

Сравнение выпрямителей в составе электроприводов переменного тока экскаваторов

МИКИТЧЕНКО А. Я., МОГУЧЁВ М. В.

По конструктивным особенностям, условиям работы и стоимости приводится сравнение тиристорных и транзисторных схем выпрямителей в составе преобразователей частоты. Схемы адаптированы для применения в электроприводах экскаваторов.

Ключевые слова: электропривод, экскаватор, преобразователь частоты, выпрямитель

В последнее десятилетие в мощных электроприводах переменного тока с целью получения потребляемой из сети энергии высокого качества всё чаще внедряются системы, в которых используется транзисторный активный выпрямитель (выпрямитель с активным передним фронтом — AFE). Такая система позволяет получить синусоидальный потребляемый ток, а также любое значение угла между током и напряжением в пределах $\pm 30^\circ$ [1]. Однако, если не ставится задача регулирования $\cos \varphi$, то, по нашему мнению, существуют еще как минимум две альтернативные схемы выпрямителей, позволяющие получить приемлемое качество потребляемой энергии. Это ведомый сетью полностью открытый транзисторный инвертор напряжения (открытый выпрямитель) [2] и реверсивный тиристорный преобразователь.

Рассмотрим применение этих выпрямителей в электроприводе экскаватора ЭКГ-12К, являющегося одним из «младших» представителей серии экскаваторов ООО «ИЗ-КАРТЭКС имени П.Г. Коробкова»; ёмкость его ковша в базовой версии составляет 12 м^3 . Для корректного сравнения схем выпрямителей необходимо рассматривать их в масштабе всего экскаватора, поэтому составлены соответствующие «скелетные» схемы. Схема с открытым выпрямителем приведена на рис. 1, схема с тиристорным преобразователем — на рис. 2. При составлении схем использованы многие общие принципиальные решения.

Обе схемы — двухтрансформаторные, группы их соединения «треугольник—звезда» и «звезда—звезда». Такой подход позволяет получить со стороны питающей сети эквивалентный 12-пульсный режим работы преобразователей и тем самым значительно улучшить форму потребляемого тока. Для получения высокого (не

The design features, operating conditions, and costs of the thyristor and transistor rectifier circuits used in frequency converters are compared. The considered circuits are adapted for use in the electric drives of excavators.

Key words: electric drive, excavator, frequency converter, rectifier

менее 900 В) напряжения на шинах постоянного тока силовые мосты и открытых выпрямителей, и тиристорных выпрямителей соединяются последовательно. Это дает возможность использовать низковольтные силовые трансформаторы (номиналь-

