальную картину магнитного поля.

Присвоив буквенные обозначения характерным точкам (узлам) магнитной системы А, В, С, D, получим шесть основных магнитных путей в магнитопроводе, которым соответствуют потоки $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3, \Phi_4, \Phi_5, \Phi_6$. В управляемых подмагничиванием шунтирующих реакторах нормальным рабочим режимом считается режим глубокого насыщения стали магнитопровода, что обуславливает необходимость точного учёта магнитных путей рассеяния.

Магнитным путям вне магнитопровода (см. рис. 2) соответствуют следующие потоки рассеяния: Φ_7, Φ_{10} — в воздушных цилиндрах между СО и ОУ; Φ_8, Φ_9 — в воздушных цилиндрах между ОУ и полустержнями; $\Phi_{11}, \Phi_{12}, \Phi_{13}, \Phi_{14}$ — замыкающиеся в воздушном промежутке вне магнитопровода УШР. С учётом проведённых преобразований однофазному УШР (см. рис. 2) будет соответствовать схема замещения его магнитной цепи, представленная на рис. 3, для которой запишем основные уравнения по законам Кирхгофа.

По первому закону Кирхгофа имеем три уравнения $q - 1 = 3$ (где q — число узлов расчётной схемы замещения):

$$\begin{aligned} \Phi_1 + \Phi_6 + \Phi_7 + \Phi_8 + \\ + \Phi_{14} - \Phi_3 - \Phi_{11} &= 0; \\ \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_9 + \Phi_{10} + \\ + \Phi_{11} - \Phi_4 - \Phi_{12} &= 0; \\ \Phi_4 + \Phi_{12} - \Phi_2 - \Phi_9 - \\ - \Phi_{10} - \Phi_5 - \Phi_{13} &= 0. \end{aligned}$$

По второму закону Кирхгофа получим одиннадцать уравнений $p - q + 1 = 11$ (где p — число ветвей расчётной схемы замещения):

$$\begin{aligned} H_{14}I_{14} - H_6I_6 &= 0; \\ H_6I_6 - H_7I_7 &= -F_{CO}^{(1)}; \\ H_7I_7 - H_8I_8 &= -F_{OU}^{(1)}; \\ H_8I_8 - H_1I_1 &= 0; \\ H_{11}I_{11} - H_3I_3 &= 0; \\ H_1I_1 + H_3I_3 - H_2I_2 + H_5I_5 &= F_{OU}^{(1)} + F_{OU}^{(2)}; \end{aligned}$$

