

УДК 621.311.42

МЕТОД УРАВНИВАНИЯ МОЩНОСТЕЙ НА ВТОРИЧНЫХ ОБМОТКАХ ТРАНСФОРМАТОРОВ СКОТТА

В.З. Манусов, П.В. Морозов

Новосибирский государственный технический университет

E-mail: kettle@ngs.ru

Предложено применение электронного устройства уравнивания мощности на вторичных обмотках трансформаторного преобразователя на основе схемы Скотта. Проведено моделирование устройства на основе тиристорных мостов со средней точкой, управляемых с помощью многоуровневой широтно-импульсной модуляции. Подтверждено обеспечение полного равенства токов во вторичных обмотках трансформатора Скотта, которое обеспечивает полную симметрию токов в трехфазной сети.

Ключевые слова:

Трехфазная сеть, трансформаторный преобразователь Скотта, автоматическое управление, уравнивание мощности, несимметрия.

Key words:

Three-phase grid, Scott-transformer, automatic control, power equalization, unbalance.

Система электроснабжения скоростной железной дороги переменного тока (2–25 кВ) является сложной многофазной нагрузкой трехфазной сети, ибо количество фаз такой нагрузки не кратно трем (как правило, две). Данное обстоятельство не позволяет применять стандартные преобразователи энергии с количеством фаз, кратным трем [1], для уменьшения токовой несимметрии в трехфазной сети при резко переменных нагрузках. Наименьшую (нулевую) несимметрию дает трехфазно-двухфазный трансформатор Скотта при равных нагрузках на вторичных обмотках [2]. Равенство нагрузок означает равенство активных мощностей на этих обмотках. В случае неравенства мощностей, например, при внезапном появлении или исчезновении нагрузки, токовая несимметрия в трехфазной сети становится неравной нулю.

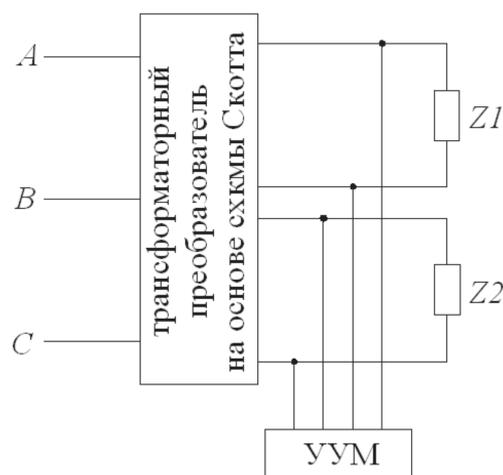


Рис. 1. Трансформаторный преобразователь Скотта с УУМ

Следовательно, в данном случае для снижения несимметрии необходимо обеспечить активное управление распределением мощностей между обмотками (рис. 1). Для этого предложено параллельно вторичным обмоткам трансформатора Скотта включить устройство уравнивания мощностей (УУМ).

УУМ предназначено для равномерного распределения мощности между вторичными обмотками (фазами) трансформаторного преобразователя на основе схемы Скотта при быстро изменяющихся нагрузках (рис. 2).

Устройство уравнивания мощности состоит из конденсаторной батареи C , двух мостов из коммутационных элементов M_j , где $j=1,2,\dots$ – номера фаз (вторичных обмоток трансформатора Скотта), реакторов L_j . УУМ включается параллельно вторичным обмоткам трансформатора Скотта, которые заменены источниками гармонического напряжения U_{sj} . В первом приближении коммутационные элементы, например, тиристоры или биполярные транзисторы с изолированным затвором приняты идеальными. Тяговые нагрузки заменены эквивалентным сопротивлением Z_j . Так как УУМ должно обеспечивать равенство мощностей на вторичных обмотках трансформатора Скотта, то мощность УУМ должна удовлетворять условию:

$$P_M = (P_{Z1} + P_{Z2}) / 2,$$

где P_{Z1} , P_{Z2} – мощности эквивалентных нагрузок.