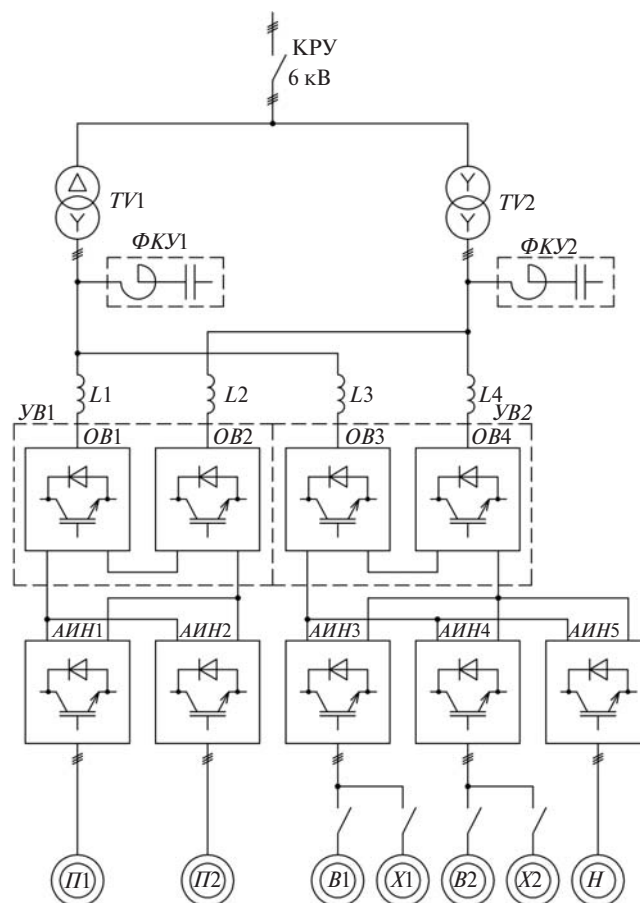


Рис. 1. Скелетная схема электропривода переменного тока экскаватора ЭКГ-12К с открытыми выпрямителями: КРУ — комплектное распределительное устройство (высоковольтная ячейка); TV1, TV2 — силовые трансформаторы; ФКУ1, ФКУ2 — фильтрокомпенсирующие устройства; UB1, UB2 — управляемые выпрямители; L1, L4 — сглаживающие реакторы; АИН1, АИН5 — автономные инверторы напряжения, управляющие двигателями главных механизмов экскаватора; OB1, OB4 — силовые мосты открытых выпрямителей; П1, П2 — двигатели подъема; В1, В2 — двигатели поворота (вращения); Х1, Х2 — двигатели хода; Н — двигатель напора

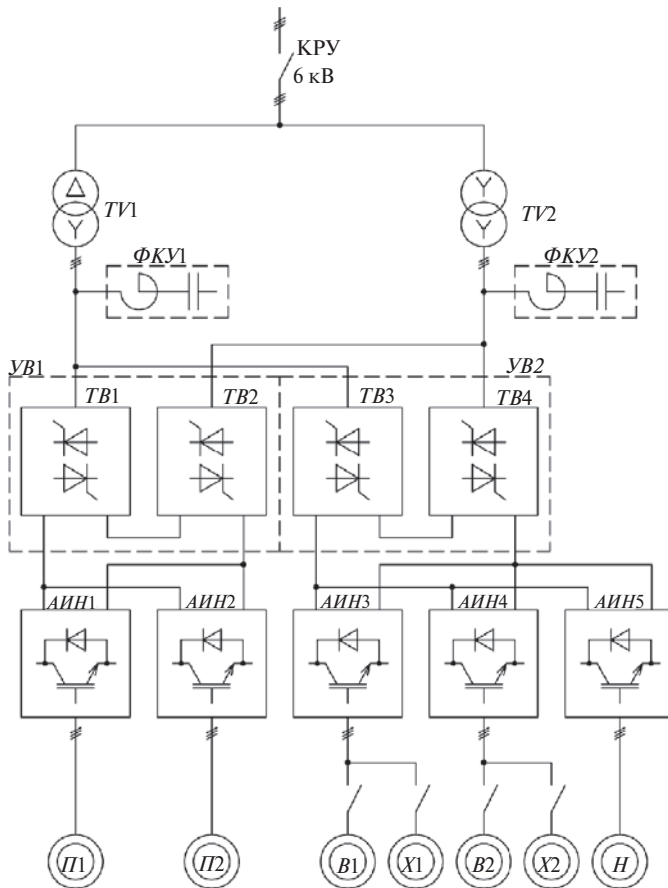


Рис. 2. Скелетная схема электропривода переменного тока экскаватора ЭКГ-12К с тиристорными выпрямителями: КРУ – комплектное распределительное устройство (высоковольтная ячейка); ТВ1, ТВ2 – силовые трансформаторы; ФКУ1, ФКУ2 – фильтрокомпенсирующие устройства; УВ1, УВ2 – управляемые выпрямители; АИН1, АИН5 – автономные инверторы напряжения, управляющие двигателями главных механизмов экскаватора; ТВ1, ТВ4 – силовые мосты тиристорных выпрямителей; П1, П2 – двигатели подъема; В1, В2 – двигатели поворота (вращения); Х1, Х2 – двигатели хода; Н – двигатель напора

ное напряжение вторичной цепи 400 В) и фильтрокомпенсирующие устройства (также на 400 В).

Повышенное напряжение на шинах постоянного тока необходимо для того, чтобы преобразователь мог работать с двигателями при номинальном напряжении питания 660 В. Фильтрокомпенсирующие устройства необходимы для подавления 5-й и 7-й гармонических составляющих потребляемого тока. Эти гармоники генерируются и тиристорным, и транзисторным преобразователями, работающими в режиме открытого выпрямителя. Кроме того, включение силового трансформатора без ФКУ на стороне НН может приводить к броскам напряжения во вторичных цепях. Амплитуда этих напряжений может оказаться настолько высокой, что приведет к пробое изоляции и выходу из строя электронных блоков, подключенных к силовому трансформатору.

