

# Анализ процессов одновременной коммутации тиристорных мостов в преобразователях с многообмоточными трансформаторами

НОВИКОВ М.А., ПАНФИЛОВ Д.И., РЕМИЗЕВИЧ Т.В., РАШИТОВ П.А.

*Проанализированы электромагнитные процессы в многообмоточном трансформаторе при одновременном включении нескольких вторичных обмоток в цепь источника тока. Отмечено влияние взаимосвязи потоков рассеяния обмоток трансформатора на коммутационные процессы. Проведено сравнение результатов имитационного и физического моделирования переходных процессов при одновременной коммутации нескольких вторичных обмоток трансформатора с помощью мостового тиристорного коммутатора переменного тока.*

Ключевые слова: преобразователи, многообмоточные трансформаторы, коммутация обмоток, потоки рассеяния, тиристорные мосты

Существует ряд устройств, в которых вторичные обмотки трансформатора переключаются с помощью тиристорных мостовых коммутаторов переменного тока: фазоповоротные устройства с тиристорными коммутаторами, ступенчатые регуляторы-формирователи переменного напряжения, зарядные устройства емкостных накопителей энергии и т.д.

Выходное напряжение в этих устройствах регулируется переключением тиристорных мостов и формированием дискретно изменяющегося напряжения на его выходе. С помощью различных комбинаций включенных тиристорных мостов формируют различные векторы напряжения на выходе [1]. В большинстве случаев при таком формировании происходит одновременное переключение нескольких обмоток с разным коэффициентом трансформации, находящихся на одном сердечнике трансформатора.

Любое переключение вторичных обмоток трансформатора сопряжено с переключением плеч тиристорных мостов, в диагональ которых включена соответствующая обмотка. Обеспечение надежной коммутации тиристорных плеч мостов является сложной технической задачей. На процессы переключения тиристорных мостов влияет большое число факторов: фазовый сдвиг между током и напряжением нагрузки, время восстановления запирающих свойств тиристора, наличие обратного запирающего напряжения на интервале восстановления его запирающих свойств, скорости изменения его токов и напряжений на тиристоре, параметры си-

*An analytical description of the electromagnetic processes arising in a multiwinding transformer when a few secondary windings are simultaneously connected to a current source circuit is presented. The effect the interrelation between the transformer winding leakage fluxes has on the switching processes is pointed out. The results from simulation and physical modeling of transients that arise when a few secondary transformer windings are simultaneously switched by an AC thyristor bridge switching device are compared.*

Key words: converters, multiwinding transformers, switching of windings, thyristor bridges, leakage fluxes

ловой схемы преобразователя и т.д. В реальных схемах все эти факторы влияют на ограничение временного интервала, на котором можно надежно переключать тиристоры. Попытка переключения коммутатора в запрещенные временные интервалы приведет к возникновению аварийных режимов работы преобразователя, связанных с длительным режимом КЗ тиристорных мостов. Поэтому при проектировании алгоритмов управления преобразователем необходимо учитывать ограничения на разрешенные временные интервалы формирования импульсов управления тиристорным коммутатором.

В [1] проведен анализ процессов коммутации тиристорного моста с включенной в его диагональ вторичной обмоткой трансформатора, работающего от сети переменного тока. Показано, что на процессы переключения одной обмотки трансформатора влияют фазовые соотношения между током и напряжением первичной обмотки трансформатора, параметры трансформатора (индуктивность рассеяния), активные сопротивления обмоток, соотношения между токами и напряжениями в момент начала переключения тиристорных мостов и т.д.

Электромагнитные процессы в схемах еще больше усложняются при одновременном переключении нескольких вторичных обмоток трансформатора, находящихся на одном сердечнике. В этом случае процессы коммутации тиристорных мостов нельзя рассматривать для каждого моста отдельно, так как вторичные обмотки, участвующие в коммутации, имеют общие магнитные потоки.

В статье проводится анализ процессов одновременной коммутации тиристорных мостов с включенными в диагональ вторичными обмотками трансформатора, работающих на активно-реактивную нагрузку переменного тока. Рассматриваемая схема включения трансформатора и тиристорного коммутатора приведена на рис. 1.