Данное уравнение баланса мощностей выполняется при токах во вторичных обмотках трансформатора Скотта, равных

$$i_{s1} = \sqrt{2} I_s \cos(\omega t);$$

$$i_{s2} = \sqrt{2} I_s \sin(\omega t),$$

где I_s – среднеквадратический ток.

Пусть токи нагрузок равны

$$i_{z1} = \sqrt{2} I_1 \cos(\omega t - \varphi_1) = \\ = \sqrt{2} I_1 (\cos(\varphi_1) \cos(\omega t) + \sin(\varphi_1) \sin(\omega t)),$$

$$i_{z2} = \sqrt{2} I_2 \sin(\omega t - \varphi_2) = \\ = \sqrt{2} I_2 (\cos(\varphi_2) \sin(\omega t) + \sin(\varphi_2) \cos(\omega t)),$$

где I_1 , I_2 – токи в нагрузках; φ_1 , φ_2 – фазовые сдвиги токов в нагрузках относительно напряжений.

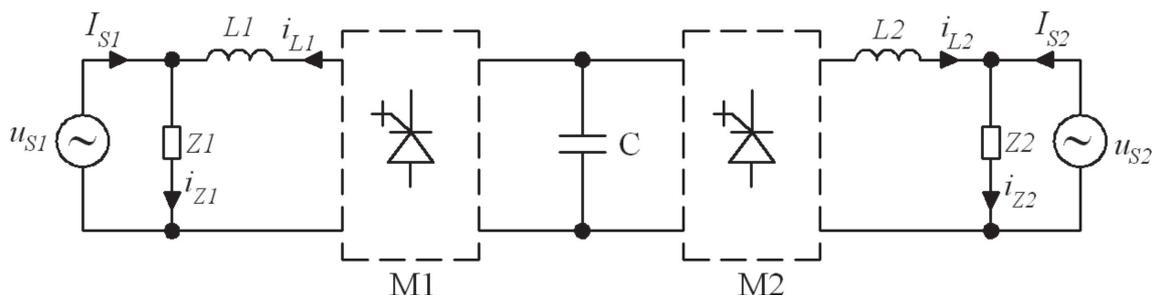


Рис. 2. Устройство уравнивания мощности

Токи, формируемые УУМ, вычисляются по формуле и входят в систему дифференциальных уравнений:

$$i_{Lj} = i_{Zj} - i_{Sj},$$

$$L \frac{di}{dt} + \psi_j u_C = u_{Sj}, \quad i_C = C \frac{du_C}{dt}.$$

Поддержание постоянного напряжения на конденсаторной батарее реализуется с помощью мостов. При этом оно должно быть в два раза больше, чем амплитуда напряжения на вторичной обмотке трансформатора Скотта

$$U_C^* = 2\sqrt{2} U_S.$$

Это позволяет формировать токи i_{Lj} , которые обеспечивают уравнивание мощностей, т. к. при возможных значениях коммутационной функции $\psi = \pm 1$ сохраняется постоянство производной этих токов

$$\frac{di_{Lj}}{dt} = u_{Sj} - \psi u_C,$$

т. е. при $\psi = 1$ ток растет, а при $\psi = -1$ – ток падает.

Следовательно, для управления мостом требуется замкнутая система автоматического управления, которая одновременно поддерживает заданное напряжение на конденсаторе и заданную форму и уровни токов i_{Lj} , необходимые для поддержания баланса мощностей (рис. 3). На входе схемы управления формируется сигнал ошибки напряжения на конденсаторе, которое поступает на вход пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора, на выходе которого формируются такие среднеквадратические значения токов I_S^* на вторичных

обмотках трансформатора Скотта, которые поддерживают баланс мощностей. На базе этих значений формируются токи идеальной формы, которые получают путем умножения I_S^* на соответствующую косинусоиду или синусоиду. Далее формируется сигнал ошибки по току, который имеет смысл отклонения формы тока от заданной и с помощью широтно-импульсных модуляторов (ШИМ) формируется команда на увеличение или уменьшение токов i_{Lj} относительно заданного i_{Lj}^* .