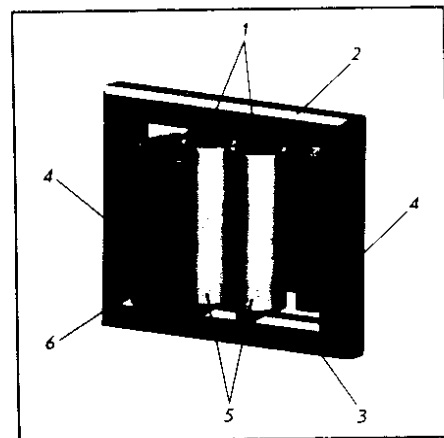


Рис. 1. Упрощённая конструкция однофазного УШР

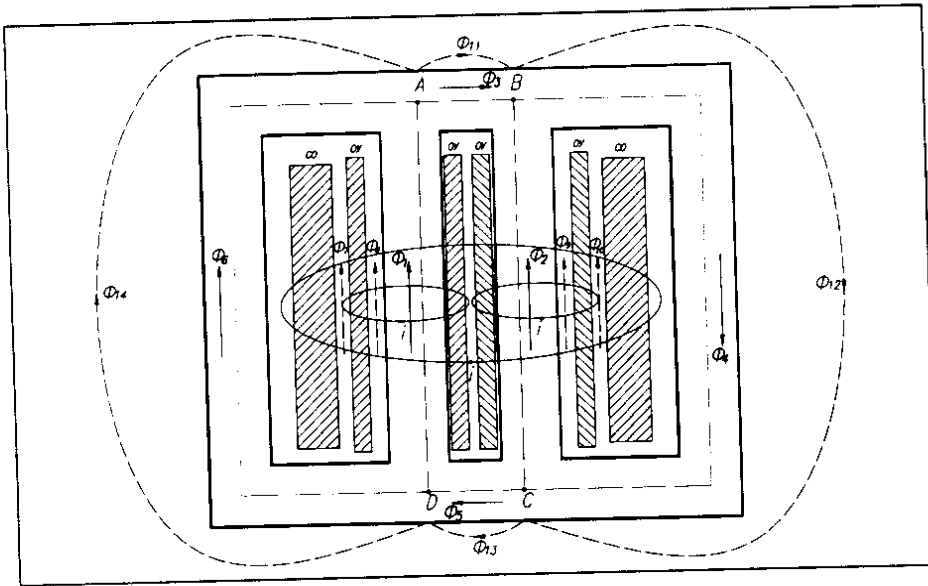


Рис. 2. Конструкция магнитопровода и обмоток УШР

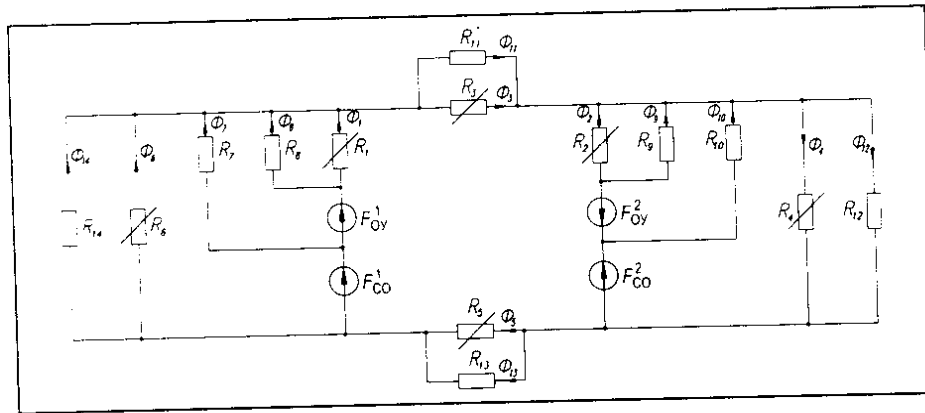


Рис. 3. Схема замещения магнитной цепи УШР

$$\begin{aligned} H_{13}I_{13} - H_{5}I_{5} &= 0; \\ H_{2}I_{2} - H_{9}I_{9} &= 0; \\ H_{9}I_{9} - H_{10}I_{10} &= -F_{OU}^{(2)}; \\ H_{10}I_{10} + H_{4}I_{4} &= F_{CO}^{(2)}; \\ H_{12}I_{12} - H_{4}I_{4} &= 0. \end{aligned}$$

Уравнения электрической и магнитной цепей должны решаться совместно:
уравнение СО

$$U_{CO} = i_{CO}R_{CO} + W_{CO} \times \frac{d(\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_7 + \Phi_8 + \Phi_9 + \Phi_{10})}{dt};$$

уравнение ОУ

$$U_{OU} = i_{OU}R_{OU} + \frac{W_{OU}}{2} \frac{d(\Phi_1 + \Phi_8)}{dt} - \frac{W_{OU}}{2} \frac{d(\Phi_2 + \Phi_9)}{dt}$$

Методика моделирования УШРТ

Упрощённая конструкция однофазного УШРТ, показанная на рис. 4, содержит магнитную систему, состоящую из стержня 1, верхнего 2 и нижнего 3 горизонтальных ярем и двух боковых ярем 4, ОУ 5, СО 6 и компенсационной обмотки (КО) 7. Аналогично предыдущей мето-

дике получим схему замещения магнитной цепи УШРТ (рис. 5).

По первому закону Кирхгофа имеем одно уравнение $q - 1 = 1$:

$$\Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_3 - \Phi_4 + \Phi_5 + \Phi_6 + \Phi_7 - \Phi_8 = 0.$$

По второму закону Кирхгофа получим семь уравнений $p - q + 1 = 7$:

$$\begin{aligned} H_{2}I_{2} - H_{4}I_{4} &= 0; \\ -H_{2}I_{2} - H_{5}I_{5} &= -F_{CO}; \\ H_{5}I_{5} - H_{6}I_{6} &= -F_{KO}; \\ H_{6}I_{6} - H_{7}I_{7} &= -F_{OU}; \\ H_{7}I_{7} - H_{1}I_{1} &= 0; \\ H_{3}I_{3} + H_{1}I_{1} &= F_{CO} + F_{KO} + F_{OU}; \\ H_{8}I_{8} - H_{3}I_{3} &= 0. \end{aligned}$$