Для того чтобы упростить схемы выпрямителя и избежать дополнительных затрат, связанных с разделением нагрузки в параллельно работающих си-

ловых ключах, в схемах отсутствуют общие для всего экскаватора промежуточные шины постоянного тока. Двигатели и, соответственно, автономные инверторы распределены между управляемыми выпрямителями таким образом, чтобы максимальные нагрузки за цикл экскавации не превышали допустимых для любого из выпрямителей, каждый из которых работает независимо от другого. Нагрузка между трансформаторами при этом распределяется симметрично поровну. Подобное распределение нагрузки было опробовано на экскаваторах ЭКГ-10 и ЭКГ-12, выполненных по системе «тиристорный преобразователь – двигатель (ТП–Д)», и хорошо себя зарекомендовало с точки зрения электромагнитной совместимости с сетью и другими потребителями.

Для улучшения формы потребляемого тока перед силовыми мостами открытых транзисторных выпрямителей (ОВ1, ОВ4 на рис. 1) желательно включить дополнительные реакторы. Это поможет подавить резонансные явления в силовых цепях открытых выпрямителей (об этом будет сказано ниже). Для определения рациональных значений индуктивности L_p этих реакторов проведены исследования на математической модели с помощью пакета MATLAB. Расчетная схема для электроприводов с транзисторными открытыми выпрямителями приведена на рис. 3.

Моделировать автономные инверторы напряжения и двигатели переменного тока нет необходимости. Достаточно смоделировать нагрузку, например от двигателей подъема, с помощью сопротивления, индуктивности и противоЭДС (блок б на рис. 3), эквивалентных по нагрузке двум двигателям подъема.

Режим потребления максимального тока имитируется при значении противоЭДС, меньшем напряжения холостого хода U_{dxx} . При этом ток, потребляемый системой, определяется сопротивлением и индуктивностью и эквивалентен току, потребляемому двумя двигателями подъема в стопорном режиме. Режим инвертирования максимального тока имитируется при значении противоЭДС, большем значения напряжения холостого хода U_{dxx} на шинах постоянного тока. Максимальный стопорный ток как в режиме выпрямления, так и инвертирования равен $I_{dстоп} = 1500$ А.

Параметры элементов модели установлены такими же, как и на реальном экскаваторе. Мощность короткого замыкания питающей сети составляет 25 МВА (по требованию ТЗ завода-изготовителя экскаваторов). Мощность каждого силового трансформатора 400 кВА. По предварительной