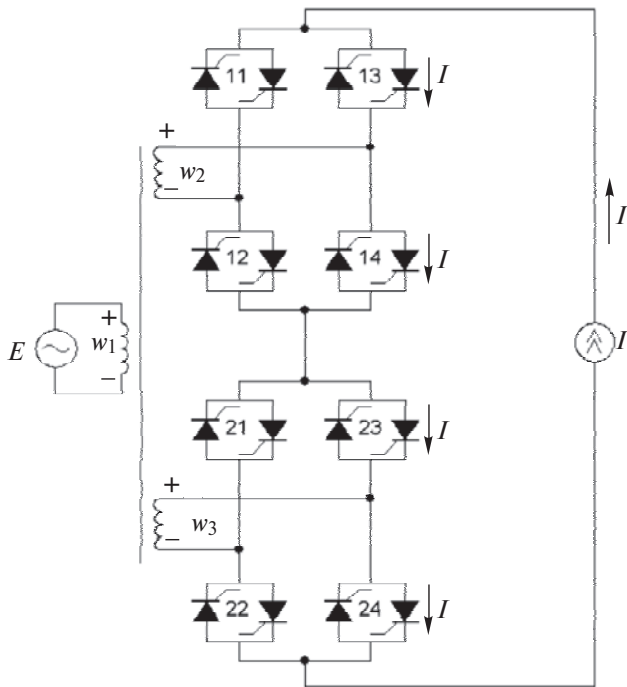


Рис. 1. Схема замещения тиристорного преобразователя

При рассмотрении процессов коммутации сделаны следующие допущения:

1. В качестве нагрузки мостов рассматривается источник тока. Таким образом, переключение тиристорных мостов осуществляется без обрыва тока нагрузки.
2. Коэффициенты трансформации вторичных обмоток трансформатора в общем случае разные, и помимо магнитной связи через основной поток сердечника эти обмотки имеют взаимные магнитные связи через соответствующие потоки рассеяния.
3. Активным сопротивлением обмоток трансформатора пренебрегаем.
4. Вторичные обмотки намотаны концентрически на единый сердечник (рис. 2).

Целью анализа является получение соотношений, позволяющих выявить основные факторы, влияющие на ход электромагнитных процессов, проведение сравнительной оценки степени их влияния на ход основных процессов, изучение подхода к расчету переходных процессов переключения обмоток трансформатора.

Рассмотрим электромагнитные процессы при одновременном переключении двух вторичных об-

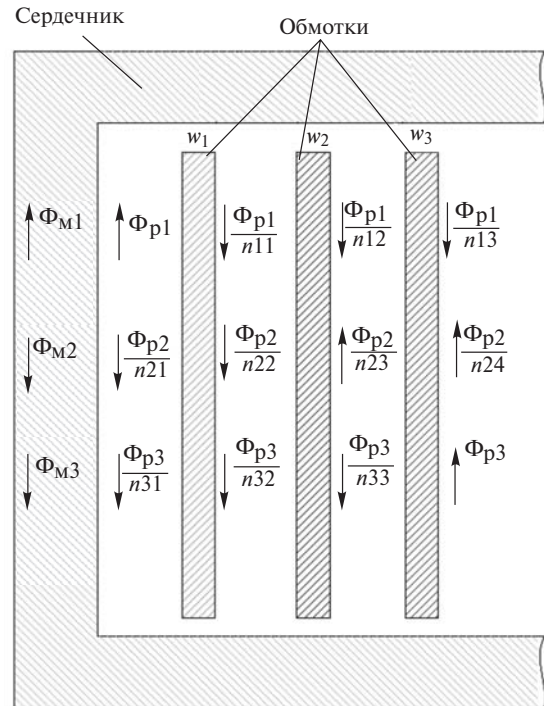


Рис. 2. Схема потоков в трехобмоточном трансформаторе

моток трехобмоточного трансформатора (рис. 1). Магнитный поток каждой обмотки будем представлять состоящим из двух потоков: потока намагничивания ( $\Phi_M$ ), проходящего через сердечник трансформатора, и потока рассеяния ( $\Phi_p$ ), замыкающегося по воздуху. Поток рассеяния каждой обмотки, в свою очередь, можно разделить на несколько, каждый из которых будет охватывать другие обмотки трансформатора (рис. 2).

Коэффициенты  $n_{ij}$ , введенные на рис. 2, определяют отношение полного потока рассеяния обмотки  $i$  к потоку рассеяния, охватывающему обмотку  $j$ . Эти коэффициенты определяются геометрическими размерами обмоток трансформатора и их взаимным расположением.

Для установления связи между напряжениями и токами в процессе переключения обмоток запишем систему уравнений, описывающую процессы одновременной коммутации двух вторичных обмоток трехобмоточного трансформатора. При изменении магнитного потока, проходящего через замкнутый контур, в нем будет создаваться ЭДС, причем  $U = w d\Phi / dt$ , где  $w$  – число витков обмотки;  $U$  – напряжение обмотки;  $\Phi$  – суммарный поток, пронизывающий обмотку.