Трёхфазная схема УШРТ, состоящая из группы однофазных реакторов, которые по СО объединены в схему «звезда», а по КО — «треугольник», показана на рис. 6. Далее приведём уравнения электрической цепи для указанных обмоток (где $j = a, b, c$):

сетевой

$$U_{COj} = R_{CO}i_{COj} + W_{CO} \times$$

$$\frac{d(\Phi_{1j} + \Phi_{5j} + \Phi_{6j} + \Phi_{7j})}{dt};$$

управления

$$U_{OUj} = R_{OU}i_{OUj} + W_{OU}(1 - \gamma_j) \frac{d(\Phi_{1j} + \Phi_{7j})}{dt};$$

компенсационной

$$R_{KO} \sum_j i_{KOj} + W_{KO} \sum_j \frac{d(\Phi_{1j} + \Phi_{6j} + \Phi_{7j})}{dt} = 0.$$

Полученные уравнения для электрической цепи УШРТ необходимо дополнить уравнениями, описывающими переходные процессы в пассивных фильтрах УШРТ, подключённых к выводам КО.

Расчёты электромагнитных переходных процессов в УШР

На рис. 7, а представлены осциллограммы переходных процессов набора мощности УШР без предварительного подмагничивания элементов магнитной системы (показаны ток I_{CO} , индукция в полустержнях В, ток I_{OU}). Набор полной мощности реактора происходит примерно за 1 с. Установившееся значение тока СО соответствует номинальной мощности реактора. Этот режим совпадает с режимом полупериодного насыщения, когда каждый из стержней насыщен в течение полупериода промышленной частоты.

Быстродействие УШР можно увеличить путём предварительного подмагничивания элементов магнитной системы постоянными потоками (например, соответствующими режиму холостого хода реактора). Как видно из рис. 7, б, это приводит к практически безынерционному выходу УШР на номинальный режим. Быстродействие УШРТ при регулировании реактивной мощности обеспечивается за счёт использования в его конструкции силовых управляемых