Таким образом, система управления одновременно осуществляет «медленное» регулирование напряжения на конденсаторной батарее и «быстрое» регулирование формы тока, формируемого УУМ. Чтобы обеспечить форму тока, близкую к синусоидальной, частота опорного треугольного сигнала, формируемого генератором треугольных импульсов (ГТИ), как минимум, в 10 раз выше частоты самого тока (50 Гц).

Возможны следующие пути усовершенствования УУМ: повышение частоты опорного сигнала, включение между обмотками трансформаторного преобразователя и реакторами резонансных LC-фильтров, увеличение количества уровней напряжения, формируемых УУМ.

Частота опорного сигнала определяет частоту переключения коммутационных элементов, которая ограничена свойствами полупроводниковых материалов (до 10 кГц). Резонансные фильтры применяют в маломощных устройствах, питающихся от сети 220/380 В. Поскольку напряжения на обмотках преобразователя Скотта, как правило, составляют 50 кВ, целесообразно применить каскадное включение из четырех мостов на стороне переменного тока (рис. 4). Сторона постоянного тока

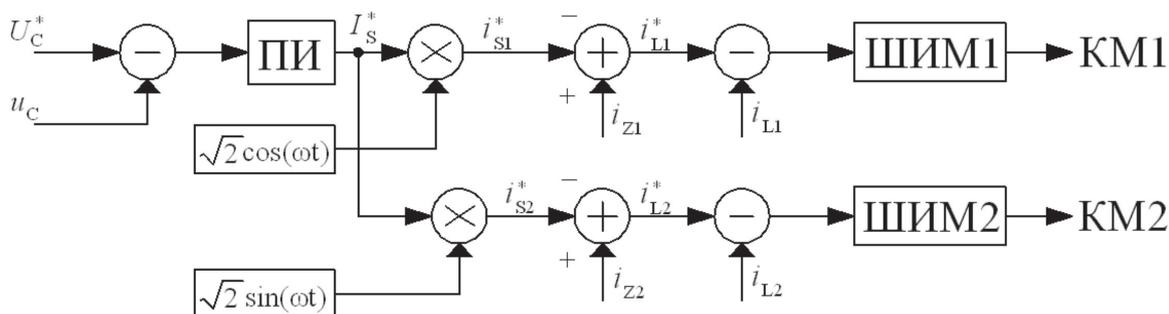


Рис. 3. Схема управления устройством уравнивания мощности

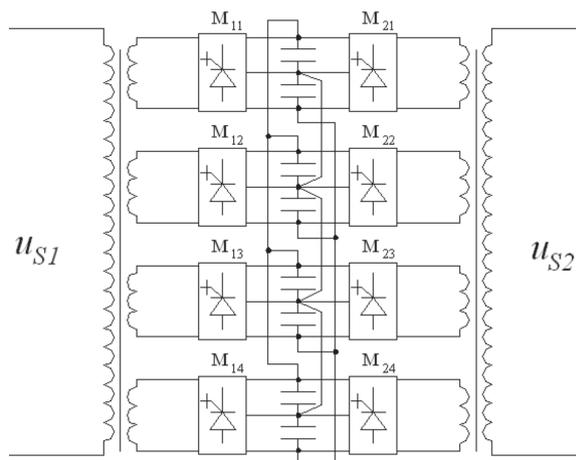


Рис. 4. Многоуровневое УУМ с согласующими трансформаторами

каждого из мостов подключена к общей конденсаторной батарее со средней точкой, которая состоит из параллельно включенных конденсаторов между точками 1 и 0 и параллельно включенных конденсаторов между точками 2 и 0. Следовательно, конденсаторную батарею можно представить как последовательное соединение эквивалентной емкости между точками 2 и 0.