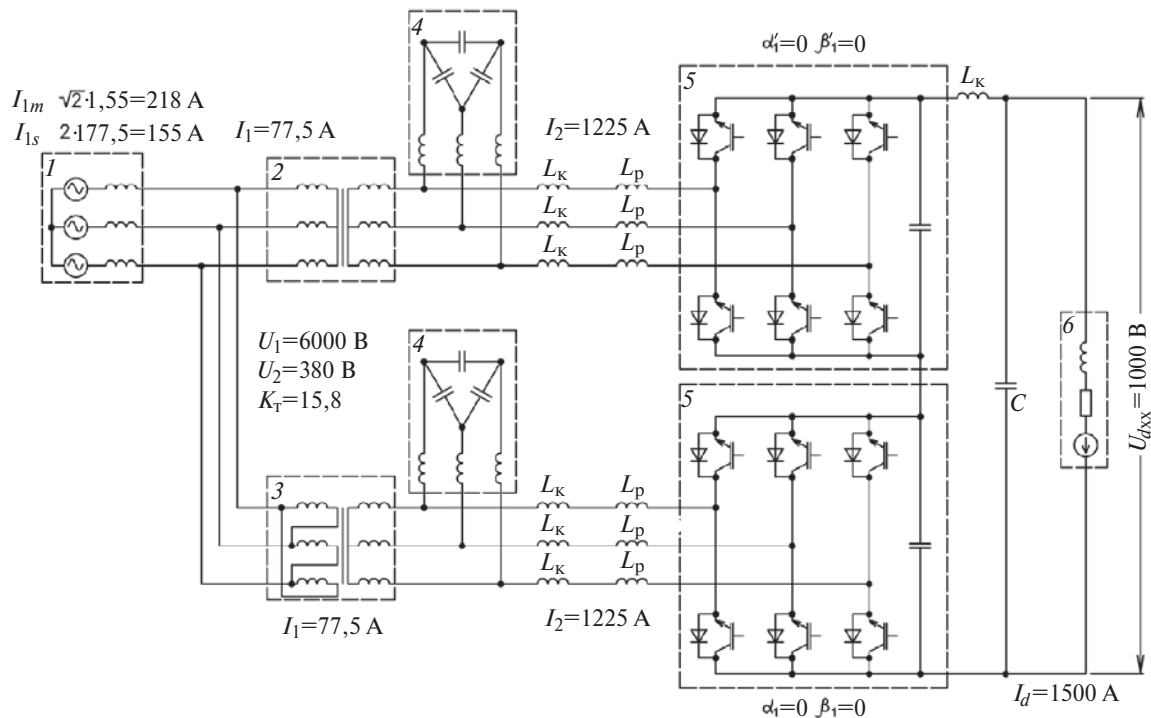


Рис. 3. Расчетная схема системы с транзисторным открытым выпрямителем: 1 – модель питающей сети; 2 – модель трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y; 3 – модель трансформатора со схемой соединения обмоток D/Y; 4 – ФКУ; 5 – силовые мосты открытого выпрямителя; 6 – модель нагрузки звена постоянного напряжения с противоЭДС; L_K – индуктивность соединительных кабелей; L_P – индуктивность сглаживающих реакторов; C – ёмкость, моделирующая емкость, включенную на шины постоянного тока в АИН, управляющих двигателями; I_{1m} – амплитуда суммарного тока, потребляемого системой из сети; I_{1s} – действующее значение суммарного тока, потребляемого системой из сети; I_1 , I_2 – действующие значения линейных токов первичных и вторичных обмоток силовых трансформаторов; U_1 , U_2 – напряжения первичной и вторичной обмоток силовых трансформаторов; K_T – коэффициент трансформации трансформатора; α_1 , β_1 , α_2 , β_2 – углы открывания и опережения открывания транзисторов; I_d – ток нагрузки выпрямителя; U_d – напряжение на шинах постоянного тока

компоновке шкафов электроприводов на экскаваторе в схему добавлены индуктивности L_K , эквивалентные примерно 7 м кабеля.

Первые же эксперименты на модели показали, что в схеме открытого выпрямителя существует замкнутый контур, внутри которого возбуждаются колебания тока на частоте 5-й и 7-й гармонических составляющих сетевого напряжения. Эти гармоники тока генерируются силовым мостом открытого выпрямителя. Контур образован следующими элементами: ФКУ, силовые ключи моста открытого выпрямителя, конденсатор на шинах постоянного тока открытого выпрямителя (блоки, обозначенные цифрами 4 и 5 на рис. 3). Колебания тока 5-й гармоники достигают 800 А, 7-й гармоники – 80 А; они дополнительно увеличивают амплитуду тока через силовые транзисторы.

Таким образом, необходимость сглаживающего реактора в схеме с открытым выпрямителем подтверждается. Определимся со значением индуктивности этого реактора.

На рис. 4 приведены осциллограммы тока через транзистор силового ключа открытого выпрямителя при отсутствии реактора в цепи его питания и при наличии реактора. Индуктивность реактора принята 0,1 мГн, т.е. примерно в 3,5 раза больше

индуктивности вторичной обмотки силового трансформатора. Для сравнения там же приведена осциллограмма тока нагрузки. При отсутствии реактора амплитуда тока на силовом транзисторе более чем в два раза превышает ток нагрузки, что требует