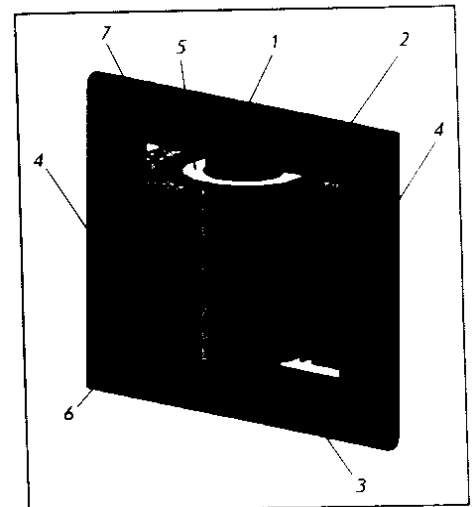


Рис. 4. Упрощённая конструкция однофазного УШРТ

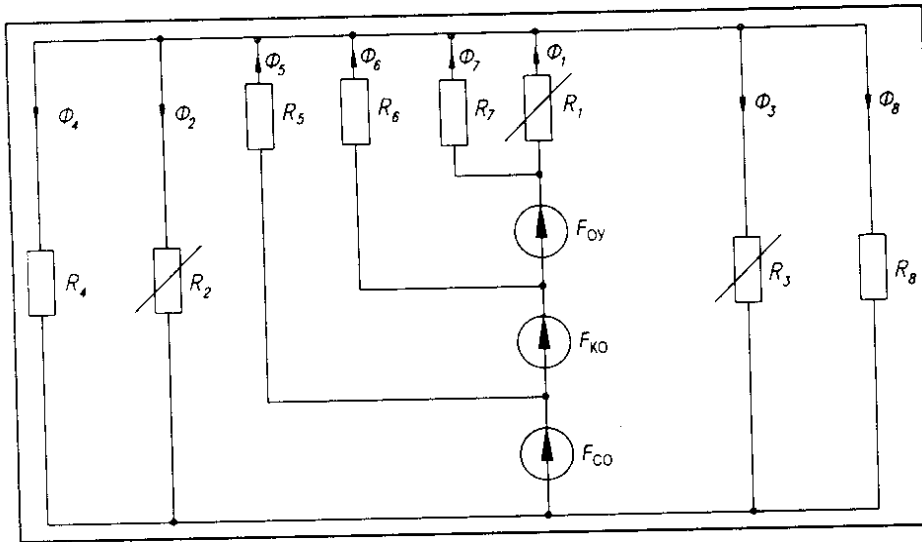


Рис. 5. Схема замещения магнитной цепи УШРТ

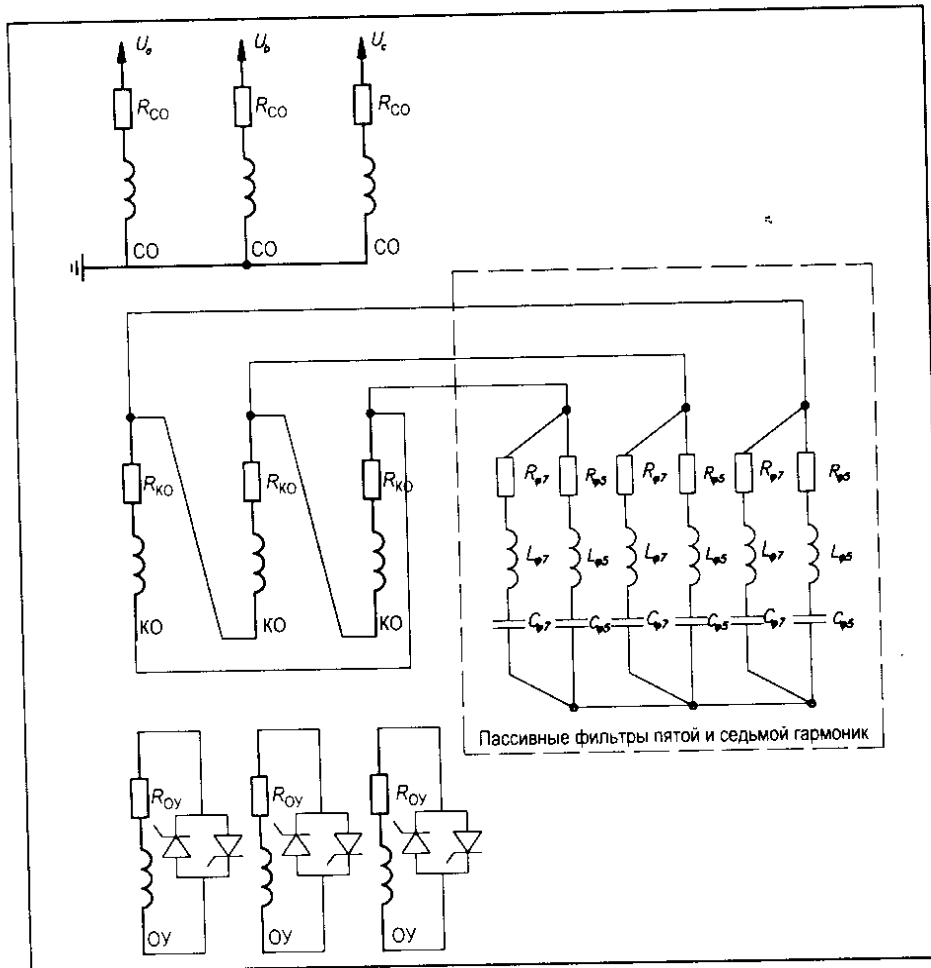


Рис. 6. Трёхфазная схема УШРТ

вентилей, рассчитанных на полную мощность реактора.

На рис. 8, а представлен ток I_{CO} — результат расчёта установившегося режима потребления примерно 50 %-ной номинальной мощности УШРТ при угле регулирования тиристоров $\alpha = 30^\circ$. Из рисунка видно, что для компенсации значительных искажений сетевого тока этого реактора необходима дополнитель-

ная установка довольно мощных пассивных фильтров.

Распространённое мнение о том, что мощные конденсаторные батареи фильтров можно использовать как источник реактивной мощности, неоправдано, поскольку, например, в случае применения УШРТ в качестве шунтирующего реактора для компенсации зарядной мощности ВЛ высокого напря-

жения такая функция от реактора не требуется.

Что касается УШР с подмагничиванием, то их работа в зоне глубокого насыщения стали позволяет отказаться от мощных средств компенсации высших гармонических составляющих. На рис. 8, б представлен ток I_{CO} — результат расчёта установившегося режима потребления 50 %-ной реактивной мощности УШР без фильтров компенсации.