Записывая закон Фарадея для каждой обмотки, получаем систему уравнений:

$$U_1 = w_1 \frac{d}{dt} \left( \Phi_{M1} - \Phi_{M2} - \Phi_{M3} + \Phi_{p1} - \frac{\Phi_{p2}}{n_{21}} - \frac{\Phi_{p3}}{n_{31}} \right)$$

$$U_2 = w_2 \frac{d\Phi_{M1}}{dt} - \Phi_{M2} - \Phi_{M3} + \Phi_{P1} - \frac{\Phi_{P1}}{n11} - \frac{\Phi_{P2}}{n21} - \frac{\Phi_{P2}}{n22} - \frac{\Phi_{P3}}{n31} - \frac{\Phi_{P3}}{n32}$$

$$U_3 = w_3 \frac{d\Phi_{M1}}{dt} - \Phi_{M2} - \Phi_{M3} + \Phi_{P1} - \frac{\Phi_{P1}}{n11} - \frac{\Phi_{P1}}{n12} - \frac{\Phi_{P2}}{n21} - \frac{\Phi_{P2}}{n22} + \frac{\Phi_{P2}}{n23} - \Phi_{P3}$$

где  $U_i$  – напряжение на зажимах соответствующих выводов обмоток трансформатора;  $w_i$  – число витков соответствующей обмотки трансформатора;  $\Phi_M$  – поток намагничивания, создаваемый соответствующей обмоткой;  $\Phi_P$  – поток рассеяния соответствующей обмотки.

Таким образом, в каждой катушке магнитный поток наводит ЭДС, имеющую несколько составляющих. Первая связана с той частью потока, которая охватывает все обмотки и замыкается через сердечник. Эта часть ЭДС всегда положительна и является ЭДС самоиндукции. Вторая часть ЭДС определяется взаимной индукцией, вызванной взаимной связью потоков рассеяния соответствующих обмоток. Эта ЭДС может быть положительной или отрицательной в зависимости от взаимной ориентации магнитных потоков соответствующих катушек. Соответственно положительной или отрицательной может быть взаимная индуктивность [3].

Используя известное соотношение для мгновенного изменения потока  $\Phi = \frac{Iw}{R_m}$  [2] (где  $I$  – мгновенное значение тока катушки;  $w$  – число витков;  $R_m$  – магнитное сопротивление канала, в котором распространяется поток), можно переписать вышеприведенную систему уравнений в виде:

$$U_1 = w_1^2 \frac{dI_1}{dt} \frac{1}{R_{M1}} + \frac{1}{R_{P1}} - w_1 w_2 \frac{dI_2}{dt} \frac{1}{R_{M2}} + \frac{1}{R_{P2} \kappa 21} - w_1 w_3 \frac{dI_3}{dt} \frac{1}{R_{M3}} + \frac{1}{R_{P3} \kappa 31}$$

$$U_2 = w_2 w_1 \frac{dI_1}{dt} \frac{1}{R_{M1}} + \frac{1}{R_{P1}} - \frac{1}{R_{P1} \kappa 11} - w_2^2 \frac{dI_2}{dt} \frac{1}{R_{M2}} + \frac{1}{R_{P2} \kappa 21} + \frac{1}{R_{P2} \kappa 22} - w_2 w_3 \frac{dI_3}{dt} \frac{1}{R_{M3}} + \frac{1}{R_{P3} \kappa 31} + \frac{1}{R_{P3} \kappa 32}$$

$$U_3 = w_3 w_1 \frac{dI_1}{dt} \frac{1}{R_{M1}} + \frac{1}{R_{P1}} - \frac{1}{R_{P1} \kappa 11} - \frac{1}{R_{P1} \kappa 12} - w_3 w_2 \frac{dI_2}{dt} \frac{1}{R_{M2}} + \frac{1}{R_{P2} \kappa 21} + \frac{1}{R_{P2} \kappa 22} - \frac{1}{R_{P2} \kappa 23} - w_3^2 \frac{dI_3}{dt} \frac{1}{R_{M3}} + \frac{1}{R_{P3} \kappa 31}$$

Обозначим собственную индуктивность обмотки, равную сумме индуктивности намагничивания трансформатора и индуктивности рассеяния соответствующей обмотки, как  $L_i$ , а взаимную индуктивность –  $M_{ij}$  и получим известную систему уравнений:

$$U_1 = L_1 \frac{dI_1}{dt} - M_{12} \frac{dI_2}{dt} - M_{13} \frac{dI_3}{dt};$$

$$U_2 = -L_2 \frac{dI_2}{dt} + M_{21} \frac{dI_1}{dt} - M_{23} \frac{dI_3}{dt};$$

$$U_3 = -L_3 \frac{dI_3}{dt} + M_{31} \frac{dI_1}{dt} - M_{32} \frac{dI_2}{dt}$$

где:

$$L_1 = w_1^2 \frac{1}{R_{M1}} + \frac{1}{R_{P1}}$$

$$M_{12} = w_1 w_2 \frac{1}{R_{M2}} + \frac{1}{R_{P2} \kappa 21}$$

$$M_{13} = w_1 w_3 \frac{1}{R_{M3}} + \frac{1}{R_{P3} \kappa 31}$$

$$L_2 = w_2^2 \frac{1}{R_{M2}} + \frac{1}{R_{P2} \kappa 21} + \frac{1}{R_{P2} \kappa 22}$$