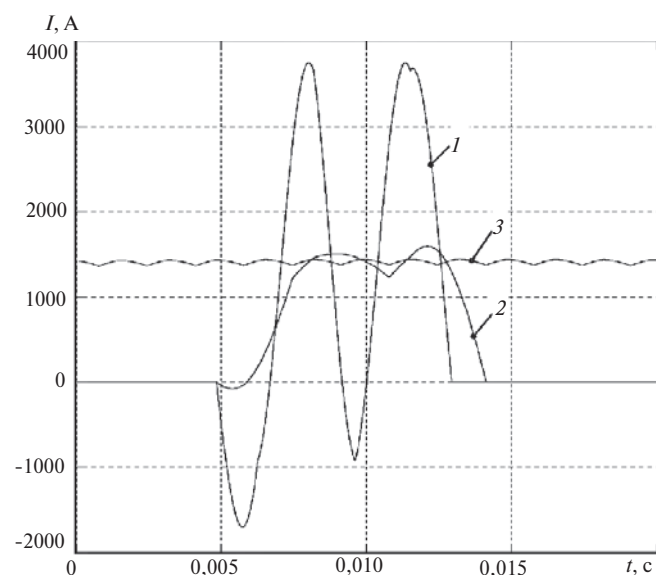


Рис. 4. Ток через транзистор силового ключа открытого выпрямителя: 1 – реактор L_P отсутствует; 2 – реактор L_P присутствует, его индуктивность 0,1 мГн; 3 – ток нагрузки

выбора силовых транзисторов на эти, значительно превышающие необходимые, токи нагрузки.

Для определения оптимальной индуктивности сглаживающего реактора были сняты зависимости напряжения выпрямителя и кратности тока через транзистор к току выпрямителя от индуктивности реактора при стопорном значении тока. Исследования проведены отдельно для выпрямительного режима работы схемы с максимальным током и для инверторного с максимальным током. Это самые тяжелые режимы работы, и параметры в этих режимах будут наилучшими.

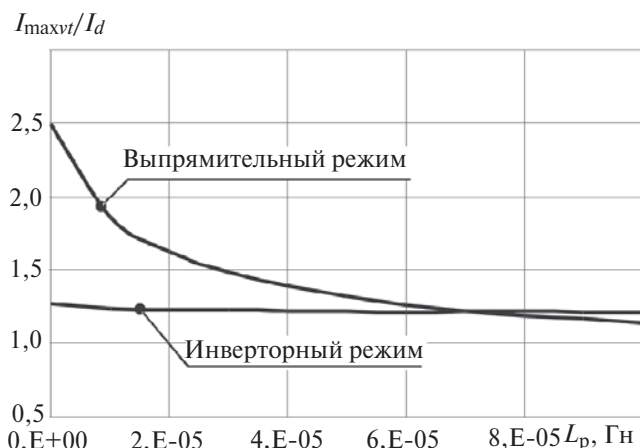


Рис. 5. Зависимость отношения тока через силовой транзистор I_{maxvt} к току нагрузки I_d от индуктивности сглаживающего реактора при стопорном значении тока $I_{dстоп}=1500$ А

Как и следовало ожидать, с ростом индуктивности при одном и том же токе нагрузки напряжение в выпрямительном режиме падает, а в инверторном растет. Это связано с падением напряжения на реакторе. Значения, на которые напряжение уменьшается в выпрямительном режиме и растет в инверторном, невелики (несколько десятков вольт) и практически не влияют на выбор силовых ключей и конденсаторов открытого выпрямителя.

Зависимость на рис. 5 напрямую влияет на выбор силовых ключей, так как силовые IGBT транзисторы выбираются по амплитуде тока, протекающего через них, а не по среднему значению, как тиристоры. В выпрямительном режиме с ростом индуктивности реактора отношение токов уменьшается, в инверторном режиме остается практически постоянным. Это говорит о том, что в инверторном режиме подпитка энергией колебательного контура прекращается. По характеру кривых на рис. 5 можно сделать вывод, что с точки зрения выбора силовых транзисторов рационально принять индуктивность сглаживающего реактора такой, чтобы отношение тока через транзистор к току нагрузки в выпрямительном и инверторном

режимах было бы примерно одинаковым. При таком подходе индуктивность составляет не менее 0,06 мГн.

Поскольку увеличение индуктивных сопротивлений на входе выпрямителей при неизменной нагрузке увеличит и фазовые сдвиги вторичных токов трансформаторов относительно фазных напряжений и падения напряжений в линиях после трансформаторов, то качество потребляемой из сети энергии должно измениться. Это изменение было оценено в различных режимах с помощью коэффициента сдвига ($\cos \varphi$) и коэффициента искажения синусоидальности напряжения ($K_{иск}$) при различных значениях L_p и неизменной нагрузке $I_{dстоп} = 1500$ А. Всего было обработано 40 осциллограмм, в результате разложения каждой в ряд Фурье с разбиением на 200 интервалов на периоде авторами получены зависимости $\cos \varphi$ и $K_{иск}$ от L_p при неизменной нагрузке.