Реакторы УШР и УШРТ выполняют похожие функции, однако это достигается различными способами, что приводит и к различным характеристикам рассмотренных устройств, например, в отношении быстродействия. Уже сейчас понятно, что каждый тип реакторов должен иметь свою собственную область применения в энергосистеме. Например, для шунтирующих реакторов на ВЛ 330 кВ и выше особое быстродействие не требуется, поэтому УШР могут применяться даже без систем начального подмагничивания и форсировки.

В то же время УШРТ несомненно предпочтительнее, например, в схемах питания трансформаторов (совместно с нерегулируемой конденсаторной батареей) для электросталеплавильных печей. Очевидно также, что компетентные организации уже сейчас должны обращаться в научные организации за обоснованием эффективности применения того или иного реактора (тем более, что уже разработан ещё один управляемый реактор оригинальной конструкции УШРАТ — автотрансформаторного типа).

Выводы

1. Большая инерционность УШР по сравнению с УШРТ (при минимальной мощности источника подмагничивания и отсутствии начального подмагничивания в УШР) — одно из самых распространённых мнений. Однако в статье показано, что применение технически несложных мероприятий в системе управления позволяет обеспечить достаточное для многих целей быстродействие реактора. К этим мероприятиям относятся:

форсировка, снижающая постоянную времени реактора τ до 0,1 с как для набора, так и для сброса мощности;

предварительное подмагничивание элементов магнитной системы, позволяющее обеспечить практически безынерционный выход устройства на номинальный режим.

2. Небольшая мощность системы управления (до 1 % номинальной мощности реактора) является несомненным преимуществом реакторов с подмагничиванием. Работа последних в зоне глубокого насыщения материала магнитопровода позволяет отказаться от применения мощных устройств компенсации высших гармонических составляющих или ограничиться маломощными пассивными фильтрами, которые подключаются к Ю.