Мосты связаны с обмотками преобразователя Скотта через согласующие трансформаторы с коэффициентами трансформации каждого к вторичным обмоткам 4:1. Если напряжение $U_{\text{ср}}=50$ кВ, то каждому мосту $M_{jk}(k=1, \dots, 4)$ соответствует напряжение 12,5 кВ. Индуктивность утечки согласующего трансформатора соответствует индуктивности реактора.

За счет применения средней точки схема формирует 5 уровней напряжения: $-2U_c, -U_c, 0, U_c, 2U_c$. Конкретный уровень напряжения определяется количеством последовательных эквивалентных

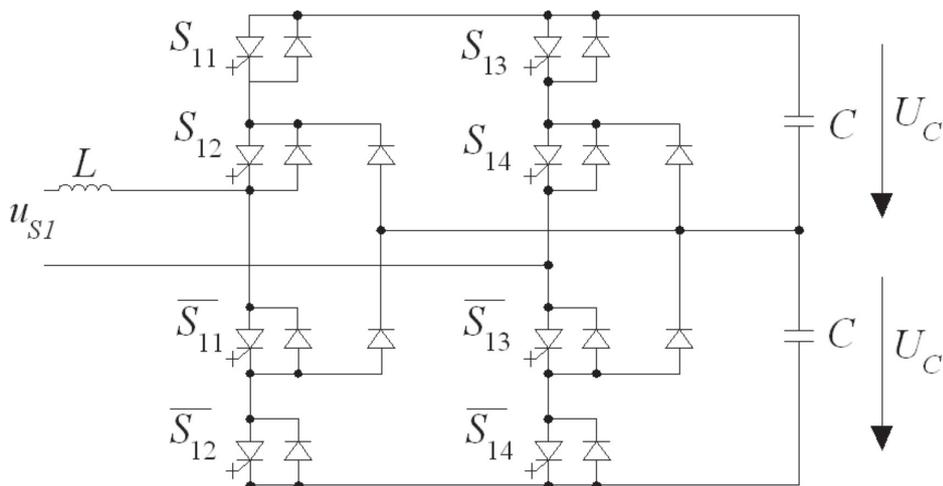


Рис. 5. Фрагмент УУМ на основе мостов и конденсаторной батареи со средней точкой

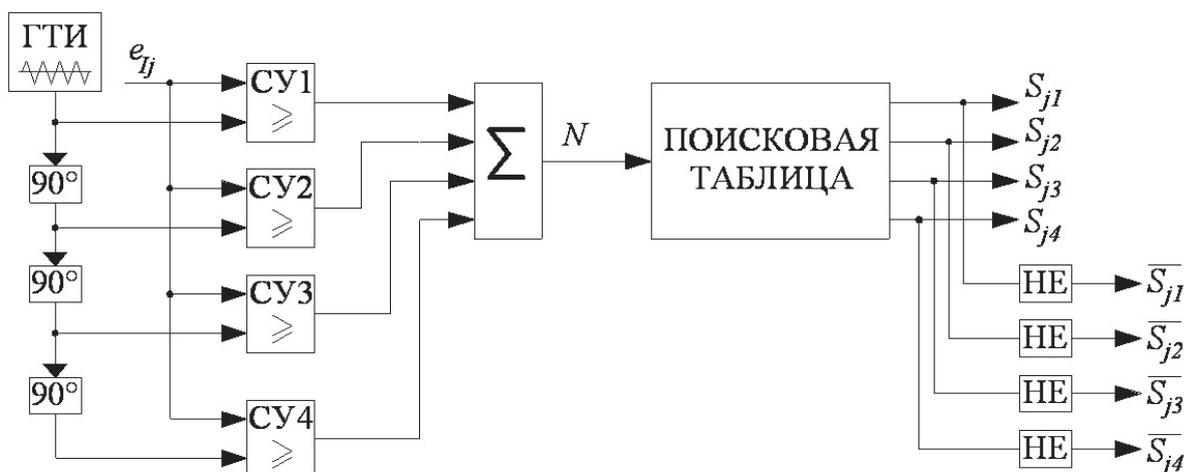


Рис. 6. Схема формирования многоуровневой ШИМ

емкостей, подключенных к согласующему трансформатору на стороне переменного тока и полярностью их включения, которые, в свою очередь, зависят от комбинации сигналов, подаваемых на управляющие входы тиристоров. Соответствие между сигналами на управляющих входах тиристоров и уровнями напряжений приведено ниже в таблице. Частота переключений тиристоров снижается за счет применения многоуровневой ШИМ с использованием четырех опорных треугольных сигналов, сдвинутых на угол $0, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ$.

Схема управления в данном случае аналогична схеме на рис. 3, за исключением формирования ШИМ-сигнала (рис. 6).

Моделирование функционирования схемы на рис. 5 было выполнено в среде MatLAB Simulink SimPower.

Сигнал ошибки по току сравнивается с опорными последовательностями треугольных импульсов, формируемых ГТИ, с помощью блоков сравнения СУ1–СУ4. Если ошибка больше опорного сигнала, блок сравнения выдает «1», а в противном случае – «0». В зависимости от суммы результатов сравнения из поисковой таблицы извлекается комбинация сигналов, подаваемых на управляющие входы тиристоров (таблица). В данной таблице также приведено соответствие между сигналами на управляющих входах тиристоров и уровнями напряжения. Извлекаемые из таблицы сигналы подаются на входы тиристоров $S_{j1}–S_{j4}$, а соответствующие им инвертированные сигналы с выходов элементов НЕ подаются на входы соответствующих дополнительных тиристоров $\bar{S}_{j1}–\bar{S}_{j4}$.