$$M_{21} = w_2 w_1 \frac{1}{R_{M1}} + \frac{1}{R_{P1}} - \frac{1}{R_{P1} \kappa 11}$$

$$M_{23} = w_2 w_3 \frac{1}{R_{M3}} + \frac{1}{R_{P3} \kappa 31} + \frac{1}{R_{P3} \kappa 32}$$

$$L_3 = w_3^2 \frac{1}{R_{M3}} + \frac{1}{R_{P3} \kappa 31}$$

$$M_{31} = w_3 w_1 \frac{1}{R_{M1}} + \frac{1}{R_{P1}} - \frac{1}{R_{P1} \kappa 11} - \frac{1}{R_{P1} \kappa 12}$$

$$M_{32} = w_3 w_2 \frac{1}{R_{M2}} + \frac{1}{R_{P2} \kappa 21} + \frac{1}{R_{P2} \kappa 22} - \frac{1}{R_{P2} \kappa 23}$$

Отметим, что в уравнении (1) присутствуют только производные токов обмоток, а не их мгновенные значения. В этом случае решение уравне-

ния (1) определяет закон изменения токов в переходном процессе. В общем случае значения взаимных индуктивностей для каждой пары обмоток (например  $M_{12}$  и  $M_{21}$  или  $M_{13}$  и  $M_{31}$ ) могут быть различными.

В момент переключения вторичных обмоток трансформатора на интервалах коммутации тиристоров происходит их КЗ, т.е. напряжение на вторичных обмотках становится равным нулю. Приравняв в системе уравнений (1) напряжения  $U_2$  и  $U_3$  нулю, можно получить зависимость производных тока  $I_2$  от тока  $I_3$ , а также их зависимость от напряжения на первичной обмотке:

$$U_1 = \frac{\frac{\partial}{\partial t} L_1 L_2 - M_{12} M_{21} \frac{\partial}{\partial t} I_2}{M_{21}} + \frac{\frac{\partial}{\partial t} L_1 M_{23} - M_{13} M_{21} \frac{\partial}{\partial t} I_3}{M_{21}}; \\ \frac{\frac{\partial}{\partial t} M_{32} M_{21} - M_{31} L_2 \frac{\partial}{\partial t} I_2}{M_{21}} = \frac{\frac{\partial}{\partial t} M_{31} M_{23} - L_3 M_{21} \frac{\partial}{\partial t} I_3}{M_{21}}. \quad (3)$$

Система уравнений (3) в общем виде характеризует связь между производными токов вторичных обмоток трансформаторов в момент одновременного переключения обмоток. Если подставить значения параметров  $M_{ij}$  и  $L_i$ , используемых в системе уравнений (3) из системы уравнений (2), то будут учтены магнитное сопротивление сердечника трансформатора, индуктивности рассеяния обмоток трансформатора, а также взаимная связь потоков рассеяния соответствующих вторичных обмоток. Оценим влияние взаимных связей потоков рассеяния вторичных обмоток на процессы коммутации тиристоров. Вначале рассмотрим процесс коммутации тиристоров при переключении обмоток трансформатора при отсутствии взаимных связей потоков рассеяния обмоток. В этом случае справедливы следующие соотношения:  $M_{ij} = \frac{w_i w_j}{R_m}$ ;

$$L_i = w_i^2 \frac{\frac{\partial}{\partial t} 1}{R_m} + \frac{1}{R_{pi}} \frac{\partial}{\partial t} [3]. \text{ Подставив данные уравне-}$$

ния в систему уравнений (3), получим связь производных токов вторичных обмоток:

$$\frac{\frac{\partial}{\partial t} w_3 w_2^2 \frac{\partial}{\partial t} I_2}{\frac{\partial}{\partial t} R_{p2}} = \frac{\frac{\partial}{\partial t} w_2 w_3^2 \frac{\partial}{\partial t} I_3}{\frac{\partial}{\partial t} R_{p3}}.$$

Поскольку индуктивность рассеяния  $L_{pi} = \frac{w_i^2}{R_{pi}}$ ,

то

$$(w_3 L_{p2}) \frac{dI_2}{dt} = (w_2 L_{p3}) \frac{dI_3}{dt}. \quad (4)$$

Отсюда вытекает, что производные токов во время коммутации будут пропорциональны приве-

денным значениям индуктивностей рассеяния. Отметим, что аналитические выражения (3) легко превращаются в уравнения для известной Т-образной схемы замещения трансформатора (рис. 3,а).