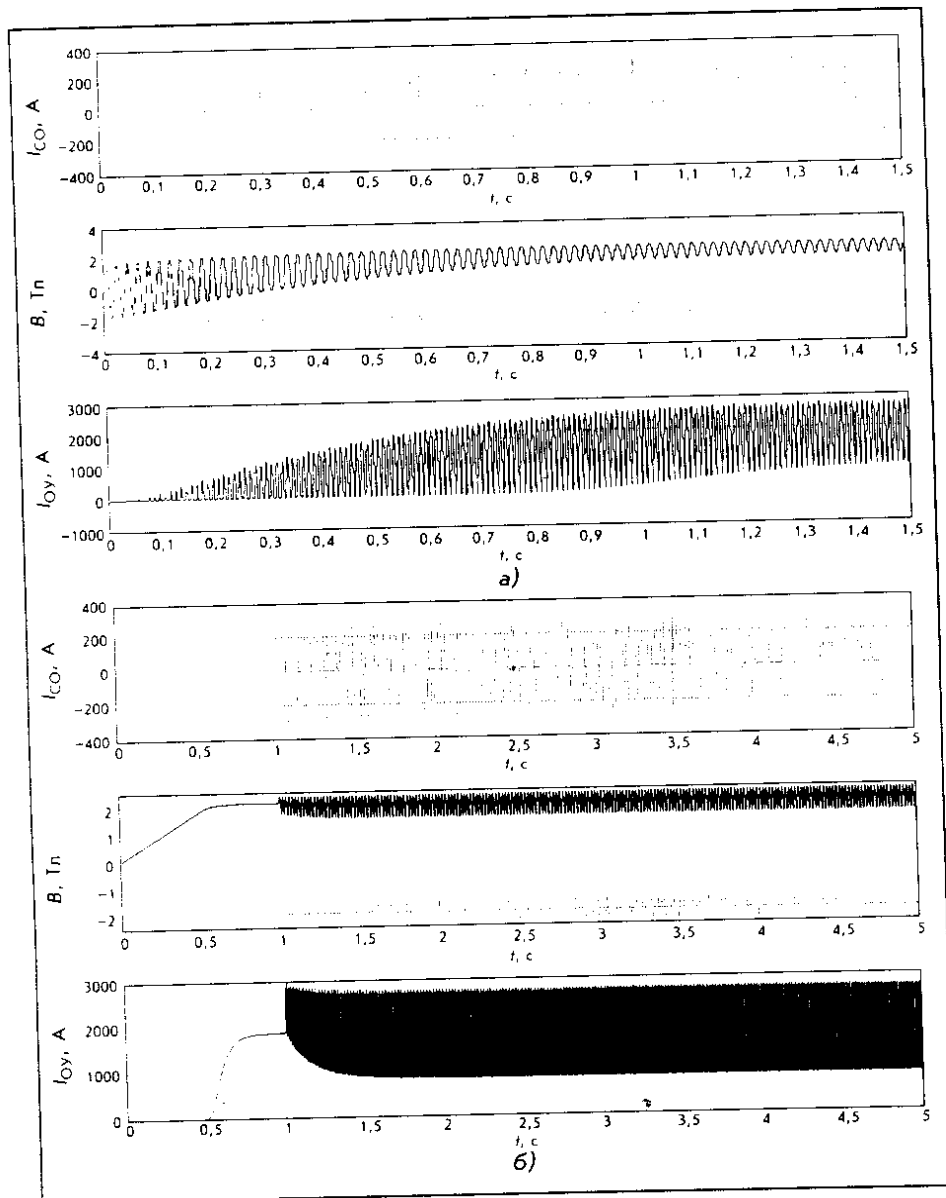


Рис. 7. Осциллограммы переходных процессов набора мощности УШР без предварительного подмагничивания элементов магнитной системы (а) и с таковым (б)

3. Управляемые шунтирующие реакторы трансформаторного типа — уникальные быстродействующие устройства, в которых любое изменение режима работы происходит практически мгновенно — в течение периода промышленной частоты. Такое быстродействие удаётся получить вследствие применения мощных полупроводниковых тиристорных ключей, подключённых к ОУ, а также оригинальной конструкции устройства. Однако в последнем мощность блока управления равна мощности самого УШРТ, что значительно увеличивает стоимость реактора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Управляемые подмагничиванием электрические реакторы: сб. статей / Под ред. А. М. Брянцева. — М.: Знак, 2004.

2. Управляемые подмагничиванием шунтирующие реакторы для сетей 35 – 500 кВ / А. М. Брянец, А. Г. Долгополов, Г. А. Евдокунин и др. // Электротехника. 2003. № 1. С. 5 – 13.

3. Александров Г. Н. Быстродействующий управляемый реактор трансформаторного типа 420 кВ, 50 Мвар пущен в эксплуатацию // Электричество. 2002. № 3.

4. Чуприков В. С., Мологин Д. С. Реализация пилотного проекта CSRT (УШРТ) в энергосистеме Norte de Angola // Энергоэксперт. 2010. № 1. С. 72 – 78.

5. Евдокунин Г. А. Статическая устойчивость режимов электропередачи с управляемыми шунтирующими реакторами // Энергоэксперт. 2009. № 6. С. 48 – 52.

6. Евдокунин Г. А., Смоловик С. В. Оценка эффективности снижения потерь активной мощности в элементах электропередачи при применении управляемых шунтирующих реакторов // Энергоэксперт. 2008. № 4. С. 76 – 79.