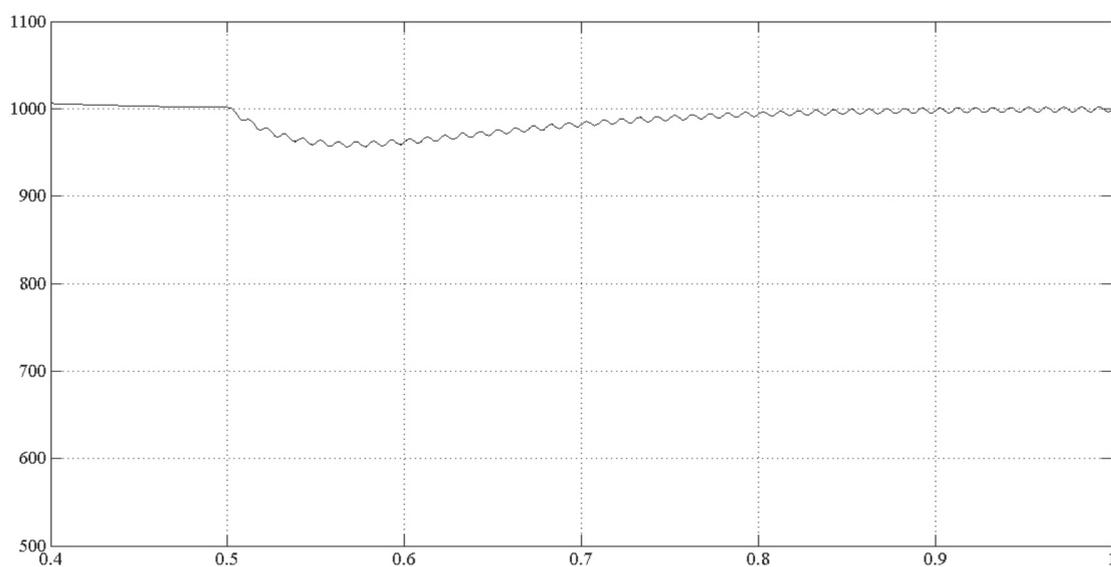


Рис. 7. Напряжение на конденсаторной батарее

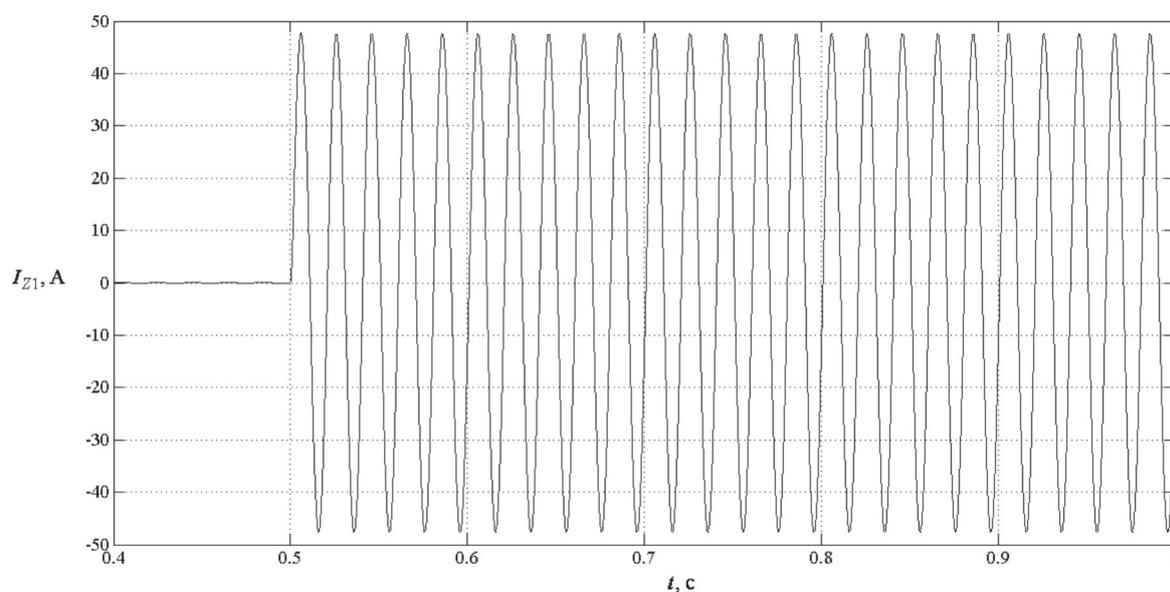


Рис. 8. Ток резко изменяющейся нагрузки

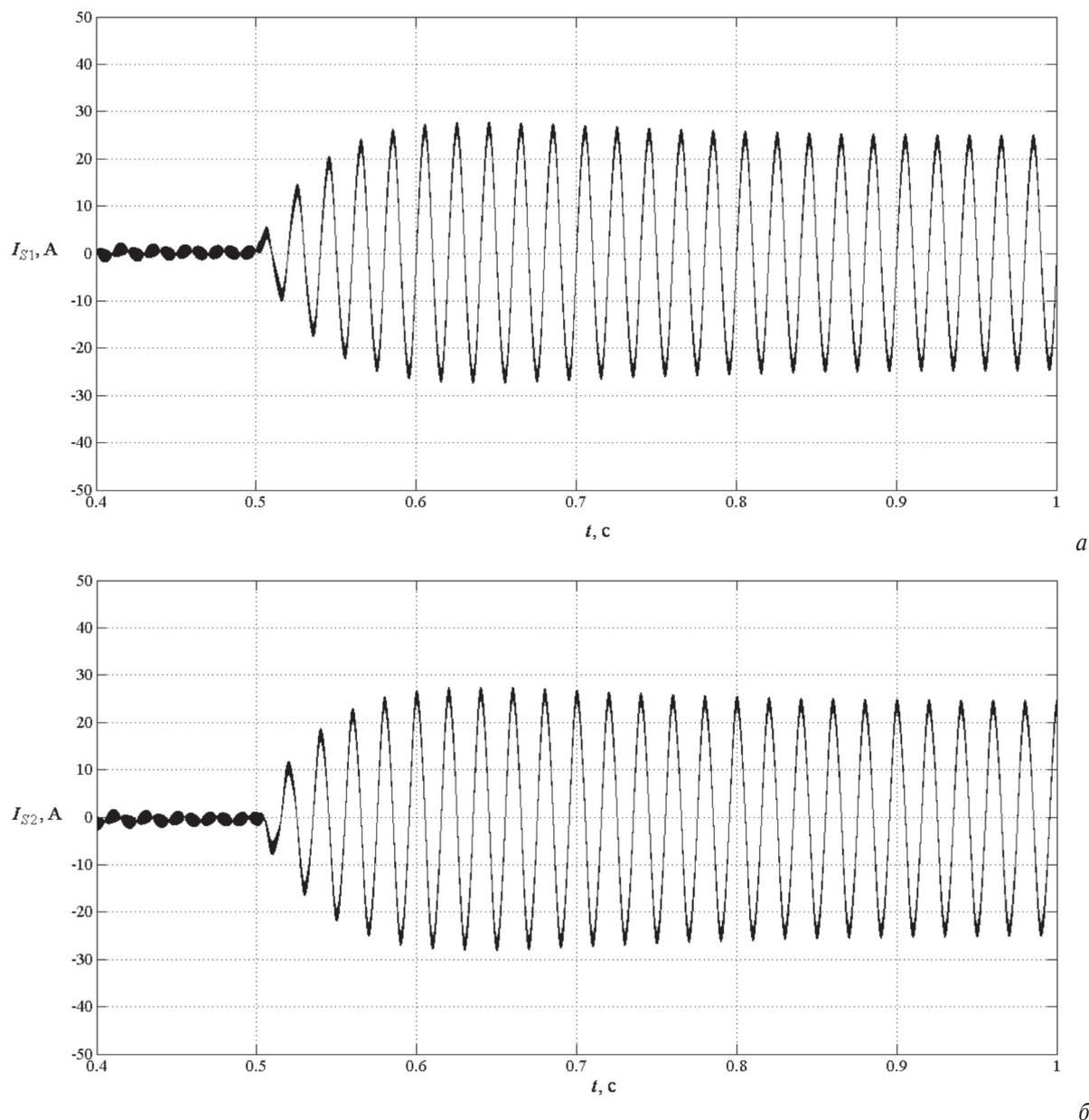


Рис. 9. Ток на первой (а) и второй (б) вторичных обмотках трансформатора Скотта

Таблица. Поисковая таблица для многоуровневой ШИМ

N	S_1	S_2	S_3	S_4	U_{ij}
0	0	0	1	1	$-2U_c$
1	0	0	0	1	$-U_c$
2	0	0	0	0	0
3	0	1	0	0	$+U_c$
4	1	1	0	0	$+2U_c$

На рис. 7–9 приведены результаты моделирования схемы на рис. 5 для модельных напряжений на обмотках трансформаторного преобразователя $u_{S1}(t)=500\sin(\omega t)$, $u_{S2}(t)=500\cos(\omega t)$ при индуктивности реактора 1,5 мГн и емкости конденсаторной батареи 10 мФ. Такая батарея состоит из самовосстанавливающихся конденсаторов на основе поли-

пропиленовой пленки, которая металлизирована смесью цинка и алюминия. Эффект самовосстановления обеспечивается за счет испарения металла вокруг поврежденного в результате пробоя места, за счет чего достигается высокая надежность. Рис. 5 показывает, что УУМ обеспечивает равенство токов в обмотках трансформаторного преобразователя и фазовый сдвиг между ними 90° при внезапном изменении тока нагрузки I_{Z1} . После изменения нагрузки напряжение на конденсаторной батарее снижается не более чем на 5 %, а токи в обмотках преобразователя Скотта одновременно плавно нарастают.