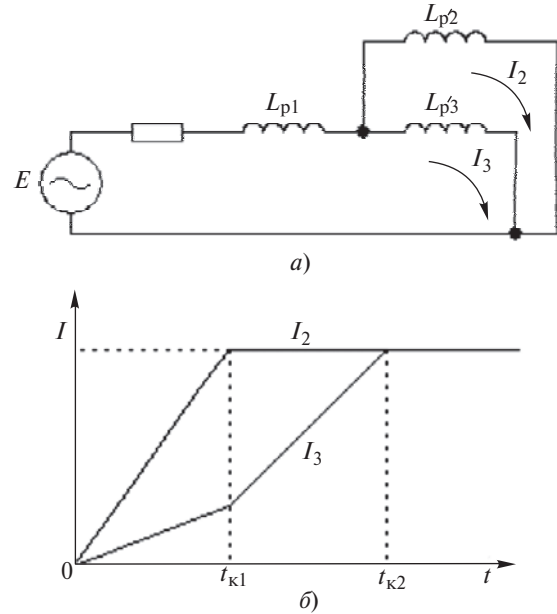


Рис. 3. Т-образная схема замещения трансформатора (а) и диаграммы токов в его вторичных обмотках при их одновременном переключении (б)

Для получения наглядной картины о переходных процессах изменения токов во вторичных обмотках трансформатора рассмотрим случай их включения в цепь источника тока:

1. В момент до начала переключения ток в обмотках равен нулю, импульсы управления поданы на тиристоры плеча 3 и 4 каждого тиристорного моста (рис. 1). Полярность тока  $I$  и напряжения  $E$  в схеме в момент коммутации показана на рис. 1.

2. В момент переключения мостовых тиристоров с проводящих тиристоров плеча 3 снимаются импульсы управления, но через них еще протекает ток в прямом направлении. На тиристоры плеча 1 подаются отпирающие импульсы управления и прикладывается положительное напряжение обмотки трансформатора между анодом и катодом. Таким образом, в момент коммутации напряжение на вторичной обмотке трансформатора равно нулю, поскольку включены как тиристоры плеча 1, так и тиристоры плеча 3.

3. Формируется контур протекания тока КЗ обмотки трансформатора: обмотка трансформатора, тиристоры плеча 1, тиристоры плеча 3. Направление этого тока противоположно направлению протекания тока источника  $I$ .

4. Процесс коммутации (переключение тока на грузки из плеча 3 в плечо 1) завершается в момент, когда ток в запираемом тиристоре станет равным нулю, а в отпираемом тиристоре и обмотке транс-

форматора его значение достигнет значения тока нагрузки. В этот момент происходит естественное выключение тиристора плеча 3.

Качественная диаграмма изменения токов вторичных обмоток приведена на рис. 3,б. Изменение токов в двух вторичных обмотках начинается в момент времени  $t=0$ . В момент  $t_{к1}$  ток  $I_2$  в индуктивности  $L_{p2}$  достигает значения тока нагрузки  $I$  и тиристоры плеча 3, включенные в обмотку  $L_{p2}$ , закрываются, эта обмотка включается последовательно в цепь нагрузки и по ней протекает ток нагрузки  $I$ . Начиная с этого момента происходит изменение переходного процесса во второй вторичной обмотке трансформатора, связанное с изменением индуктивности контура коммутации. К особенностям такого процесса можно отнести:

одновременное изменение токов во всех вторичных обмотках до момента окончания переходного процесса в одной из них;

влияние окончания переходного процесса переключения каждой обмотки на характер переходного процесса в оставшихся обмотках, участвующих в процессе переключения: проявляется в изменении производной тока в них.

Для получения зависимости производной тока  $I_2$  от производной тока  $I_3$  с учетом взаимной связи потоков рассеяния необходимо подставить выражение (2) во второе уравнение системы (3). Тогда получаем:

$$w_2 \frac{1}{R_{p2}} \frac{dI_2}{dt} + \frac{1}{R_{p1}} \frac{dI_2}{dt} - \frac{1}{R_{p1}} \frac{dI_3}{dt} = \frac{1}{R_{p1}} \frac{dI_2}{dt} + \frac{1}{R_{p1}} \frac{dI_3}{dt} + \frac{1}{R_{p3}} \frac{dI_3}{dt} + \frac{1}{R_{p3}} \frac{dI_2}{dt}$$

Это уравнение имеет вид

$$A \frac{dI_2}{dt} = B \frac{dI_3}{dt}, \tag{5}$$

причем коэффициенты  $A$  и  $B$  зависят от магнитных и конструктивных параметров трансформатора и теоретически могут иметь любые соотношения.

Рассмотрим соотношение этих коэффициентов.

1. Значение отношения коэффициентов велико.

В данном случае для выполнения равенства (5) необходимо, чтобы отношение производных токов  $I_2$  и  $I_3$  также было велико. Качественно процессы коммутации тока для рассматриваемого соотношения коэффициентов показаны на рис. 4,а, из которого видно, что пока происходит коммутация тока

в обмотке  $w_2$ , ток в обмотке  $w_3$  практически не изменяется.