7. Метод расчёта на ЭВМ электромагнитных переходных процессов в ферро-

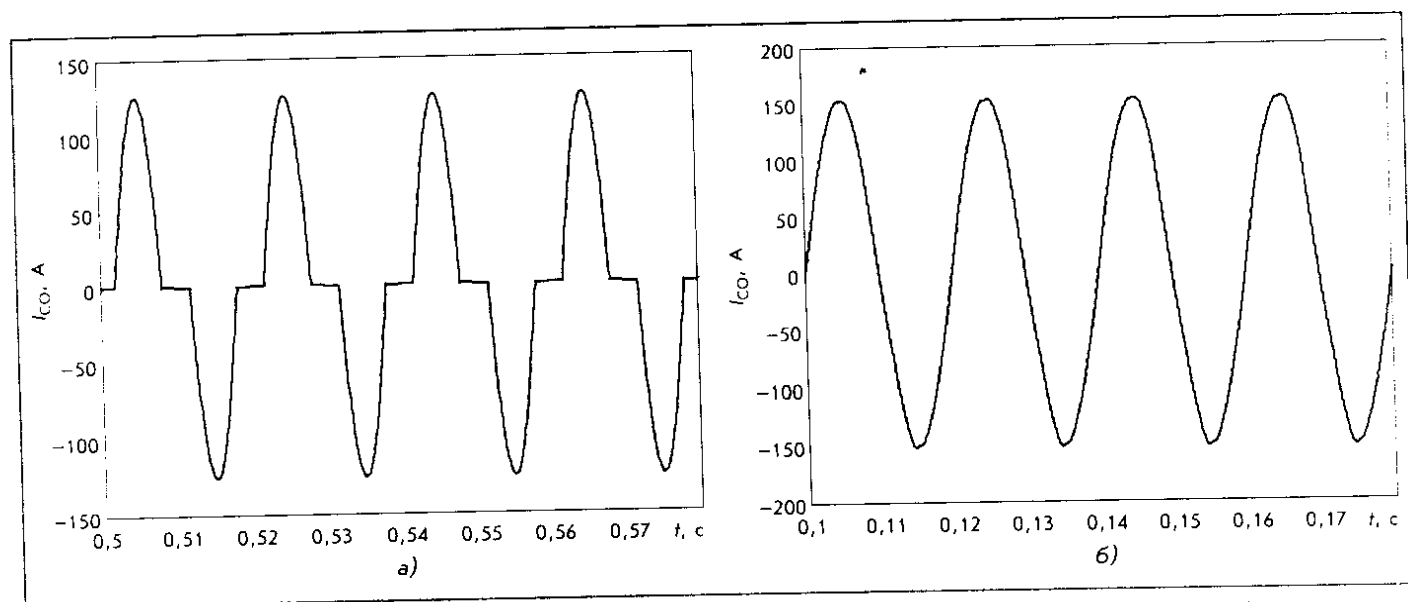


Рис. 8. Графики токов I_{CO} при расчёте установившегося режима потребления 50 %-ной номинальной мощности УШР (а) и 50 %-ной реактивной мощности УШР без фильтров компенсации (б)

магнитных устройствах с произвольной структурой магнитной и электрической цепей / Г. А. Евдокунин, Е. В. Коршунов, Э. А. Селпинг, Я. Я. Ярвик // Электротехника. 1991. № 2. С. 56 – 59.

8. Евдокунин Г. А., Дмитриев М. В. Моделирование переходных процессов в электрической сети, содержащей транс-

форматоры при учёте конфигурации их магнитной системы // Известия РАН. Энергетика. 2009. № 2. С. 37 – 48.

9. Евдокунин Г. А., Николаев Р. Н. Моделирование и анализ переходных процессов в трансформаторах // Науч.-техн. ведомости СПбГПУ. 2009. № 4 – 1 (89). С. 207 – 215.

все параметры надёжности устройства с учётом экономического ущерба, вызываемого любым видом отказа.

Для данных целей было предложено [1] использовать КПН — отношение потерь выходного эффекта устройства из-за его отказов функционирования (не-надёжности) к предельному выходному эффекту идеализированного устройства в предположении его абсолютной безотказности и технического совершенства:

$$F(t) = \Delta\Phi_n(t)/\Phi_n(t). \quad (1)$$

Потери выходного эффекта определяются выражением:

$$\Delta\Phi_n(t) = n_{o.c}(t)\Phi_{o.c} + n_{n.c}(t)\Phi_{n.c} + n_{n.c'}(t)\Phi_{n.c'} \quad (2)$$

где $n_{o.c}$, $n_{n.c}$, $n_{n.c'}$ — число отказов срабатывания, излишних срабатываний, ложных срабатываний соответственно; t — период функционирования, в течение которого осуществляется оценка показателей надёжности; $\Phi_{o.c}$, $\Phi_{n.c}$, $\Phi_{n.c'}$ — ущербы, соответствующие отказам.

Для идеализированного устройства с абсолютной надёжностью КПН равен нулю.

Комплексный показатель надёжности

Потери приведённого в документе [2] выходного эффекта защиты делятся на следующие виды при условиях:

- полных отказов срабатывания основных и резервных защит;
- отказов срабатывания основных защит и эффективного действия резервных;
- излишних срабатываний защит элементов энергосистемы в случае КЗ на смежных элементах (отказы несрабатывания при внешних КЗ);
- ложных срабатываний защит (отказы несрабатывания без КЗ);
- срабатывания основных защит с нерасчётными параметрами, например, в результате задержки срабатывания по времени.