Исследования показали, что в выпрямительном режиме значения $\cos \varphi$ и $K_{иск}$ находятся в границах, определенных ГОСТ 13109 и требованиями завода-изготовителя экскаваторов ($\cos \varphi = 0,92$ и $K_{иск} = 5\%$) практически для любых значений индуктивности реактора. Коэффициент искажения синусоидальности напряжения в инверторном режиме меньше 5% только при индуктивности реактора более 0,0275 мГн, а $\cos \varphi$ в этом режиме не укладывается в заданные пределы ни при каких значениях индуктивности и более того ухудшается с их ростом. Но с этим приходится мириться, что возможно по причине малой длительности режимов инвертирования в цикле экскавации.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что для экскаватора ЭКГ-12, работающего с электроприводами переменного тока, построенными по системе «открытый выпрямитель — автономный инвертор напряжения — асинхронный двигатель», в сетях с номинальными (по ТЗ) параметрами, индуктивность сглаживающего реактора должна быть не менее 0,06 мГн. При таком значении индуктивности практически отпала необходимость в ФКУ, настроенном на 7-ю гармоническую составляющую потребляемого тока: она подавляется сглаживающим реактором. Удалять из схемы ФКУ, настроенном на 5-ю гармонику, нежелательно из соображений безопасного включения силового трансформатора.

Создана модель исследованной системы для сравнения с её аналогом на базе выпрямителей с тиристорными реверсивными преобразователями. Расчетная схема приведена на рис. 6 (упрощения, принятые в обеих моделях, одинаковы).