Поскольку УУМ шунтирует обмотки трансформаторного преобразователя, то равенство токов означает равенство мощностей. В свою очередь,

из равенства мощностей следует полная токовая симметрия в трехфазной сети.

Компьютерное моделирование показало достаточно хорошее совпадение теоретических оценок и протекающих процессов, а также принципиальную работоспособность устройства уравнивания мощности, поэтому в ближайшем будущем предполагается конструирование макета и физической модели устройства.

Выводы

Показано, что для обеспечения токовой симметрии трехфазной сети, питающей систему тягового

электропитания скоростной железной дороги переменного тока с количеством фаз, не кратным трем, параллельно вторичным обмоткам трансформаторного преобразователя Скотта из трех фаз в две, необходимо включить устройство уравнивания мощности с системой автоматического управления токами в зависимости от тяговых нагрузок. Отклонение напряжения на конденсаторной батарее от заданного не более чем на 10 % и плавное изменение токов в обмотках обеспечивается за счет одновременного медленного ПИ-регулирования напряжения на конденсаторе и многоуровневого ШИМ-регулирования токов через реакторы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Энергетическая электроника: Справочное пособие: Пер. с нем. / под. ред. В.А. Лабунцова. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 464 с.
2. Ворфоломеев Г.Н., Евдокимов С.А., Морозов П.В., Сопов В.И. Применение трансформаторов Скотта на тяговых подстан-

циях электрических железных дорог // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 6. – С. 273–276.

Поступила 14.12.2011 г.

УДК 621.316

АНАЛИЗ СПЕЦИФИКИ ВНУТРЕННИХ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ НА ДВУХЦЕПНЫХ ЛИНИЯХ 35–330 кВ

А.С. Ведерников

Самарский государственный технический университет
E-mail: es@samgtu.ru

Проанализирована специфика возникновения и протекания процессов коммутационных перенапряжений в двухцепных воздушных линиях электропередачи. Дана классификация внутренних перенапряжений по источникам из возникновения. Приведены выражения, позволяющие определять параметры волны перенапряжения. Даны рекомендации о необходимости учёта влияния соседней цепи двухцепной линии в расчётах величины коммутационных перенапряжений.

Ключевые слова:

Двухцепная линия электропередачи, коммутационное перенапряжение, автоматическое повторное включение.

Key words:

Double circuit transmission line, switching overvoltage, automatic reclosing

Повышение надежности таких специфических электроустановок, как двухцепные воздушные линии (ДВЛ) электропередачи, является важной научно-технической проблемой. Ее репрезентативные и адекватные решения требуются в разнообразных задачах проектирования, оперативного и диспетчерского управления режимами в электрических сетях различных классов напряжений.

Так как расстояния между всеми проводами обеих цепей ДВЛ определяются только длинами траверс опоры, взаимная электромагнитная и электростатическая связь между ними оказывает существенное влияние на параметры как установившихся, так и переходных режимов. Поскольку это влияние может изменять характеристики надёжности ДВЛ, а в отдельных случаях приводить к пере-

рывам в электропитании потребителей, актуальной является проблема математического описания ДВЛ в различных электрических режимах.

Общее о внутренних перенапряжениях на двухцепных линиях 35–330 кВ

На изоляцию двухцепных воздушных линий электропередачи, также как и на одноцепных, воздействуют стационарные, квазистационарные и коммутационные перенапряжения.

На величину кратности перенапряжений двухцепность оказывает влияние, главным образом, для перенапряжений, возникающих при коммутациях.

Стоит отметить, что любая линия при отключениях проходит два этапа: отключение тока нагруз-