В случае, если для многообмоточного трансформатора выполняются рассматриваемые соотношения, при попытке одновременного переключения процессы будут происходить практически по очереди (рис. 4,а).

2. Коэффициенты  $A$  и  $B$  соизмеримы. При таком соотношении коэффициентов процессы при одновременной коммутации происходят параллельно. При отношении коэффициентов  $A$  и  $B$ , равно отношению приведенных индуктивностей рассеяния вторичных обмоток, трансформатор может быть представлен Т-образной схемой замещения, рассмотренной ранее, поскольку уравнение (5) сводится к уравнению (4). Качественные диаграммы процессов коммутации приведены на рис. 4,б.

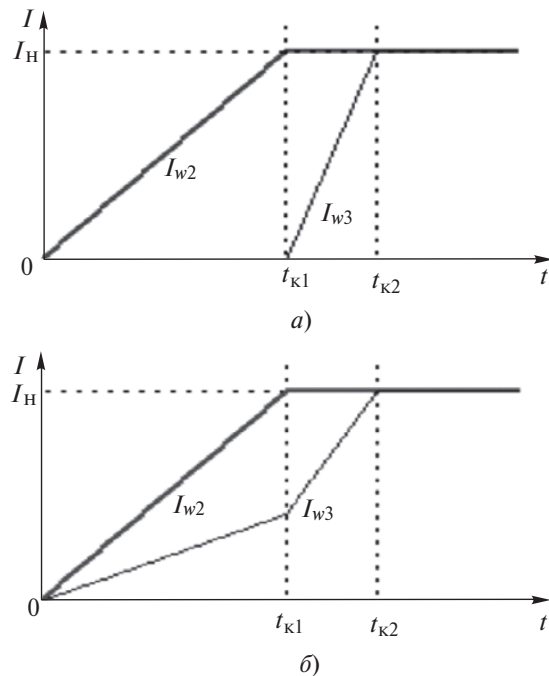


Рис. 4. Качественные диаграммы изменения токов вторичных обмоток трансформатора при учете взаимного влияния потоков рассеяния

Оценка характера переходных процессов для реальных устройств проводилась на основе сравнения результатов экспериментального исследования макетного образца преобразователя с результатами имитационного моделирования процессов одновременной коммутации двух вторичных обмоток многообмоточного трансформатора, параметры которых задавались по результатам измерений.

В ОАО «ЭНИН» была разработана и исследована физическая модель фазоповоротного устройства (ФПУ) с подключением шунтового трансформатора к средней точке серийного трансформатора [4]. Значения основных параметров физической модели ФПУ представлены ниже:

|  |          |
|--|----------|
| Номинальная установленная мощность, кВт  | 20       |
| Напряжение, В, и частота, Гц, питания стенда от трехфазной пятипроводной сети переменного тока | 380; 50  |
| Номинальный ток, А   | 30       |
| Число ступеней регулирования   | 15       |
| Максимальный формируемый фазовый сдвиг, град   | $\pm 35$ |
| Дискретность изменения фазы выходного напряжения, град   | 5        |
| Напряжение первичной обмотки шунтового трансформатора ( $w_1$ ), В                             | 220      |
| Напряжение вторичных обмоток, В  |          |
| $w_2$  | 20       |
| $w_3$  | 40       |
| $w_4$  | 80       |

Процессы, происходящие в тиристорном коммутаторе и в шунтовом трансформаторе при переключении обмотки, полностью аналогичны рассмотренным выше, и поэтому всю схему ФПУ можно свести к схеме, представленной на рис. 1.

На первом этапе экспериментов проводилось попарное переключение вторичных обмоток шунтового трансформатора. На рис. 5 приведены осциллограммы токов при включении обмоток  $w_2$  (20 В) и  $w_3$  (40 В) в цепь источника тока. Для сравнения на рис. 5 также показаны результаты расчета токов имитационным моделированием.

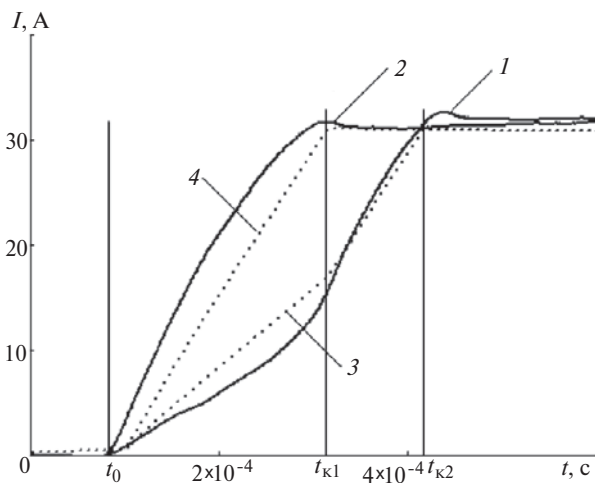


Рис. 5. Сравнение результатов имитационного и физического моделирования при одновременном переключении обмоток  $w_2$  и  $w_3$ : 1 и 2 – ток обмоток  $w_2$  и  $w_3$  (физическое моделирование); 3 и 4 – обмоток  $w_2$  и  $w_3$  (имитационное моделирование)