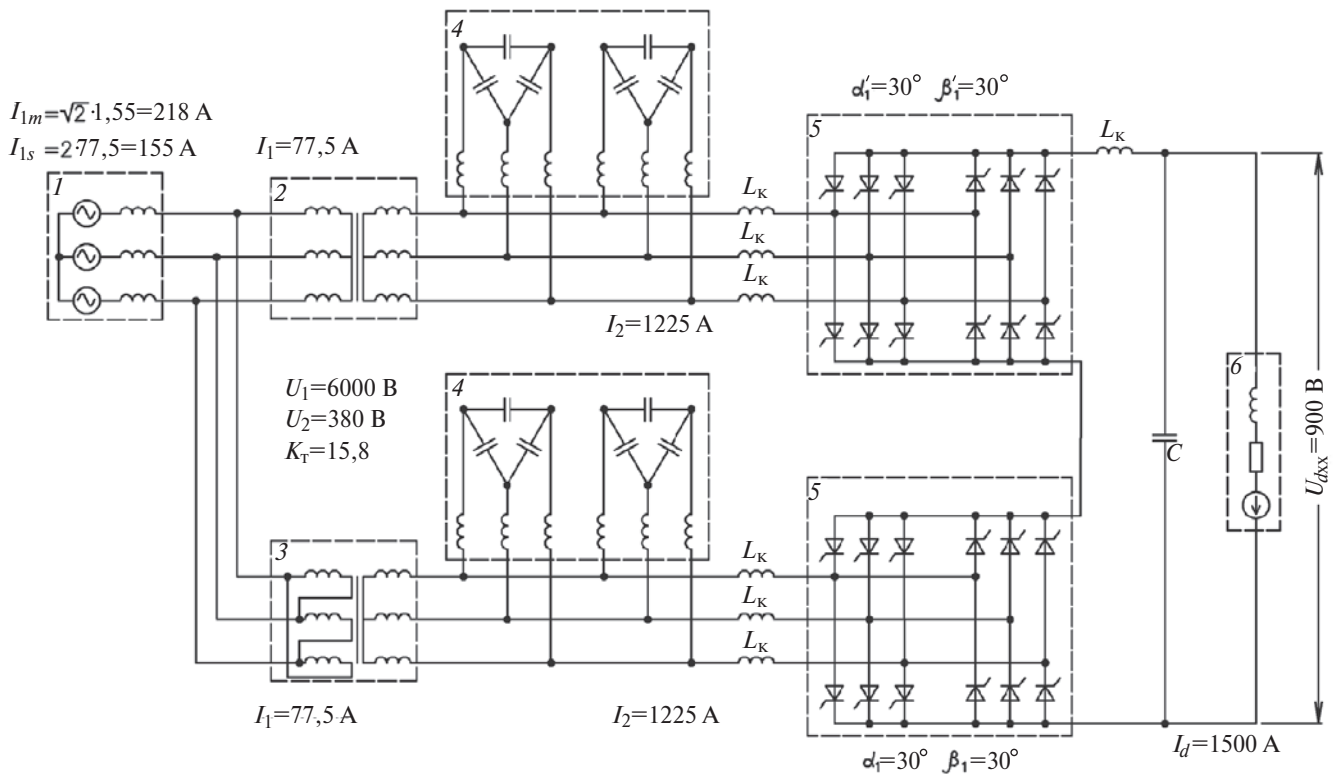


Рис. 6. – Расчетная схема системы с тиристорным реверсивным преобразователем: 1 – модель питающей сети; 2 – модель трансформатора со схемой соединения обмоток Y/Y; 3 – модель трансформатора со схемой соединения обмоток D/Y; 4 – ФКУ; 5 – тиристорный реверсивный преобразователь; 6 – модель нагрузки звена постоянного напряжения с противоЭДС; L_k – индуктивность соединительных кабелей; C – модель ёмкости, включенной на шины постоянного напряжения в АИИ, управляющих двигателями; I_{1m} – амплитуда суммарного тока, потребляемого системой из сети; I_{1c} – действующее значение суммарного тока, потребляемого системой из сети; I_1, I_2 – действующие значения линейных токов первичных и вторичных обмоток силовых трансформаторов; U_1, U_2 – напряжения первичной и вторичной обмоток силовых трансформаторов; K_T – коэффициент трансформации трансформатора; $\alpha_1, \beta_1, \alpha_1', \beta_1'$ – углы открытия и опережения открытия транзисторов; I_d – ток нагрузки выпрямителя; U_d – напряжение на шинах постоянного тока

Были сняты также осциллограммы фазных напряжений и токов, потребляемых транзисторной и тиристорной системами из сети на высокой стороне при стопорном токе $I_{d\text{стоп}} = 1500$ А в выпрямительном и инверторном режимах. Как и следовало ожидать, в транзисторной системе из-за наличия дополнительных реакторов ток гораздо больше отстает по фазе от напряжения, чем в тиристорной. Расчет интегральных показателей качества электроэнергии $\cos \varphi$ и $K_{\text{иск}}$ (см. таблицу) по полученным осциллограммам показывает, что обе схемы во всех режимах работы при максимальном стопорном токе нагрузки $I_{d\text{стоп}} = 1500$ А укладываются по показателям в ранее определенные границы. Исключение составляет инверторный режим в транзисторной схеме. Как мы уже знаем, значение $\cos \varphi$ в этом режиме заметно ниже необходимого. Однако в реальном экскаваторном цикле инверторный режим работы хоть и присутствует, но длительность его мала. Поэтому на данном этапе можно с уверенностью говорить о том, что и в транзисторной системе среднецикловое значение $\cos \varphi$ будет выше 0,92.

Система	cosj		K _{иск} , %	
	ВР	ИР	ВР	ИР
С открытым выпрямителем	0,951	0,836	1,483	4
С тиристорным преобразователем	0,987	0,997	3,785	3,348

Примечание: ВР – выпрямительный режим; ИР – инверторный.

Очевидно, увеличение индуктивности в цепи питания выпрямителя делает его внешней характеристикой более мягкой. Осциллограммы напряжения на шинах постоянного тока выпрямителя при его переходе от режима с максимальным током выпрямления $I_{d\text{стоп}} = 1500$ А к режиму с тем же максимальным током инвертирования показали следующее. В схеме с открытым выпрямителем напряжение на шинах постоянного тока изменилось от 930 В в выпрямительном режиме до 1220 В в инверторном. В схеме с тиристорным преобразователем в выпрямительном режиме напряжение составило 950 В, в инверторном было максимальным 1080 В. В транзисторной системе отмечен гладкий переход от одного режима к другому, без скачков тока и напряжения. Это свойство самой схемы.