Такой подход позволяет оценивать надёжность функционирования как всего комплекса РЗ, участвующего в устранении КЗ, так и отдельных устройств. В каждом случае потерянный эффект из-за отказа функционирования защиты может быть выражен некоторым значением Φ . Идеализированный комплекс РЗ характеризуется надёжным отключением всех КЗ в защищаемой зоне со временем срабатывания, не превышающим заданную уставку, что и формирует в итоге экономический эффект от её действия. Поэтому предельный экономический эффект от работы РЗ будет равен недополученному эффекту (ущербу) при отсутствии РЗ или (что то же самое) в случае отказов срабатывания при всех внутренних КЗ:

$$\Phi_n(t) = \Phi_{KЗ\text{ внут}}(t)\Phi_{o.c} = \omega_{KЗ\text{ внут}}t\Phi_{o.c}. \quad (3)$$

Используя выражение (2), преобразуем формулу (3):

$$\Delta\Phi_n(t) = n_{o.c}(t)\Phi_{o.c} + n_{n.c}(t)\Phi_{n.c} +$$

Использование комплексного показателя надёжности для оценки эффективности схем резервирования релейной защиты

АНОШИН А. О., инженер, БАРАБАНОВ Ю. А., канд. техн. наук, МЭИ (ТУ)
111250, Москва, Красноказарменная ул., д. 14
aao@energyexpert.ru

Предлагается оценивать и сравнивать надёжность схем резервирования по комплексному показателю надёжности (КПН). Последний учитывает экономический ущерб от несрабатывания при повреждении на защищаемом элементе, от излишнего срабатывания при повреждении вне защищаемой зоны и от ложного срабатывания, а также потоки повреждений внутри защищаемой зоны и вне её.

Ключевые слова: релейная защита, надёжность, структурное резервирование, комплексный показатель надёжности.

Релейная защита (РЗ) от коротких замыканий (КЗ) обычно выполняется в виде автономных устройств, размещаемых на элементах электрической системы, которые реагируют на КЗ в заданных зонах и действуют на выключатели этих элементов. В условиях эксплуатации заданные функции могут быть не задействованы по причине, например, отказа элементов защиты. Различают следующие виды отказов функционирования защиты:

- несрабатывания при повреждениях на защищаемом объекте в случае требования срабатывания;
- излишние срабатывания при повреждениях вне защищаемого объекта в случае требования несрабатывания;
- ложные срабатывания в нагрузочных режимах работы.

Функционирование РЗ характеризуется длительным периодом ожидания, когда защищаемый объект находится в нагрузочном режиме и к РЗ не предъявлено требование срабатывания, что воспринимается как выполнение «пассивной» функции несрабатывания. Требование выполнения «активной» функции срабатывания возникает только на отдельных интервалах времени существования аварийного режима защищаемого объекта. Поэтому следует различать аппаратные отказы элементов защиты и отказы её функционирования.

Аппаратный отказ элемента защиты, который, например, может привести к отказу срабатывания при внутреннем КЗ, проявится только при сочетании такого отказа и реального КЗ на защищаемом элементе. Если до возникновения КЗ произойдёт восстановление защиты, на-

пример, при профилактическом обслуживании, аппаратный отказ не перейдёт в отказ функционирования и останется без последствий.

Надёжность функционирования РЗ оценивается следующими показателями [1]:

- коэффициентом неготовности по функции срабатывания при внутренних КЗ;
- коэффициентом неготовности по функции несрабатывания при внешних КЗ;
- параметром потока ложных срабатываний в режиме без КЗ.

Большинство отказов функционирования устаревших на сегодняшний день электромеханических защит было связано с отказами срабатывания при внутренних КЗ на защищаемом элементе. Это в свою очередь определено конструкцией реле, где возможны перегорание катушек, ненадёжное замыкание контактов и пр. С учётом изложенного наиболее информативным параметром оценки надёжности был коэффициент неготовности по функции срабатывания при внутренних КЗ. На основании сравнения данного коэффициента в разных схемах можно было выбрать нужную схему резервирования. И, как правило, это была схема «ИЛИ», поскольку её применение обеспечивает снижение указанного коэффициента неготовности.

Для микропроцессорных защит распределение частоты отказов по видам более равномерно по сравнению с электромеханическими защитами в связи с отсутствием подвижных элементов, которые наиболее подвержены отказам. Поэтому для оценки надёжности современной системы РЗ необходимо учитывать