Эквивалентные параметры обмоток трансформатора, используемые в уравнениях (1) и (2), а также параметры имитационной модели трансформатора (составленной на основе приведенных систем уравнений (1) и (2)), были получены по результатам опытов КЗ обмоток  $w_2$  и  $w_3$  шунтового трансформатора. Отметим, что значение коэффициента связи обмотки  $w_2$  с обмоткой  $w_3$ , найденное из опытов КЗ (коэффициент  $A$  в уравнении (5)), равно  $19,3 \cdot 10^{-6}$ , а коэффициента связи обмотки  $w_3$  с

обмоткой  $w_2$  (коэффициент  $A$  в уравнении (5)) составляет  $16,6 \cdot 10^{-6}$ .

На рис. 6 приведены осциллограммы токов, полученные на физической модели и с помощью имитационного моделирования при одновременной коммутации обмотки  $w_3$  (40 В) и  $w_4$  (80 В). Для обмоток  $w_3$  и  $w_4$  коэффициенты связи по потоку рассеяния равны  $38,2 \cdot 10^{-6}$  и  $1,9 \cdot 10^{-6}$  соответственно.

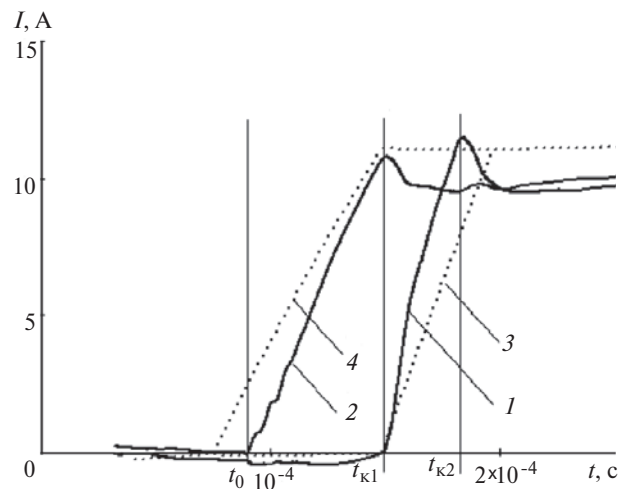


Рис. 6. Сравнение результатов имитационного и физического моделирования при одновременном переключении обмоток  $w_3$  и  $w_4$ : 1 и 2 – ток обмоток  $w_3$  и  $w_4$  (физическое моделирование); 3 и 4 – обмоток  $w_3$  и  $w_4$  (имитационное моделирование)

Приведенные результаты наглядно иллюстрируют, что процесс переключения обмоток зависит от конструктивных и магнитных параметров трансформатора. Причем, для первого эксперимента коэффициенты связи вторичных обмоток по потокам рассеяния ( $A$  и  $B$ ) сравнимы, что объясняет процесс одновременного переключения вторичных обмоток. Для второй пары обмоток коэффициенты связи значительно отличаются, что приводит к задержке переключения токов обмотки  $w_2$ .

Для трансформаторов с большим числом вторичных обмоток уравнения (1) должны содержать дополнительные члены, определяющие попарные связи потоков рассеяния соответствующих обмоток.

Так, для четырехобмоточного трансформатора уравнения, описывающие процесс одновременного подключения трех вторичных обмоток, в отличие от уравнений (1) должны содержать производные всех токов обмоток с соответствующими коэффициентами магнитной связи. Методика получения коэффициентов связи аналогична описанной ранее при анализе процессов в трехобмоточном трансформаторе.

Решение полученной системы уравнений удобнее проводить методами имитационного моделирования. Переходные процессы в этом случае могут носить более сложный характер, определяемый одновременным влиянием магнитных полей всех пе-

реключаемых обмоток. Для иллюстрации данного факта на рис. 7 приведены осциллограммы процесса одновременного включения трех вторичных обмоток шунтового трансформатора. Для сравнения на рис. 7 также приведены временные диаграммы, рассчитанные с помощью имитационного моделирования с учетом и без учета взаимной связи потоков рассеяния вторичных обмоток. При этом переходный процесс изменения токов во вторичных обмотках трансформатора, рассчитанный с помощью имитационного моделирования без учета взаимной связи потоков рассеяния обмоток, не тождествен реальным процессам в физической модели ФПУ.