В тиристорной схеме при переходе из выпрямительного режима в инверторный замечен характерный всплеск напряжения, размер которого определяется настройкой реверсивного комплекта системы импульсно-фазового управления.

В транзисторной и тиристорной схемах силовые ключи необходимо выбирать на номинальное напряжение не менее 1200 В (на два последовательно включенных прибора).

Осциллограммы тока на силовых полупроводниковых ключах в режиме потребления максимального тока показали, что в транзисторе и тиристоре формы токов сильно отличаются. При протекании тока через два последовательно включенных моста открытого транзисторного выпрямителя происходит наложение колебаний тока 5-й гармоники на пульсации частотой 300 Гц, характерные для любой мостовой схемы. Таким образом, формируются два больших «горба» в кривой тока. В тиристорной схеме при наложении двух кривых тока с пульсациями 300 Гц, сдвинутых на 30°, получаем удвоенную частоту пульсаций 600 Гц — четыре одинаковых «горба» в кривой тока.

Транзистор необходимо выбирать по амплитудному значению протекающего тока; в данном случае — не меньше 1800 А. В качестве силового ключа открытого выпрямителя можно использовать либо один транзистор на номинальный ток 3600 А, либо два параллельных транзистора на 1600 А. Тиристор выбирается по среднему значению тока. Для приведенного случая вполне достаточно выбрать тиристор на номинальный ток 800 А.

Выводы. 1. И открытый выпрямитель, и реверсивный тиристорный преобразователь в качестве управляемых выпрямителей в системах экскаваторного электропривода переменного тока обеспечивают приемлемые показатели качества потребляемой электроэнергии. При этом транзисторная схема справляется с этой задачей несколько хуже, а её конструктивное исполнение существенно сложнее, чем тиристорной.

2. Самая большая разница между схемами заключается в цене. Стоимость одного силового транзистора на 3600 А составляет примерно 100 тыс. руб. (в ценах конца 2011 г.), транзисторов на комплект открытых выпрямителей для экскаватора

необходимо 24 шт. Следовательно, только на силовые транзисторы требуется около 2 млн 400 тыс. руб. Стоимость одного тиристорного модуля из двух тиристоров на 800 А составляет примерно 20 тыс. руб. Модулей в комплект управляемых выпрямителей для экскаватора необходимо также 24 шт. (48 тиристоров). Общая сумма получается равной 480 тыс. руб., т.е. в 5 раз меньше, чем для транзисторной схемы. И это без учета силовых конденсаторов, которых в тиристорной схеме нет.

3. Таким образом, транзисторная схема конструктивно сложнее и дороже, чем тиристорная, однако работают обе схемы практически одинаково. Поэтому транзисторные схемы выгоднее использовать в системах с AFE, т.е. там, где без регулирования $\cos\varphi$ обойтись нельзя. Если же регулировать $\cos\varphi$ нет необходимости, то вполне достаточно использовать в преобразователе частоты в качестве выпрямителя тиристорный преобразователь.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Патент № 2321147 (РФ). Способ релейного формирования сетевых токов в трехфазном мостовом сетевом инверторе/А.Я. Микитченко, Э.Л. Греков, М.В. Могучев и др. — БИ, 2008, № 9.

2. Патент № 2280310 (РФ). Способ релейного формирования тока и устройство для его осуществления/А.Я. Микитченко, М.В. Могучев. — БИ, 2006, № 20.

[27.08.12]

Авторы: Микитченко Анатолий Яковлевич окончил в 1969 г. энергетический факультет Фрунзенского политехнического института. В 1999 г. защитил докторскую диссертацию «Разработка и исследование частотно-управляемого асинхронного электропривода по системе НПЧ—АД для машин предприятий горнодобывающей промышленности». Директор по научной работе ОАО «Рудоавтоматика». Скончался в 2013 г.

Могучев Максим Владимирович окончил в 1999 г. электроэнергетический факультет Оренбургского государственного университета. В 2006 г. защитил кандидатскую диссертацию «Улучшение динамических и энергетических показателей электроприводов экскаваторов, выполненных на базе моноблочного транзисторного преобразователя с прямым обменом энергией с сетью». Заместитель директора по научной работе ОАО «Рудоавтоматика»,