Хорошее совпадение экспериментальных и рассчитанных с помощью имитационного моделирования кривых токов вторичных обмоток трансформатора подтверждает необходимость учета взаимного влияния связей магнитных потоков рассеяния обмоток на ход переходного процесса их переключе-

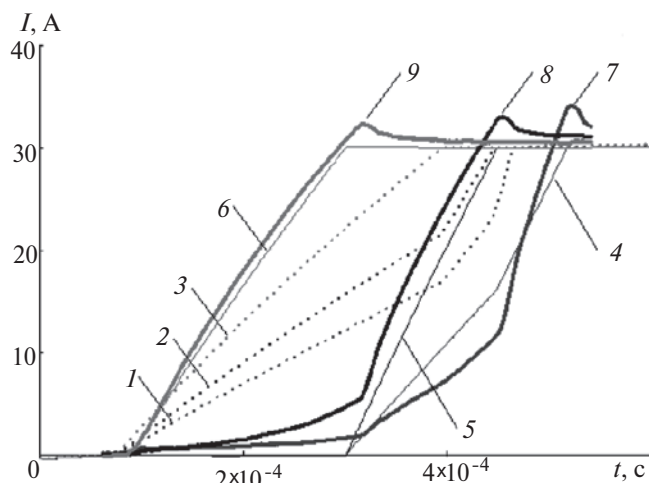


Рис. 7. Сравнение результатов имитационного и физического моделирования процессов одновременного переключения обмоток многообмоточного трансформатора: 1, 2, 3 — ток обмоток  $w_2$ ,  $w_3$  и  $w_4$  (без учета распределения потоков рассеяния); 4, 5, 6 — ток обмоток  $w_2$ ,  $w_3$  и  $w_4$  (с учетом распределения потоков рассеяния); 7, 8, 9 — ток обмоток  $w_2$ ,  $w_3$  и  $w_4$  (физическая модель)

чения. Имитационное моделирование позволяет с высокой точностью рассчитывать переходный процесс для каждой из обмоток и вычислять время переключения мостов. Последнее существенно важно для реализации алгоритмов надежного управления тиристорными мостами в процессе регулирования выходного напряжения устройства [1].

**Выводы.** 1. Получены аналитические выражения для расчета переходных процессов при одновременном переключении вторичных обмоток трансформатора с помощью тиристорных мостов, учитывающие взаимные связи магнитных потоков рассеяния этих обмоток.

2. Выявлено существенное влияние взаимных магнитных связей потоков рассеяния вторичных обмоток трансформатора на переходные процессы

в преобразователе при одновременном переключении тиристорных мостов.

3. Корректный учет взаимных индуктивностей в модели многообмоточного трансформатора позволяет средствами имитационного моделирования получить достоверную картину и численные значения длительности переходных процессов одновременного переключения вторичных обмоток трансформатора с помощью тиристорных мостов.

4. При разработке алгоритмов управления преобразователем с многообмоточным трансформатором и тиристорным коммутатором для повышения надежности работы устройства и устранения аварийных режимов, связанных с переключением вторичных обмоток трансформатора, необходимо учитывать реальное время переключения коммутатора, определяемое конструктивными параметрами трансформатора.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рашитов П.А., Ремизевич Т.В. Анализ режимов коммутации тиристорного моста переменного тока в среде PSpice. — Силовая электроника, 2010, № 3.
2. Мешков И.Н., Чириков Б.В. Электромагнитное поле, ч. 1. Электричество и магнетизм. — Новосибирск: Наука, 1987.
3. Лейтес Л.В., Пинцов А.М. Схемы замещения многообмоточных трансформаторов. — М.: Энергия, 1974.
4. Патент на полезную модель №106060 «Фазоповоротное устройство». Патентообладатель: Открытое акционерное общество «Энергетический институт им. Кржижановского».

[25.02.13]

Авторы: Новиков Михаил Александрович окончил факультет электронной техники МЭИ (ТУ) в 2010 г. Аспирант кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ».

Панфилов Дмитрий Иванович окончил факультет электронной техники МЭИ в 1971 г. В 1999 г. защитил докторскую диссертацию «Программно-аппаратные средства построения систем управления объектами промышленной электроники» в Московском институте электронной техники. Заместитель директора по научной работе ОАО «ЭНИН», зав. кафедрой промышленной электроники НИУ «МЭИ».

Ремизевич Татьяна Вячеславовна окончила факультет электронной техники МЭИ в 1979 г. Кандидатскую диссертацию «Исследование и разработка микропроцессорных систем управления вентиляционными преобразователями» защитила в 1984 г. в МЭИ. Доцент кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ».

Рашитов Павел Ахматович окончил факультет электронной техники МЭИ (ТУ) в 2008 г. В 2011 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование алгоритмов управления мощными полупроводниковыми фазоповоротными устройствами для объектов единой национальной электрической сети России» в НИУ «МЭИ». Ведущий инженер кафедры промышленной электроники НИУ «МЭИ».